

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ

В. В. Ешев

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
2-е издание



УМО СПО рекомендует

Юрайт
ПРЕСС



В. В. Штыков

ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ ДЛЯ ВУЗОВ

2-е издание, исправленное и дополненное



Курс с практическими заданиями и дополнительными материалами
доступен на образовательной платформе «Юрайт»,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Москва • Юрайт • 2024

УДК 621.37:621.38(075.8)

ББК 32я73

Ш94

Автор:

Штыков Виталий Васильевич — профессор, кандидат технических наук, профессор кафедры основ радиотехники Института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ».

Штыков, В. В.

Ш94 Введение в радиоэлектронику: учебник и практикум для вузов / В. В. Штыков. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 228 с. — (Высшее образование). — Текст: непосредственный.

ISBN 978-5-534-08405-4

В учебнике изложены современные представления о радиоэлектронике как средстве передачи, приема, обработки и хранения информации. Описаны исторические этапы развития информационных технологий в их неразрывном единстве с развитием средств связи. Формируются начальные представления о сигналах и их математических моделях. Рассмотрены наиболее важные свойства гармонических колебаний и монохроматических радиоволн. Приведено описание основных элементов радиоканала.

Учебник содержит большое количество иллюстраций. Контрольные вопросы к главам помогут студентам лучше усвоить теоретический материал.

УДК 621.37:621.38(075.8)

ББК 32я73

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-08405-4

© Штыков В. В., 2012

© Штыков В. В., 2016, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2024

Оглавление

К читателю	7
Предисловие	10
Введение	12
1. Этапы становления информатики как самостоятельного научно-технического направления.....	19
1.1. Появление речи и зарождение сознания	20
1.2. Возникновение письменности.....	22
1.3. Изобретение книгопечатания.....	25
1.4. Оптический телеграф.....	27
1.5. Электрический телеграф.....	29
1.6. Создание телефона	33
1.7. Изобретение радио.....	39
1.8. Зарождение и развитие теории информации	48
1.9. Автоматическое управление и кибернетика	50
1.10. Появление электронной вычислительной машины.....	54
1.11. Создание персонального компьютера	60
1.12. Создание цифровых систем связи.....	64
Контрольные вопросы к главе 1	67
2. Информационный канал и канал связи.....	69
2.1. Структура информационного канала	70
2.2. Канал связи.....	71
Контрольные вопросы к главе 2	74
3. Сигналы и их математические модели	75
3.1. Математические модели сигналов.....	75
3.2. Виды сигналов	76
Контрольные вопросы и задачи к главе 3	80
4. Гармоническое колебание в роли носителя информации	82
4.1. Способы представления гармонического колебания	82
4.2. Спектральное представление сложных сигналов	84
4.3. Модулированные сигналы	87
Контрольные вопросы и задачи к главе 4	91
5. Электромагнитные поля и волны как носители информации... 93	
5.1. Математическая модель электромагнитной волны	94
5.2. Отражение и преломление электромагнитных волн.....	95

5.3. Интерференция электромагнитных волн.....	97
5.4. Дифракция электромагнитных волн	101
<i>Контрольные вопросы и задачи к главе 5</i>	<i>104</i>
6. Распространение радиоволн в земных условиях	105
6.1. Свойства земной поверхности и атмосферы Земли.....	105
6.2. Диапазоны электромагнитных волн	109
6.3. Особенности распространения радиоволн различных частот	112
<i>Контрольные вопросы и задачи к главе 6</i>	<i>117</i>
7. Линии передачи электромагнитных волн	119
7.1. Двухпроводная линия.....	119
7.2. Коаксиальный кабель.....	121
7.3. Металлический волновод.....	122
7.4. Радиорелейная линия связи	124
7.5. Волоконно-оптическая линия связи	125
<i>Контрольные вопросы и задачи к главе 7</i>	<i>127</i>
8. Основные элементы канала связи.....	129
8.1. Радиоприемники	129
8.2. Радиопередатчики.....	136
8.3. Антенны и антенные комплексы	141
<i>Контрольные вопросы к главе 8</i>	<i>148</i>
9. Радиоэлектроника — неотъемлемая часть и двигатель научно-технического прогресса.....	149
9.1. Радиовещание	150
9.2. Телевидение и телевизионное вещание	152
9.3. Радиолокация	160
9.4. Радионавигация	166
9.5. Радиометеорология.....	171
9.6. Радиоастрономия	173
9.7. Радиоспектроскопия	177
9.8 Мобильная связь.....	181
<i>Контрольные вопросы и задачи к главе 9</i>	<i>185</i>
Заключение.....	186
Рекомендуемая литература	187
Новые издания по дисциплине «Радиоэлектроника» и смежным дисциплинам	189
Приложения	191
Приложение 1. Хронология событий	191
Приложение 2. Диапазоны электромагнитных волн.....	211
Приложение 3. Диапазоны частот для радиовещания, принятые в России.....	213
Приложение 4. Латинский и греческий алфавиты	214
Приложение 5. Десятичные приставки	215
Приложение 6. Фундаментальные константы	215

Приложение 7. Соотношения между значениями физических величин	216
Приложение 8. Условные обозначения элементов на схемах	218
Приложение 9. Система маркировки компонентов цепей.....	219
Приложение 10. Некоторые математические константы.....	222
Приложение 11. Элементарные приближенные вычисления	223
Приложение 12. Некоторые часто встречающиеся функции.....	226
Приложение 13. Некоторые полезные формулы	228

К читателю

Предложенная мне для рецензирования книга является в определенном плане уникальной и полезной. Постоянные дискуссии в средствах массовой информации и по телевидению о необходимости переориентировки общественного сознания на широчайшее использование современных коммуникационных возможностей, насыщенных информационных сетей сейчас уже не вызывают сомнений у рядового населения в полезности и перспективности. Практически заканчивается эра обмена обычными почтовыми пересылками, и все переносится в новую информационную среду с помощью электронной почты. К большому сожалению, падает интерес молодежи к обычным книгам, а за информацией население все чаще обращается к Интернету, в том числе даже для осуществления покупок товаров повседневного спроса.

Мы все как-то не заметили в трудные 90-е годы, что мимо нас в России полностью прошла очередная научно-техническая революция, которую можно было бы назвать «беспроводной» революцией. Почти у каждого из нас в кармане или в сумочке возникла сложная современная радиотехническая система в лице мобильного телефона, у многих имеется крошечный модем для мобильной связи, который, будучи воткнут в компьютер того или иного размера обеспечивает коммуникацию через сеть с любой точкой Земного шара. Во многих персональных автомобилях уже имеется элемент космической связи — приемный узел глобальной навигационной системы. Современный радиоприемник, телевизор. Радиотелефон, система наблюдения, система оповещения и многое много другое можно было бы приводить в качестве примера развития этого нового «беспроводного» этапа научно-технической революции.

Конечно же, все эти успехи и еще трудно предсказуемые будущие достижения возникли не на пустом месте, а являются результатом бурного развития, во-первых, радиотехники и электроники, и, во-вторых, предыдущей и сейчас развивающейся информационной революцией. Современные студенты очень широких специальностей просто обязаны сейчас познакомиться с историей этих научно-технических революций, с фундаментальными принципами, обеспечивающими функционирование беспроводных коммуникационных систем, с конкретными примерами практической реализации.

Предлагаемая книга имеет целью осветить именно эту проблему и книга основана на многолетнем опыте автора общения с современ-

ными студентами радиоэлектронного направления, особенно в самом начале обучения, когда далеко не все студенты уже знакомы с удивительным, разнообразным, притягивающим к себе миром радиотехники, электроники, приборостроения, измерительной техники и многих других направлений науки и техники, которые сейчас без этого не могут обойтись.

Автор уделяет в книге большое внимание роли российских ученых в становлении и развитии систем передачи информации. Широкий охват в одной книге этой сложной отрасли является, несомненно, очень привлекательным для студентов младших курсов, которые делают первые шаги на пути к профессиональному мастерству. Вопросы, обсуждаемые в учебном пособии, несомненно, пробудят интерес студентов к выбранной радиоэлектронной специальности, но, конечно же, они будут интересны и для студентов смежных специальностей или просто у людей, интересующихся тем, как же вокруг нас незаметно для глаза функционирует море уже имеющихся беспроводных устройств.

В книгу включено описание упрощенных математических моделей физических явлений. Описание этих моделей, с одной стороны, ограничено рамками обычной школьной математики и физики, а с другой — согласуется с более точным описанием в базовых дисциплинах профессиональной подготовки студентов технических и классических университетов.

Важно, что изложение ведется красивым простым и понятным языком, исходя из единых согласованных позиций, разные главы подготовлены в едином стиле и не вызовут разнобоя в понимании отдельных сложных вопросов. Разделы рукописи хорошо иллюстрированы, причем в ряде случаев приведены уникальные фотографии XX века. Привлекательно и то, что автор не надеется на блестящую память читателя, а приводит в приложениях главные нужные сведения из школьной математики и физики.

Считаю, что владельцы книги и читающие ее никогда не пожалеют о том, что обратились к ней и найдут в ней очень много полезного, как нашел в ней я при первом прочтении.

Док. техн. наук, профессор МЭИ,
заслуженный работник Высшей школы РФ
С. М. Смельский

Моей «альма-матер» — Радиотехническому факультету Московского энергетического института.

Предисловие

Учебное пособие написано по материалам лекций, прочитанных автором на радиотехническом факультете МЭИ по курсу «Физические основы радиотехники». Однако сам этот материал базируется на многолетнем опыте чтения подобного курса моими коллегами. Значительное влияние также оказали сложившиеся на факультете традиции чтения таких лекционных курсов, как теория цепей, радиотехнические цепи и сигналы, электродинамика, а также других специальных дисциплин.

При работе над книгой было просмотрено и обработано большое число литературных источников. Это пришлось сделать, так как сведения, которые в них приводятся, противоречивы. Дело не только в толковании авторами тех или иных событий, но и в ошибках в датах, именах, описаниях явлений и сути открытий. Нет никакой возможности привести полный список использованных источников.

Часть включенного в книгу материала преследует цель развития кругозора у вчерашних школьников, которые только что переступили порог высшего учебного заведения.

Материал книги очень разнообразен. Поэтому в процессе работы над рукописью приходилось обращаться к моим коллегам за консультациями. Всем им большое спасибо.

В. Штыков

О сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, бог изобретатель.

А. С. Пушкин. 1829

Введение

Итак, вы переступили порог университета. На несколько лет он станет вашим родным домом, покинув который вы всю свою жизнь будете вспоминать «альма-матер» (лат. *alma mater* — буквально кормящая мать). Вы отдадите университету лучшие годы своей жизни, а он взамен вооружит вас знаниями — основой вашей будущей карьеры, изменит ваш внутренний мир и сделает вас интеллигентными, образованными людьми, активными гражданами нашего отечества.

Здесь вы встретите друзей, а может быть и свою любовь. Это люди, с которыми вы пройдете всю свою жизнь, и которые всегда придут вам на помощь.

Однако результат во многом зависит от вас самих. Что же надо делать?

Прежде всего, **надо распрощаться с некоторыми иллюзиями школьных лет.**

1. Высшее образование необязательное. Поэтому **в университете не учат, а учатся.** Конечно, кое-какие дисциплинарные меры действуют. Однако их существенно меньше, чем в школе. Обманчивое ощущение свободы, подкрепленной студенческим фольклором, может сыграть с первокурсником злую шутку. Процент отсева студентов на первом курсе весьма высок.

2. Высшее учебное заведение предоставляет вам **возможность получить знания и навыки**, необходимые для вашей будущей профессиональной деятельности. В школе вы привыкли, что учителя вас учат. В вузе преподаватели будут преподавать вам дисциплины. Ваша задача перенять у преподавателя как можно больше того, что он знает и умеет.

3. Высшее учебное заведение готовит специалистов для работы в конкретной сфере профессиональной деятельности, которая будет успешной только при условии **освоения всех дисциплин учебного плана, как единого и неразрывного целого**¹. Студенты, продолжающие по школьной привычке учить предметы (русский язык, алгебру, химию, историю²...), каждую очередную дисциплину воспринимают как абсолютно новую. В результате возникают трудности ее освоения. Это вынуждает переходить на бессмысленную зубрежку, что порождает новые проблемы и т. д.

¹ Это вовсе не означает, что в каждой дисциплине надо знать абсолютно все. Но изучение каждой следующей предполагает наличие знаний и умений во всех предыдущих.

² Из-за разнообразия и разнородности дисциплин в школе внимание учеников не акцентируется на междисциплинарных связях.

4. Основой образования в техническом вузе является **фундаментальная подготовка** (математике, физике, теории электрических цепей и т. п.). Это связано с тем, что на современном этапе развития производства изучить все нужные инженерные дисциплины на рецептурном уровне не под силу никому. Хорошая теория экономит массу времени и финансовых средств, существенно сокращая небезопасный процесс постижения истины методом проб и ошибок. К. А. Гельвеций¹ писал, что знание некоторых принципов легко возмещает незнание некоторых фактов.

5. Следует понять, что научиться **делать то, что не умеешь — дело не легкое**, так что приготовьтесь к самостоятельной и напряженной учебе.

Чтобы не жалеть в будущем о потерянном времени, надо поставить перед собой цель, и делать все возможное для ее достижения. Какие же это цели? Конечно, у всех они разные и вы свободны в своем выборе. Однако в общих чертах картину можно представить приблизительно следующим образом:

- **получить диплом о высшем образовании** — самая простая цель. Некоторая часть студентов, поставившая эту цель, так и не получают диплома, те же, кто получает, часто работает не по специальности²;

- **получить общее представление о предмете выбранной специальности** — более высокая цель, но она не очень далека от первой;

- **получить объем знаний и умений, которого достаточно для решения стандартных задач** — вполне разумная цель, в любом деле нужны грамотные исполнители и, в конце концов, все в мире держится на армии добросовестных, умелых работников;

- **получить фундаментальные знания, а также навыки самостоятельного решения широкого круга задач и проблем в выбранной сфере деятельности** — высокая цель, те, кто ее поставил перед собой, имеют заметные успехи уже на студенческой скамье, ведут самостоятельные исследовательские работы под руководством преподавателей вуза, участвуют в работе научных конференций и т. п., это будущее нашего научно-технического прогресса;

- **стать разносторонне образованным, активным и высококультурным членом общества, квалифицированным специалистом, способным самостоятельно выявлять проблемы и находить способы их решения** с использованием фундаментальных знаний, научных методов познания и системного подхода — высокая и благородная цель. Это будущее нашей страны.

Теперь обсудим организацию учебы в вузе.

¹ Клод Адриан Гельвеций (фр. *Claude Adrien Helvetius*, 1715—1771) — французский литератор и философ-материалист.

² Стоило ли мучиться, если порученную вам работу можно выполнять и, не имея квалификации инженера. Один отличный техник стоит трех недоученных инженеров, а одна квалифицированная секретарь-машинистка, подготовленная в ПТУ, может заменить пяток барышень с дипломами о высшем образовании.

Обучение здесь ведется в форме лекции, упражнений (семинаров), лабораторных работ. Каждая форма учебных занятий выполняет свою функцию. Ни одной из них нельзя отдать предпочтение, поскольку только единство форм образует фундамент образовательной системы.

Лекции — читаются преподавателями, как правило, большим потокам студентов. Основная цель — изложить фундаментальные основы дисциплины. Для того чтобы представить общую картину на лекциях, используются идеализированные математические модели. Контроль освоения материала лекций проводится на упражнениях и в учебной лаборатории. Лекторы проводят консультации студентов по установленному расписанию. Помните, что даже при наличии учебника (учебников) лектор излагает на лекции свое индивидуальное видение предмета. Много из того, что есть в лекциях, может отсутствовать в книгах. Поэтому лекции надо посещать регулярно. Чужой конспект не компенсирует пропущенной лекции (см. выше о школьных иллюзиях).

Упражнения — проводятся преподавателем в учебной группе. В гуманитарных дисциплинах такие занятия называются семинарами. Основная цель — освоить приемы решения стандартных задач с использованием материала лекций. Без этого немыслимо эффективное обучение. Кроме того, на упражнениях вырабатываются навыки самостоятельного поиска методов решения и развиваются творческие способности. Контроль результатов обучения осуществляется не только на самих занятиях, но с помощью индивидуальных расчетных заданий.

Лабораторные работы — проводятся в учебных лабораториях. Основная цель — дать возможность соприкоснуться с реальными объектами. В лаборатории студент получает навыки проведения самостоятельных экспериментов. Здесь развивается наблюдательность и способность выявления противоречий между теоретическими моделями (лекциями и упражнениями) и реальным объектом. Будущий инженер (физик, химик, биолог,...) должен уметь общаться с миром, который его окружает. Контроль знаний и умений проводится в учебной лаборатории в форме защиты. При защите вы не только отчитываетесь о проделанной работе, но и получаете навыки ведения дискуссии, аргументации и отстаивания своей точки зрения.

Ввиду особой важности остановимся на приемах работы на лекциях.

Манера чтения лекции разительно отличается от урока учителя в школе. Дело конечно не в числе слушателей (до 200 чел), а в том, что лектор делится со студенческой аудиторией своими знаниями, а иной раз и раздумьями. Он приглашает аудиторию к совместной работе. Поэтому лектор редко прибегает к диктовке, а на старших курсах почти не использует этот прием. Темп подачи материала тоже отличается от школьных норм. Поэтому, особенно вначале, у студентов возникают проблемы с записью лекций. Ошибка состоит в стремлении записать материал дословно. Вот несколько советов.

1. Не надо торопиться. Дослушайте до конца фрагмент лекции. Лектор всегда делает паузы. Попробуйте понять, что именно он хочет

вам разъяснить. Затем запишите своими словами то, что поняли. Если не поняли, то в конце лекции задайте вопрос.

2. Используйте сокращения слов. Выработайте систему сокращений и условных знаков (пиктограмм, иероглифов). Используйте математические символы. Например, вместо «Пройденный телом путь равен ускорению, умноженному на квадрат времени и деленному на два», пишите:

$$\text{«Путь} = \text{ускор} \cdot \text{врем}^2 / 2\text{»}.$$

3. Внимательно записывайте формулы. Формула — это концентрированная форма представления информации. Рядом с формулой дайте свои разъяснения с учетом п.п. 1 и 2.

4. Аккуратно и внимательно зарисовывайте иллюстрации и графики. Помните, один график может быть полезней многих слов. Рядом с графиком запишите комментарий лектора, но с учетом сказанного выше. Добавьте свои комментарии.

Не волнуйтесь и тем более не пугайтесь, если проявите упорство, то запись лекций очень скоро не будет для вас проблемой. Имейте в виду, у студентов старших курсов никаких особых проблем с записью лекций нет.

Конечно, одних только лекций для освоения той или иной дисциплины недостаточно. Число лекций ограничено. Поэтому лектор вынужден отбирать материал так, чтобы осветить наиболее важные, ключевые вопросы дисциплины. Лекционный материал следует дополнить работой с книгой. Желательно не только при подготовке к экзаменам. Как правило, существует учебник или учебное пособие. В них дается более полное, подробное и систематизированное изложение дисциплины. Материал лекций служит путеводной нитью при работе с учебником.

При работе с книгой будущий инженер не должен скользить по тексту так, как будто это очередной детективный роман. Вы должны понять все доводы автора, доказательства и математические выкладки. Полезно математические преобразования и решения уравнений проделывать самостоятельно. Обязательно сопоставьте материал учебника с вашими предыдущими знаниями. Не принимайте его на веру. Если что-то из перечисленного выше не удастся сделать, обязательно проконсультируйтесь у преподавателя¹.

Те, кто ставит перед собой более высокие цели, должны уже на первом курсе дополнительно читать книги, не входящие в список рекомендованной литературы. Например, при изучении математики очень полезно заглянуть в книгу Я. Б. Зельдовича и И. М. Яглома «Высшая математика для начинающих физиков и техников», а при изучении

¹ Только не приходите с распространенным школьным вопросом: «Скажите, как надо отвечать на этот вопрос?».

физики — в знаменитые и очень популярные Феймановские лекции по физике. У вас всегда под рукой должны быть справочники по математике и физике.

В лекциях и в книгах вы встретите формулы. В инженерных науках их много, а иногда даже очень много. Не пугайтесь!

Формулы отображают закономерности, которые существуют в реальном мире. Закономерности могут быть представлены не только формулами, но и уравнениями, которые следует решить. Сами по себе формулы не представляют интереса. Поэтому их не следует заучивать. Надо понять их содержание. Тогда они легко запомнятся сами собой. Числовые множители в большинстве случаев не так важны как функциональные связи. Например, преподавателю вполне достаточно, если вы скажете, что плотность потока мощности точечного источника света убывает пропорционально квадрату расстояния от него до точки наблюдения. Это можно также записать, например, так $P \sim 1/r^2$. Ну, а пропущенный множитель 4π преподаватель, конечно же, вам простит¹. Вы должны воспитать в себе уверенность, что любую формулу в учебнике и лекциях вы можете вывести самостоятельно².

Нельзя обойти вопрос о роли компьютера в процессе обучения, поскольку здесь сложилась не совсем нормальная и даже странная ситуация.

Компьютер — это инструмент инженера, а не его заменитель. По сути, электронная вычислительная машина (ЭВМ) — это всего лишь автомат, работу которого можно интерпретировать как операции с числами. Автомат выполняет только то, что ему предписывает программа, созданная человеком.

У некоторой части выпускников школ сложилось впечатление (не без внешнего влияния) о всемогуществе персонального компьютера (ПК). Однако программы пишут люди, а среди программистов бытует поверье — «нет такой программы, в которой не было бы пары ошибок». Студентов очень удивляет, что преподаватель без всяких предварительных расчетов возвращает на переделку работу, выполненную на ПК, указав на ошибки³.

Надо трезво оценивать возможности ПК. Поэтому прежде чем проводить расчет, надо примерно представлять какой же получится результат. И если вдруг окажется, что путь, пройденный телом, равен 10^{-16} м, то неплохо бы вспомнить, что размер атома порядка 10^{-10} м, а размер его ядра — 10^{-13} метра.

Некоторые продвинулись дальше и, заучив какое-то количество магических заклинаний и поместив с их помощью в желаемые места

¹ И все же надо иметь в виду, что иногда численные значения коэффициентов могут играть важную роль, например, при решении задач.

² Представьте себе спортсмена-прыгуна, который стоит на дорожке и не верит, что возьмет высоту.

³ Обычно студенты в этом случае говорят: «Я же на компьютере считал по формулам. ПК дал такой результат».

кнопочки и окошечки, решили, что они научились программировать. Амбиции быстро исчезают, когда начинается институтский курс программирования. Очень странно, но в век всеобщей компьютерной грамотности у студентов часто возникают проблемы с получением зачета по этому курсу¹.

Дело в том, что программирование не сводится к демонстрации внешне экстравагантных эффектов. Инженеры занимаются прикладным программированием, которое направлено на решение конкретной практической проблемы. Это подразумевает отличное владение математикой и логикой, а также наличие знаний в области, связанной с этой проблемой². То же, что некоторые принимают за программирование — это лишь видимая часть айсберга.

К вопросу использования вычислительной техники примыкает и вопрос о точности результатов расчета. Обычно калькулятор или ПК отображают не менее 6 значащих цифр. Однако точность исходных данных в инженерной практике редко превышает единицы процентов. Поэтому вести расчеты с большей точностью не имеет смысла. Это так же делает весьма полезным навык «устного счета». При надлежащей тренировке вы сможете считать быстрее калькулятора, а в инженерном деле (да и в студенческой практике) иногда выигрыш по времени с лихвой компенсирует потерю точности. Кое-что полезное для быстрого счета вы найдете в приложении.

Теперь несколько слов о содержании книги, которые поясняют концепцию автора.

Специалисты по радиоэлектронике занимаются разработкой средств передачи, приема, хранения, защиты и обработки информации. Именно технические проблемы связи привели в середине XX в. к зарождению теории информации. Значительная часть ЭВМ в 50-х годах XX в. была задумана и создана для обслуживания радиосистем различного назначения. Современное радиоэлектронное устройство — это специализированная электронная вычислительная машина. В настоящее время нет четкой границы между радиотехникой и информатикой. Поэтому в первом разделе излагаются основные этапы развития информатики и ее связи с радиоэлектроникой. Этот материал, несомненно, будет способствовать расширению кругозора читателя.

Процесс обмена информацией осуществляется через информационный канал (раздел 2), в котором информация существует в виде сигнала — некоторого физического процесса, адекватного ей. Для описания свойств сигнала как носителя информации, используются математические модели (раздел 3). Наиболее удобным для передачи информации оказался гармонический сигнал (раздел 4), а для пере-

¹ Это результат стремления средней школы формально внедрить информатику в головы учеников, а не развивать у них способность к логическому мышлению, без которого программирование невозможно.

² Это важно и при использовании готовых прикладных программ.

дачи информации на значительное расстояние — монохроматические электромагнитные волны (раздел 5), которые распространяются в свободном пространстве (раздел 6). Однако в настоящее время сигналы, переносящие информацию, часто передаются по специальным линиям передачи (раздел 7).

Радиоэлектронные средства отличаются богатым разнообразием систем, устройств и типов аппаратуры. Однако в них всегда можно обнаружить приемник и передатчик, а и во многих случаях — антенну (раздел 8).

Теперь уже не возможно себе представить нашу жизнь и практическую деятельность без радиоэлектроники. Радиоэлектронные устройства и системы прочно вошли в повседневную жизнь. С их помощью решается широкий круг научных и технических задач (раздел 9).

Все разделы дополнены контрольными вопросами, а в некоторых из них есть и задачи.

В приложении к основному материалу приведены сведения, которые будут полезны студентам, особенно первокурсникам.

1. Этапы становления информатики как самостоятельного научно-технического направления

Информация представляет собой одну из форм проявления общественного сознания. Она — нематериальна и субъективна.

Действительно представьте, что вы рассматриваете в оригинале (на древнеанглийском языке) творение В. Шекспира. Черные символы на странице воспринимаются зрительным аппаратом и сопровождаются физическими процессами в головном мозге. Однако объем информации, которую при этом вы получаете, невелик¹.

Иное дело если перед вами литературный перевод того же произведения на ваш родной язык. Те же физические процессы, проецируясь на ваш предыдущий опыт, порождают массу переживаний и глубоких чувств, и изменяют вас.

Что же такое предыдущий жизненный опыт? Конечно же, это то, чему научило вас общество, в котором вы живете. Это общественное сознание, которое существует безотносительно к конкретному человеку, которое передается от поколения к поколению, сохраняясь и приумножаясь. Крупицы этого сознания добываются каждым из нас. Поэтому обмен информацией является необходимым условием существования общества.

С информацией тесно связан термин информатика. В энциклопедической литературе информатика определяется как наука об общих свойствах информации, закономерностях и методах ее поиска, получения, записи, хранении, передачи, обработки, распространения и использования в различных сферах человеческой деятельности. Информатика включает в себя все вопросы применения вычислительной техники, определяет пути ее развития и стимулирует ее совершенствование.

В некоторых учебниках и учебных пособиях по информатике ее часто связывают исключительно с появлением электронных вычислительных машин. Это, конечно, однобокое представление сути дела. Такое утверждение сродни утверждению о том, что телевидение возникло с появлением на прилавках магазинов телевизионных приемни-

¹ Дело не только в знании иностранного языка. Часто требуется знание истории и традиций народа. Именно этим отличается хороший переводчик от программы перевода текстов на ЭВМ.

ков. Обычно в подобных книгах приводится перечисление некоторого числа событий, которые называют информационными революциями¹. Эти события выстраиваются так, чтобы показать, что информатика связана с созданием ЭВМ. Воспользуемся этим приемом и покажем, что информатика и теория информации зародились гораздо раньше в недрах теории связи, а первые опыты человека по обмену информацией были сделаны сотню тысяч лет назад.

Включенный в этот раздел исторический материал дает также представление о том, как формировались фундаментальные представления теории радиосвязи, на каком уровне развития находится современная радиоэлектроника и какими проблемами в настоящее время приходится заниматься специалистам в этой области науки и техники.

1.1. Появление речи и зарождение сознания

Появление речи и зарождение сознания следует принять за исходные точки формирования современной информатики. Эти два явления невозможно четко и однозначно разделить. До сих пор идут споры о том, что было первичным — речь или сознание. После впечатляющих успехов генетики в конце XX в. одно можно с уверенностью утверждать — из всех приматов только в геноме человека присутствует ген речи.

Предок современного человека *Homo sapiens* (человек разумный) появился пару сотен тысяч лет назад в Африке. Вместе с рядом вымерших видов человек разумный образует род человек (*Homo*). От ближайшего вида — неандертальцев — человек разумный отличается рядом особенностей строения скелета. В 2005 г. были описаны останки человека, возраст которых составляет около 160000 лет. Анатомические отличия экземпляров побудили исследователей выделить новый подвид *Homo sapiens deatlu* («Старейшина»).

Около 74000 лет назад в Африке небольшая популяция *Homo sapiens*, пережив последствия очень мощного вулканического извержения (≈ 30 лет зимы), стала предком современных людей. Можно предположить, что приблизительно 50000 лет назад люди мигрировали в Азию, и оттуда в Европу (40000 лет), Австралию и Америку (35000—15000 лет).

Именно разум позволил современному человеку в суровых условиях ледникового периода, который окончательно отступил приблизительно 12000 лет назад, выйти из тяжелой ситуации, и не только освоить территорию Европы — колыбели современной цивилизации, но вытес-

¹ Научно-технический прогресс — это непрерывный процесс. Все новые открытия подготовлены предыдущими. Смена представлений происходит постепенно. Это при социальных революциях за одну ночь изменяются все общественные отношения. Так, что к термину «научная революция» следует относиться с определенной мерой условности.

нить (или уничтожить) неандертальцев¹, которые были гораздо лучше приспособлены к холодам. Потомки горстки людей основали и возвеличили культуру Древнего Египта, Древней Греции и Римской Империи. Их труд лежит в основе всех наших достижений.

Человек — единственный представитель животного мира, обладающий способностью к речи. Известно, что, например, многие птицы обладают способностью к звукоподражанию, но для способности к речи необходима вторая сигнальная система, которая свойственна только человеку. Вторая сигнальная система активизируется при воздействии речевых раздражителей. Она возникла в процессе эволюции, как результат совместного труда². Способность к обобщенному отражению предметов и явлений обеспечила человеку неограниченную возможность ориентации в окружающем мире и, в конце концов, позволила ему создать науку — вершину абстрактного мышления.

Развитие членораздельной речи вызвало дальнейшее совершенствование слуха; под влиянием речи слух человека приобрел значительно большую точность анализа именно речевых звуков.

Потребность в постоянном совершенствовании речи возникла у людей вполне естественно. Человек, для того чтобы эффективней использовать сознание, должен был научиться обмениваться результатами деятельности своего воображения. Развитие речи должно было происходить достаточно быстро (в масштабах эволюции жизни на Земле), поскольку тот, у кого эта способность была развита лучше, понял, что может привлечь к достижению своих целей других людей.

Сознание (воображение) давало возможность проиграть «в уме» несуществующие события. Тот, кто это делал лучше, был более успешным на охоте и не был раздавлен мамонтом. Именно такой человек начал подчинять себе других людей не столько физической силой, сколько силой своего интеллекта, а это прямой путь к возникновению общества и общественных отношений в современном их понимании. Отличительной особенностью человеческого общества является высокий уровень развития образования, достаточный для сохранения накопленного опыта путем последовательной передачи информации от поколения к поколению. Ничего подобного нет у других животных.

¹ Неандертальцы окончательно исчезли с лица Земли около 30000 лет назад. Генетический анализ показывает, что это была самостоятельная ветвь эволюции. Полагают, что одна из причин исчезновения связана с тем, что их голосовой аппарат был недостаточно совершенным и, как следствие, их речь была бедной.

² Характер взаимодействия первичной и вторичной сигнальных систем может варьироваться в зависимости от особенностей нервной системы (генетический фактор) и условий воспитания (социальный фактор). Одних людей отличает относительная слабость первичной системы — их непосредственные ощущения бледны и слабы (люди мыслительного типа). Другие, наоборот, воспринимают сигналы первичной системы ярко и сильно (художественный тип). Для полноценного развития личности необходимо своевременное и правильное развитие обеих сигнальных систем. Поэтому разделение учеников в средней школе на «гуманитариев» и «негуманитариев» порочно по самой своей сути!

Постепенно речь становилась все более богатой. Наконец в ней появились понятия, не имеющие прямого отношения к конкретным вещам и действиям. Восход солнца стал прекрасным, а сумрак ночи — ужасным и т. п. Появились предметы ритуалов и украшения (см. рис. 1.1). Процесс развития сознания ускорился. Вслед за этим человек начинает задумываться над вопросом своего бытия, а это прямой путь к возникновению науки.

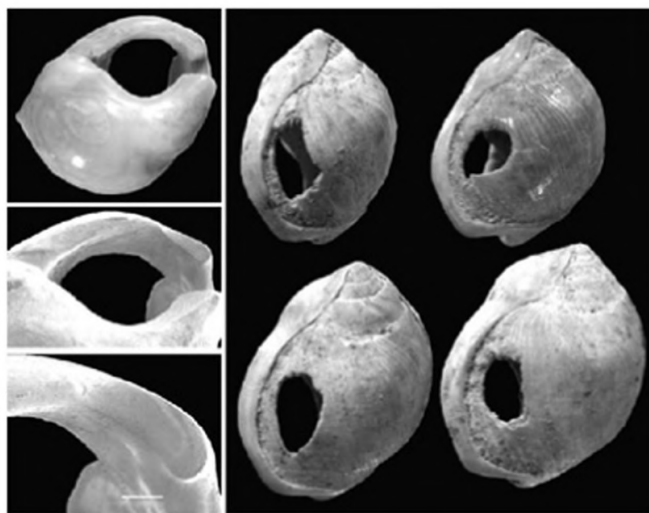


Рис. 1.1. Украшения из раковин (около 80 000 лет)

Вот так всего какую-то сотню тысяч лет назад появились первые информационные каналы (см. раздел 2). Это еще, конечно, не система телекоммуникации, но все-таки уже обмен информацией.

1.2. Возникновение письменности

Возникновение письменности связано, по-видимому, со стремлением человека выразить свои чувства и мысли в материальной форме и таким образом самоутвердиться как личность. Демонстрацией этого стремления является пещерная живопись — рисунки, выполненные людьми несколько десятков тысяч лет тому назад (см. рис. 1.2). Большинство подобных объектов найдено в Европе, так как именно там древние люди были вынуждены жить в пещерах и гротах, спасаясь от холодов. Возраст старейших рисунков оценивается в 36000 лет.

Первые формы письменности в виде особым образом начертанных знаков, отличных от стилизованных рисунков — пиктограмм, появилась примерно 6000 лет назад. Высшей формой такого письма стало иероглифическое письмо, которое впервые возникло в Древнем Египте (см. рис. 1.3). Именно поэтому мы теперь знаем, как жили тогда люди и зачем им понадобились пирамиды. Но к чисто фонетическому письму (т. е. такому, где каждый знак обозначает отдельный звук) древние египтяне так и не перешли. Это важное усовершенствование было сделано в письме других народов.

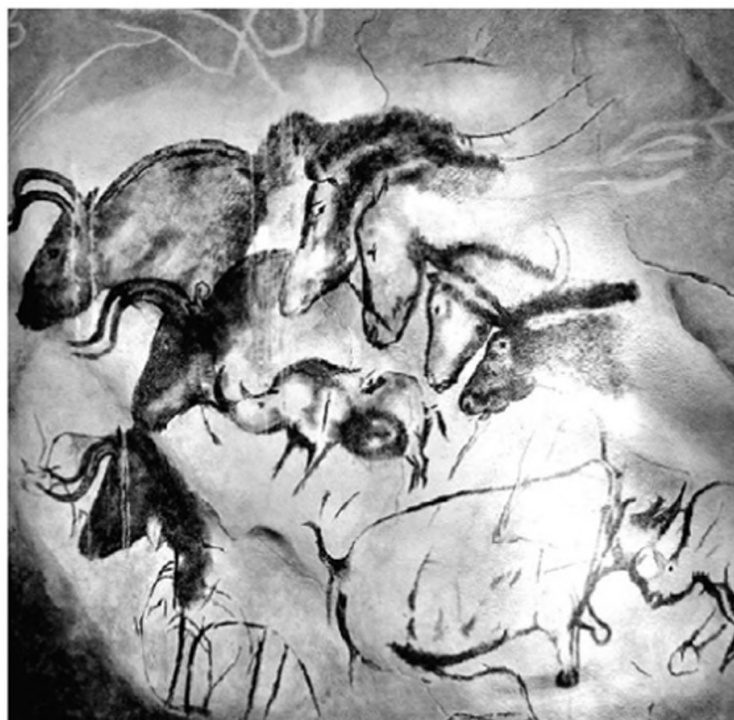


Рис. 1.2. Образец пещерной живописи



Рис. 1.3. Египетские иероглифы

Люди далеко не сразу научились раскладывать свою речь на простые элементы — звуки (*фонемы*). Гораздо легче речь делится на отдельные слоги. Поэтому около 4 тыс. лет назад сложилось несколько видов письма, в которых каждый знак обозначал отдельный слог. Это письмо называется *слоговым*; классические примеры его — критское (минойское) письмо и письмо майя. Только в конце 2-го тысячелетия до н. э. древние финикийцы создали *буквенно-звуковой алфавит*, который послужил образцом для алфавитов многих других народов (см. рис. 1.4).

С зарождением письменности информация стала передаваться в письменном виде, что положило начало почтовой связи. Вначале такая связь была эпизодической. С возникновением рабовладельческих государств, правители которых нуждались в постоянной информации о положении в собственной стране и на подвластных им территориях, почтовая связь стала приобретать упорядоченный характер. Постепенно она приобрела хорошо знакомый нам вид.

𐤀	ʾaleph	[ʾ]	𐤁	lamedh	[l]
𐤂	beth	[b]	𐤃	mem	[m]
𐤄	gimmel	[g]	𐤅	nun	[n]
𐤆	daleth	[d]	𐤇	samekh	[s]
𐤈	he	[h]	𐤉	ʿayin	[ʿ]
𐤊	waw	[w]	𐤋	pe	[p]
𐤌	zayin	[z]	𐤍	tsade	[ʃ]
𐤎	heth	[ħ]	𐤏	qoph	[q]
𐤐	teth	[t]	𐤑	reš	[r]
𐤒	yodh	[y]	𐤓	šin	[ʃ]
𐤔	kaph	[k]	𐤕	taw	[t]

Рис. 1.4. Финикийский алфавит:

изображение — слева, транскрипция — в центре, латинский алфавит — справа

Первые учреждения упорядоченной службы сообщений возникли достаточно рано в античные времена. Впервые почтовое сообщение появилось около 5000 лет назад в Месопотамии для передачи информации, запечатленной в виде глиняного письма. Не менее древней является почтовая связь в Египте.

В Греции почтовая система была достаточно хорошо налажена в виде сухопутной и морской почтовой связи, но она не могла значительно развиваться из-за множества воюющих между собой городов-государств.

Полагают, что в Римской республике постановка почтового дела была заимствована у персов. Г. Ю. Цезарь¹ заложил основы для создания собственно государственной почты.

Государственная почта в ее современном виде появилась в XVI—XVII вв. во Франции, Швеции, Англии и других европейских странах. Важной вехой в истории почтовой связи стал выпуск в 1840 г. в Великобритании первой почтовой марки, как единого средства оплаты почтовых услуг (см. рис. 1.5).

Теперь невозможно представить себе жизнь без книг, газет, почты, разнообразных указателей, интернета и т. п. Появление письменности стало одним из самых важных открытий на долгом пути эволюции человечества. По значимости этот шаг можно сравнить с добытанием огня или с переходом к выращиванию растений вместо долгой поры

¹ Гай Юлий Цезарь (лат. *Gaius Iulius Caesar*, 100—44 до н. э.) — древнеримский государственный и политический деятель, полководец, писатель. Консул 59, 48, 46, 45 и 44 гг. до н. э., диктатор 49, 48—47 и 46—44 гг. до н. э., великий понтифик с 63 г. до н. э.

собиранья. Письменность является неотъемлемой частью культуры человеческого сообщества. Она формирует единое информационное поле, которое не имеет границ ни во времени, ни в пространстве.



Рис. 1.5. Первая в мире почтовая марка

1.3. Изобретение книгопечатания

Книгопечатание позволило перейти к широкому использованию письменности как средства общения. Идею печатания книг, скорее всего, подали штампы, которые использовались для нанесения рисунков на ткань.

Уже в XIII в. широкое распространение получила техника гравюр. От гравюр оставался только шаг до производства книг. Первоначально тиражи книг были малы, так как каждую страницу надо было вырезать на доске из твердого дерева. Впервые идею наборного шрифта воплотил в жизнь И. Гутенберг¹. Начиная с 1448 года, он всецело посвятил себя книгопечатанию.

И. Гутенберг тщательно скрывал суть своего изобретения. Можно только предполагать, как он пришел к своему изобретению и как он его совершенствовал. По-видимому, начав с вырезания отдельных деревянных букв и набора из них страниц, он, в конце концов, пришел к отливке литер, строк и страниц из свинца.

На рис. 1.6 показан экземпляр библии, выпущенный И. Гутенбергом в первой половине 50-х годов XV века. Эта дата традиционно считается точкой отсчета истории книгопечатания в Европе. Хотя это не первая инкунабула (от лат. *incunabula* — «колыбель», «начало»), но среди других первопечатных изданий ее выделяет исключительное высокое качество оформления. На рис. 1.7 показана наборная касса И. Гутенберга со шрифтами.

¹ Иоганн Генсфляйш цур Ладен цум Гутенберг (нем. *Johannes Gensfleisch zur Laden zum Gutenberg*, между 1397 и 1400—1468) — немецкий первопечатник. Так как дату рождения нельзя было установить точно, общество Гутенберга в конце XIX в. решило принять за нее 1400 год, чтобы праздновать его 500-й день рождения в 1900 году.

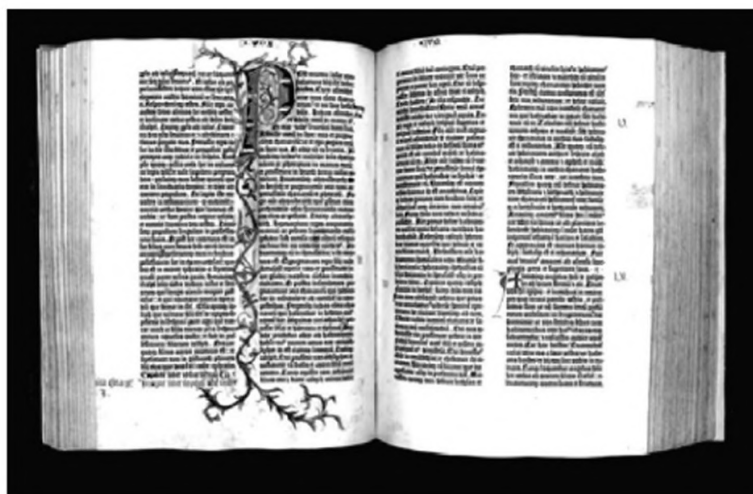


Рис. 1.6. Экземпляр Библии, изданный И. Гутенбергом



Рис. 1.7. Дошедшая до наших дней касса с литерами

Так кропотливое изготовление рукописи уступило место высокопроизводительному типографскому процессу. Уже к концу XV в. по всей Европе было выпущено около 30 тысяч наименований книг. Стараясь сделать свои издания более привлекательными, мастера снабжали книги иллюстрациями — сначала черно-белыми, а потом и цветными.

Способ печати цветных иллюстраций довел до совершенства Уго да Карпи¹. В 1516 г. он получил патент на новую технику изготовления гравюр, которую он назвал «кьяроскуро» (итал. *chiaro e scuro*, «свет и тень»).

Суть его изобретения состояла в разложении изображения на картине на несколько цветов (обычно 3—4). Для каждого цвета он делал отдельную доску и вырезал на ней только те места, которые должны были отпечатываться на бумаге одним цветом. Сначала на листе печатался контур, а затем места одного цвета, потом — следующего и т. д.

¹ Уго да Карпи (итал. *Ugo da Carpi*, ок. 1455 — ок. 1523) — итальянский художник-гравёр венецианской школы.

Сам У. Карпи был прекрасным копировальщиком и напечатал своим методом копии многих картин.

Однако повседневный обмен информацией между членами общества по-прежнему осуществлялся посредством доставки писем слугами или курьерами. Процесс удалось несколько ускорить организацией лет 400 назад регулярной, общедоступной почты. И все же письма доставлялись медленно.

1.4. Оптический телеграф

Оптический способ передачи информации известен с незапамятных времен. Сигнальными кострами пользовались первобытные племена. Известно, что в древнем Китае дымовые сигналы использовались в военных целях. Однако удобный, быстрый и надежный оптический телеграф появился во Франции только в конце XVIII в. и исправно работал более 50-ти лет.

В 1780 г. Клод Шапп¹ предложил вполне пригодную для практического использования систему передачи сообщений, и, что еще более важно, добился ее широкого применения. Проект был им представлен в 1792 г. национальному конвенту и был одобрен во многом благодаря влиянию его брата И. Шаппа².

В оптическом телеграфе используются семафоры, установленные на башнях вдоль линии связи. Первая линия, соединившая Париж и Лилль, имела протяженность 225 км. Передача сигнала (одного символа) занимала 2 мин. Именно при создании семафорных линий появился термин телеграф³.

Деятельность братьев Шапп была успешной. Семафорные линии связи покрыли всю Францию. Для работы в ночное время использовались фонари. Общая протяженность линий составляла около 4800 км и обслуживалась 556 станциями. По существу эта была первая система телекоммуникации.

Вскоре семафорные линии связи получили распространение по всей Европе. Самая длинная линия была построена между Петербургом и Варшавой (1200 км). Она была введена в строй в 1839 году. На трассе было расположено 149 промежуточных станций с башнями высотой около 16 м. В системе использовались семафоры с отражающими зеркалами и светильниками. Линию обслуживало почти 2000 человек. Передача 45 условных сигналов из Петербурга в Варшаву при ясной погоде занимала 22 минуты.

¹ Клод Шапп (фр. *Claude Chappe*; 1763—1805) — французский механик, изобретатель.

² Игнас Шапп (фр. *Ignace Chappe*, 1760—1829) — видный общественный деятель Французской революции.

³ К. Шапп первоначально назвал свое изобретение «*tachygraph*» (англ. редкое, — скоропись), однако друзья посоветовали назвать средство для письма на расстоянии «*telegraph*» — телеграфом.

На рис. 1.8 показана гравюра с изображением семафора на башне королевского дворца в Лувре, и сохранившаяся до наших дней башня оптического телеграфа в Германии.

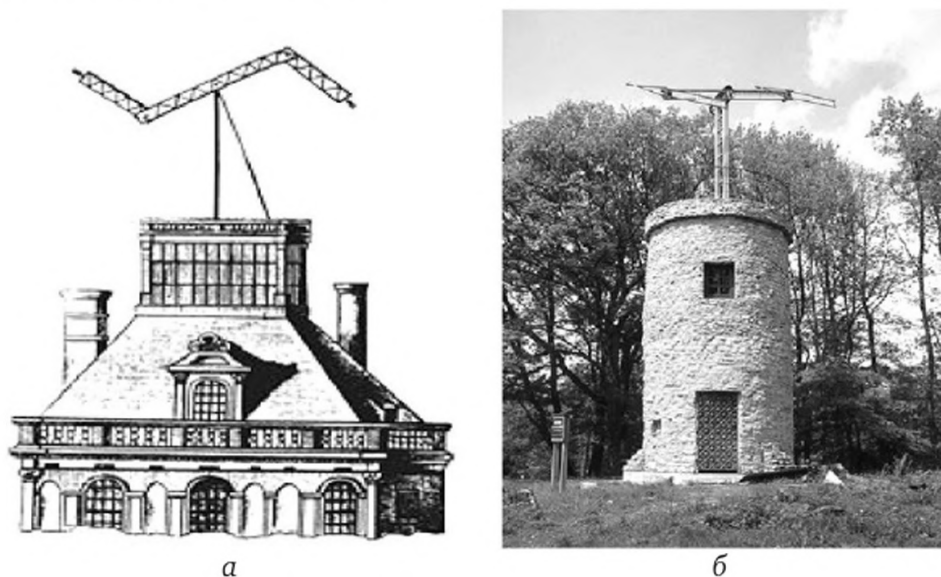


Рис. 1.8. Оптический телеграф:

а — семафорная башня на королевском замке в Лувре (Франция),
б — в Литермонте (Германия)

Линией российского оптического телеграфа могли пользоваться простые граждане. Можно было послать «оптическую» телеграмму в Гатчину или Вильно (ныне Вильнюс) — их принимали в башне Городской думы. Но стоило это довольно дорого, и популярности у горожан такой вид связи не получил. К тому же, он сильно зависел от погоды.

После смерти брата И. Шапп был главным директором французских телеграфов. В 1824 г. он попытался организовать платную связь. Однако затея успеха не имела.

В 1846 г. правительство Франции вложило средства в несколько линий электрического телеграфа. С появлением этого вида связи телеграф К. Шаппа тихо умер. В 1860 г. в Алжире последняя семафорная система прекратила свою работу. Однако отечество не забыло изобретателя и в 1893 г. ему был сооружен памятник на бульваре Сен-Жермен.

И все же оптический телеграф полностью не исчез. Уже с начала XIX в. семафор начал широко использоваться для связи в морском флоте. Сообщения передавались при помощи взмахов флажками¹. В конце XIX — начале XX веков, с появлением на кораблях автономных электростанций, в оптическом семафоре стали использоваться электрические

¹ В конце 50-х гг. XIX в. американский военный врач **Альберт Майер** (1829-1880) стандартизировал азбуку семафора. Широко используемая во время гражданской войны США флажковая система Майера привела к появлению нового рода войск — войск связи. В России морскую семафорную азбуку разработал в 1895 г. вице-адмирал Степан Осипович Макаров (1849—1904) — русский флотоводец, океанограф, полярный исследователь, кораблестроитель.

светильники. Это привело к появлению специальной световой азбуки. Оптический семафор (светофор) используется на флоте до сих пор.

В конце XIX в семафоры появились и на железной дороге. Железнодорожная семафорная азбука поначалу не отличалась особой сложностью. Однако, с годами необходимость в ней увеличивалась, что привело к разработке собственной системы условных световых сигналов и, в конце концов, созданию железнодорожного светофора. С развитием автомобильного движения светофоры стали использоваться для организации уличного движения.

И все же оптический телеграф был подвержен действию атмосферных условий, да и скорость не удовлетворяла пользователей. Кроме того, нельзя было обеспечить скрытность передачи.

1.5. Электрический телеграф

В 1832 г. П. Л. Шиллинг¹ решил многие проблемы, создав первый в мире электромагнитный телеграфный аппарат. В 1835 году П. Л. Шиллинг демонстрировал свой телеграф на съезде естествоиспытателей в Бонне. Передающий аппарат П. Л. Шиллинга состояла из клавиатуры с 8 клавишами, служившими ключами для замыкания электрической цепи. Приемный аппарат состоял из 6 гальванометров с магнитными стрелками, подвешенными на шелковых нитях к медным стойкам. На нитях выше стрелок были закреплены бумажные флажки, одна сторона которых была окрашена в белый цвет, а другая — в черный. Приемный аппарат П. Л. Шиллинга показан на рис. 1.9.

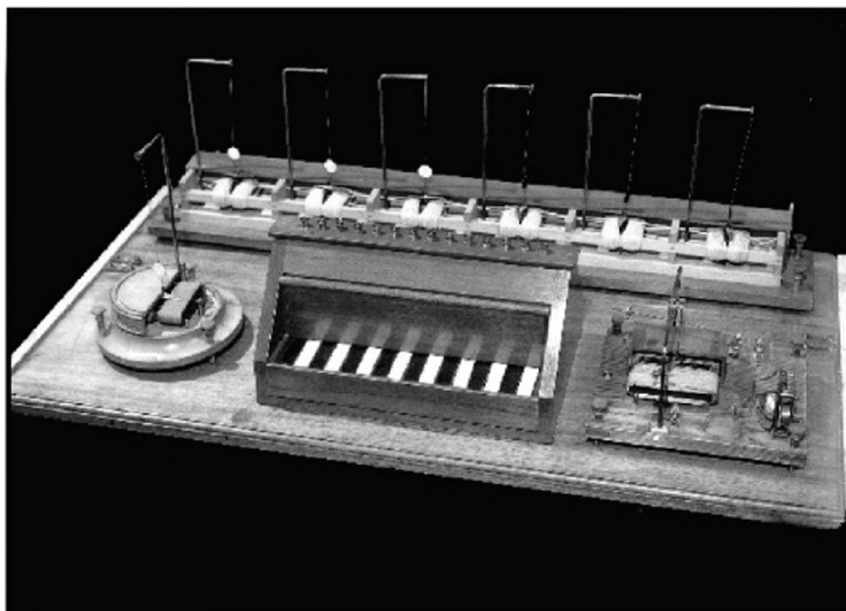


Рис. 1.9. Один из первых телеграфных аппаратов П. Л. Шиллинга

¹ Павел Львович Шиллинг (Шиллинг фон Каннштадт, *Schilling von Cannstatt*, 1786—1837) — русский дипломат, историк-востоковед и изобретатель-электротехник. Балтийский немец по происхождению барон фон Шиллинг.

Станции телеграфа П. Л. Шиллинга были соединены восемью проводами: один из них был общим, шесть соединялись с гальванометрами, и один — с устройством вызова (электрическим звонком).

Когда на передающей станции нажимали клавишу, на приемной станции отклонялась соответствующая стрелка. Различные положения черных и белых флажков давали условные сочетания, соответствовавшие буквам алфавита или цифрам. Таким образом, по сути П. Л. Шиллинг разработал и использовал равномерный шестиразрядный двоичный код.

В 1835—1836 года П. Л. Шиллинг усовершенствовал свой аппарат, причем 36 различных отклонений его единственной магнитной стрелки соответствовали 36 условным сигналам. Позже к своему аппарату П. Л. Шиллинг приспособил появившуюся тогда клавиатуру.

Первые линии телеграфной связи в 1832—1837 гг. сначала соединили между собой помещения Зимнего дворца, затем Зимний дворец с Адмиралтейством и Петергоф с Кронштадтом.

В 1835 году П. Л. Шиллинг участвовал в работе съезда «Общества немецких естествоиспытателей и врачей» в Берлине, где демонстрировал свое изобретение. В 1836 г. правительство Великобритании обратилось к нему с предложением о продаже изобретения, на которое П. Л. Шиллинг ответил отказом.

Значительный вклад в развитие телеграфа внес С. Морзе¹. В 1837 г. он создал телеграфный код, который получил широкое распространение, и аппаратуру для его передачи и приема.

Однако первоначально С. Морзе не находил поддержки ни дома в США, ни в Великобритании, ни во Франции, ни в России. Встречая везде отказ, мужественно перенося бедность и разочарования от неудач, он продолжал добиваться признания.

При очередной попытке заинтересовать Конгресс США созданием телеграфных линий он приобрел в партнеры конгрессмена. Поэтому в 1843 г. С. Морзе получил субсидию в 30000 долларов для строительства первой телеграфной линии от Балтимора до Вашингтона протяженностью 40 км.

В ходе работ оказалось, что электрический сигнал слишком сильно затухал и прямая связь невозможна. Положение спас его компаньон А. Вейль², предложивший использовать электромагнитное реле как усилитель. Наконец, линия была закончена, и 24 мая 1844 г. была послана первая депеша между Вашингтоном и Балтимором по спо-

¹ **Сэмюэл Финли Бриз Морзе** (англ. *Samuel Finley Breese Morse*; 1791—1872) — американский изобретатель и художник. Наиболее известное изобретение — электромагнитный пишущий телеграф. Бронзовая статуя С. Морзе была установлена 10 июня 1871 г. в центральном парке Нью-Йорка, а в 1896 г. его портрет украшал двухдолларовую купюру. Его имя присвоено кратеру на обратной стороне Луны.

² **Альфред Вейл** (англ. *Alfred Vail*, 1807—1859) — американский изобретатель и бизнесмен, в 1837—1844 гг. вместе с С. Морзе разработал и коммерциализировал электрический телеграф.

сору С. Морзе с текстом «Чудны дела твои, Господи». Однако С. Морзе был тотчас же вовлечен в юридические распри и с партнерами, и с конкурентами. Он отчаянно боролся и, наконец, в 1854 г. Верховный Суд признал его авторские права на телеграф.

Газеты, железные дороги и банки быстро нашли применение телеграфу. Телеграфные линии моментально оплели весь мир, состояние и слава С. Морзе множились.

Телеграфный аппарат С. Морзе хранится в Национальном Музее США. На рис. 1.10 показан прототип аппарата, демонстрирующий работу с его кодом.

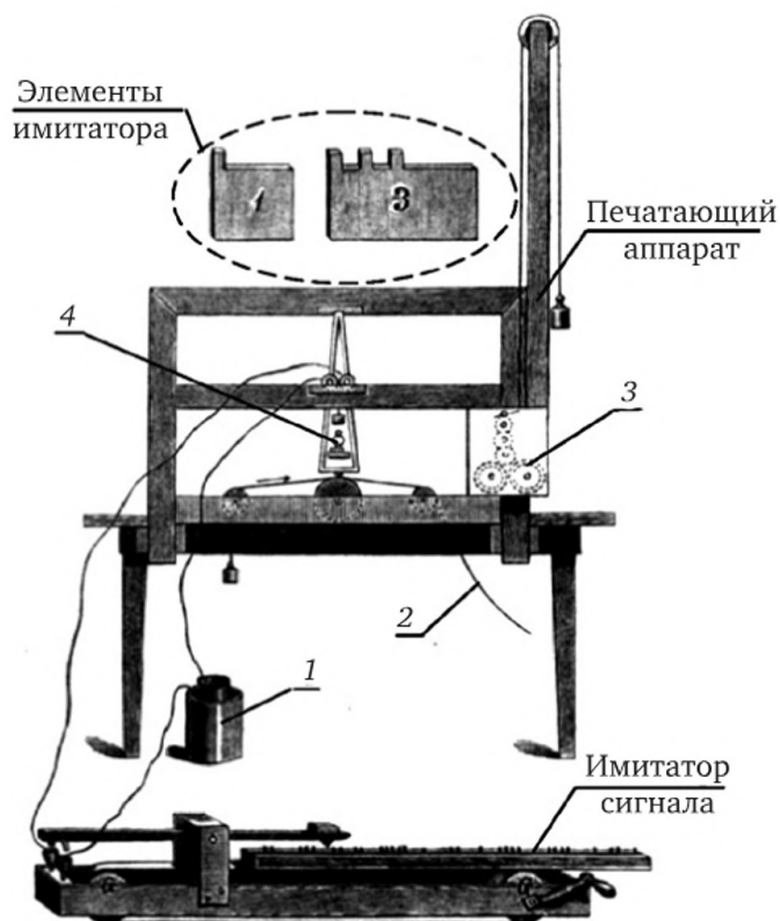


Рис. 1.10. Прототип аппарата С. Морзе:

1 — элемент питания, 2 — бумажная лента, 3 — редуктор лентопротяжного механизма (приводной ремень не показан), 4 — пишущий узел с электромагнитным приводом

При демонстрации в 1835 г. опытов П. Л. Шиллинга присутствовал В. Кук¹. В 1837 г. он несколько усовершенствовал аппарат П. Л. Шиллинга. В аппарате В. Кука стрелка при каждом отклонении указывала на ту или иную букву, изображенную на циферблате. Из этих букв складывались слова и целые фразы.

¹ Вильям Ф. Кук (англ. *Sir William Fothergill Cooke*, 1806—1879) — английский изобретатель.

Оператор на передающем конце выставлял стрелку на определенную букву. При этом в линию связи передавались электрические импульсы, число которых было однозначно связано с положением буквы на циферблате. На приемном конце, на таком же циферблате, вращающаяся стрелка останавливалась у той же буквы.

В 1838 г. Ч. Уитстон¹ и В. Кук запатентовали 2-х стрелочный телеграф. Следующим усовершенствованием стал однострелочный телеграф (1845 г.) на основе принципа, который предложил К. А. Штейнгейль².

Удачные решения были предложены Б. С. Якоби.³ Используя электромагнит, он также создал стрелочный телеграф. С 1840 г по 1850 г. Б. С. Якоби разработал 9 моделей такого аппарата. Аппараты Б. С. Якоби и В. Кука показаны на рис. 1.11.

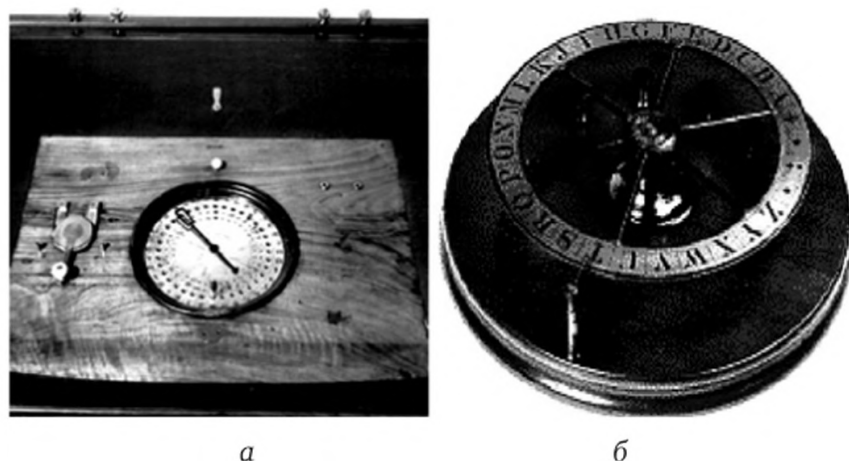


Рис. 1.11. Стрелочные телеграфы Б. С. Якоби (а) и В. Кука (б)

Однако наиболее удачное решение предложил Д. Хьюз⁴, который в 1855 г. запатентовал буквопечатающий телеграф. В его аппарате была клавиатура с изображениями букв и электромеханическая печатная машинка, которая воспроизводила текст на бумаге. Аппарат получил широкое распространение. С 1857 г. он начал широко использоваться в Европе. Так что привычным сейчас клавиатуре и принтеру уже более 150 лет!

Аппаратуру Д. Хьюза усовершенствовал Ж. Бодо⁵. Он изобрел код для телеграфной связи, в котором каждая буква кодировалась двоич-

¹ **Чарльз Уитстон** (англ. *Sir Charles Wheatstone*; 1802—1875) — английский физик, автор многих изобретений.

² **Карл Август Штейнгейль** (нем. *Carl August von Steinheil*, 1801—1870) — профессор в Мюнхене. Изобрел и усовершенствовал множество астрономических и геодезических приборов.

³ **Мориц Герман Якоби** (рус. Борис Семёнович Якоби; нем. *Moritz Hermann von Jacobi*; 1801—1874) — немецкий и русский физик-изобретатель. В 1837 г. принял русское подданство. Академик Петербургской Академии Наук (1847).

⁴ **Дэвид Эдвард Хьюз** (англ. *David Edward Hughes*, 1831—1900) — известный английский и американский физик и изобретатель.

⁵ **Жан Морис Эмиль Бодо** (фр. *Jean-Maurice-Emile Baudot*, 1845—1903) — французский инженер и изобретатель.

ным числом фиксированной длины, равной пяти символам. Кроме того, Э. Бодо предложил (1894 г.) систему для одновременной передачи нескольких сообщений по одному телеграфному каналу (*мультиплексирование*). Так был сделан первый шаг к уплотнению каналов связи. Аппарат Э. Бодо стал самым значимым достижением техники передачи информации на расстояние в XIX веке. В честь него единица скорости передачи информации названа «бодом».

Аппараты Бодо (Бодэ) исправно работали до 70-х годов XX века. На рис. 1.12 показан образец аппарата для приема телеграмм 40-х гг. XX века.



Рис. 1.12. Приемник буквопечатающего аппарата 40-х годов XX века (СССР)

Такие аппараты стояли во всех отделениях связи. В отделениях принимали тексты телеграмм для отправки адресату. Текст на другом конце линии связи печатался на бумажной ленте, приклеивался на стандартный бланк или праздничную открытку. В таком виде телеграммы доставлялись почтальонами или курьерами на квартиры ваших бабушек и прабабушек. Срок доставки определялся статусом отправления и мог колебаться от десятков минут до нескольких часов.

Успехи, достигнутые в создании телеграфа, позволили осуществить смелый по тем временам проект по прокладке трансатлантического кабеля. В 1866 г. с седьмой попытки телеграфная связь между Европой и Америкой была установлена.

1.6. Создание телефона

Создание телефона является результатом работы, проделанной многими людьми. Ранняя история телефона — это запутанное дело с огромным количеством претензий с разных сторон, массой судебных процессов и даже грязных склок.

Среди людей так или иначе причастных к появлению телефона были А. Меуччи¹, И Рейс², А. Белл³, Э. Грей⁴ и ряд других. Всем им приписывали изобретение этого аппарата.

Документально подтверждено, что одно из первых успешно работающих электрических устройств, которое могло по проводам передавать музыкальные тона и разборчивую речь, появилось в Германии. В 1861 г. его создал И. Рейс. Аппарат имел устройство для преобразования звука в электрический ток (микрофон) оригинальной конструкции, источник питания и устройство для воспроизведения звука (телефон). И. Рейс назвал сконструированное им устройство «*Telephon*».

В том же году в США А. Меуччи продемонстрировал другое устройство, которое также могло передавать звуки по проводам, которое он назвал «*Teletophon*».

Усовершенствованием телефонных устройств занималось множество изобретателей. К 1900 г. в этой области было выдано более 3-х тысяч патентов.

Однако в историю вошел только А. Белл. Он 14 февраля 1876 года, опередив своего конкурента Э. Грея, первым запатентовал «метод и аппаратуру для передачи голоса и других звуков с помощью электрических колебаний, совпадающих по форме с колебаниями воздуха»⁵ (см рис. 1.13). К тому же патент А. Белла оказался более перспективным и коммерчески выгодным. Этот патент стал одним из самых доходных патентов из патентов, когда-либо выданных в США.

А. Белл, организовав «Общество телефона Белла», начал упорную работу по усовершенствованию своего детища. Уже через год он запатентовал новую мембрану для микрофона и арматуру для телефона. Затем применил для увеличения расстояния передачи угольный микрофон и питание от батарей. В таком виде телефон благополучно просуществовал более ста лет.

Первоначально телефоном можно было пользоваться только по очереди — пара проводов была одна, а сам телефон выглядел как коробка с отверстием посередине, к которому по очереди прикладывали то ухо, то губы. В телефоне А. Белла не было звонка. Вызов абонента производился через трубку при помощи свистка. Дальность действия первых линий не превышала 500 метров. В 1877 г. для вызова абонента был

¹ **Антонио Меуччи** (итал. *Antonio Meucci*; 1808—1889) — итальянский ученый, являющийся подлинным изобретателем телефона.

² **Иоганн Филипп Рейс** (нем. *Johann Philipp Reis*; 1834—1874) — немецкий физик и изобретатель.

³ **Александр Грейам Белл** (англ. *Alexander Graham Bell*; 1847—1922) — ученый, изобретатель и бизнесмен шотландского происхождения, основатель компании «*Bell Labs*».

⁴ **Элиша Грей** (англ. *Elisha Gray*, 1835—1901) — американский инженер-электрик. Известен разработкой в 1876 г. прототипа телефона.

⁵ UNITED STATES PATENT OFFICE. Alexander Graham Bell, of Salem, Massachusetts. Improvement in telegraphy. Specification forming part of Letters Patent №. 174.465, dated March 7, 1876; application filed February 14, 1876.

применен телеграфный ключ, который замыкал цепь звонка (позднее ключ был заменен кнопкой).



Рис. 1.13. А. Белл с прототипом телефона

Первые телефоны выдавали в аренду парами. Пользователи должны были сами заказать и оплатить прокладку провода между своими домами. Каждая линия связывала только двух абонентов. Для того чтобы позвонить кому-нибудь третьему, приходилось брать в аренду еще пару аппаратов и прокладывать еще одну линию.

Первый угольный микрофон создал Э. Берлинер¹. Однако, развитие получил микрофон Д. Хьюза (см. рис. 1.14, а). В 1877-1878 годах Т. Эдисон² занимался усовершенствованием микрофона Д. Хьюза. В конце концов, он заменил угольный стержень угольным порошком. Микрофон с угольным порошком практически без изменений использовался вплоть до 80 гг. XX в. (см. рис. 1.14, б).

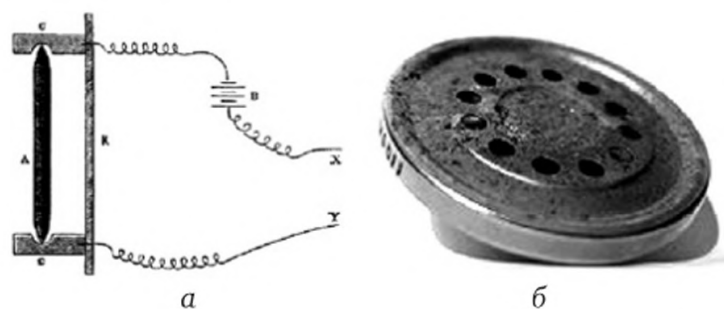


Рис. 1.14. Микрофон Д. Хьюза (а) и угольный порошковый микрофон (б)

¹ Эмиль Берлинер (англ. *Emil Berliner*, 1851—1929) — американский изобретатель немецкого происхождения. В 1887 г. запатентовал граммофон.

² Томас Альва Эдисон (англ. *Thomas Alva Edison*; 1847—1931) — американский изобретатель и предприниматель. Эдисон получил в США 1093 патента и около 3-х тысяч в других странах мира. Он изобрел фонограф. Именно он предложил использовать в начале телефонного разговора слово «алло» (англ. *Hallo* — привет:). С 1930 г. иностранный почетный член АН СССР.

Были удачные разработки и российских инженеров. К сожалению, Россия очень часто недооценивает собственных изобретателей. Это произошло и с П. М. Голубицким¹, который в 1883 г. создал многополюсный телефон. В его конструкции мембрана телефона совершала колебания под действием пары электромагнитов вместо одного. Во Франции эта конструкция успешно выдерживала испытания при передаче разговора на расстояния, превышающие 350 км, и П. М. Голубицкий получил извещение о том, что комиссия французского морского министерства признала его телефоны самыми совершенными.

В 1887 г. П. М. Голубицкий получает патент на систему централизованного питания телефонных сетей. Его идея заключается в питании микрофонов абонентов от общей электрической батареи, находящейся на местной телефонной станции, а не в самих телефонных аппаратах. Новый подход позволил создавать крупные телефонные сети городов. Этот принцип применяется по сей день.

Попытки внедрения этой системы в России оставались в течение двух лет безуспешными. В результате П. М. Голубицкий передал право на эксплуатацию своей системы Всеобщей телефонной компании в Париже.

Талантливый изобретатель разработал и другие конструкции телефонов; в частности, именно он впервые в мире придумал телефонную трубку и рычаг-переключатель, на который ее нужно вешать. Можно также отметить микрофон с угольным порошком, сконструированный русскими инженерами М. Махальским (1878 г.), и независимо от него П. М. Голубицким (1883 г.). В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг² и С. М. Бердичевский-Апостолов получают английский патент на АТС с предыскателем. Это позволило увеличить число абонентов, не увеличивая числа шаговых искателей. Макет АТС такой системы прошел успешные испытания в Париже в 1898 году.

А. Белл был разносторонним и талантливым человеком. Чем только не занимался он в своей жизни, в том числе авиацией, гидродинамикой и даже разведением овец. Походя, А. Белл за два года до Т. Эдисона даже изобрел фонограф, но на этот раз не заметил нового изобретения. Он сконструировал аппарат, в котором колеблющаяся от звука мембрана была соединена с иглой, оставляющей след на вращающемся барабане. Ему всего-то оставалось прокрутить барабан с записью и прослушать ее на той же мембране. Увы, Белл был поглощен только регистрацией звука и прошел мимо еще одной грандиозной удачи.

Утром 4 августа 1922 г. в США и Канаде на минуту были выключены все телефоны. Мир прощался с Александром Грехамом Беллом. В этот день 13 миллионов телефонных аппаратов тысяч всевозможных видов и конструкций смолкли в честь великого изобретателя.

¹ Павел Михайлович Голубицкий (1845—1911) — русский изобретатель в области телефонии, общественный деятель.

² Моисей Филиппович (Михаил Фёдорович) Фрейденберг (1858—1920) — российский изобретатель, воздухоплаватель, журналист, издатель, фельетонист.

И все же 11 июня 2002 г. Конгресс США, рассмотрев материалы дела, принял резолюцию № 269, в которой признал настоящим изобретателем телефона А. Меуччи. Конгрессмены приняли во внимание, что он в 1871 г. подал заявку и получил патент № 3335. Однако в 1874 г из-за финансовых затруднений не смог возобновить его действие. Многие не согласились с этим решением. Резолюция Конгресса США 10 дней спустя стала предметом обсуждения правительства Канады, которое приняло единодушное решение считать изобретателем телефона А. Белла.

Первый коммерческий телефонный разговор между Нью-Йорком и Лондоном произошел 7 января 1927 г. по трансатлантическому телефонному кабелю.

Первыми «телефонистками» на станциях были вовсе не барышни, а юноши. Но работа требовала усидчивости и изрядного терпения. В 1878 г. Бостонская телефонная компания решила принять на испытательный срок первую женщину. И вскоре вся отрасль полностью перешла на женский труд. Общий вид одной из первых телефонных станций показан на рис. 1.15.

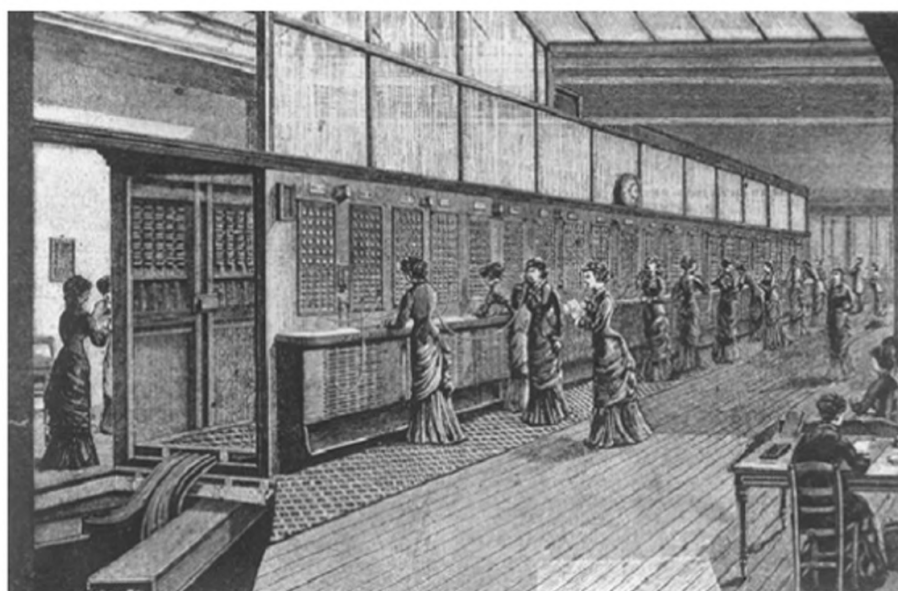


Рис. 1.15. Коммутаторный зал телефонной станции 1882 года

Требования при приеме на работу предъявляли невероятные. Претендентка должна была быть не замужем (попытка устроить личное счастье заканчивалась увольнением), 17—26 лет от роду, иметь рост не менее 175 см, и широкий размах рук. В России барышня к тому же должна была быть дворянского происхождения.

Рабочий день телефонисток продолжался 10—11 часов, трудились они по шесть дней в неделю. За час барышне приходилось обслуживать до 600 звонков. Платили девушкам за эту тяжелую работу 7 долларов в неделю¹.

¹ Покупательная способность доллара упала к настоящему моменту раз в 30.

В 1889 году А. Строуджер¹, возмущенный утечкой своей коммерческой информации через телефонные станции, создал автоматический коммутационный узел — автоматическую телефонную станцию (АТС). Для продвижения изобретения на рынок он основал (1891 г.) компанию «Strowger Automatic Exchange» (с 1901 г. — «Automatic Electric Co.», позднее «General Telephone and Electronics»). Первая автоматическая система была запущена в коммерческое использование в Ла-Порте (штат Индиана) в 1892 г. Система позволяла соединяться с 99-ю абонентами.

Первоначально нужный абонент выбирался набором комбинации из трех кнопок. В дальнейшем были предложены различные усовершенствования, в том числе аппараты с дисковым номеронабирателем (см. рис. 1.16, а).



а



б

Рис. 1.16. Телефонные аппараты:

а — А. Строуджера с дисковым номеронабирателем (1905 г.), б — один из первых аппаратов с тональным набором XX века

Первая модель настольного аппарата с дисковым номеронабирателем появилась в 1901 году, в 1902 г. — аппарат с дисковым номеронабирателем с отверстиями, а в 1905 г. — отверстия, стали занимать большую часть периметра диска. Последняя модель увидела свет в 1907 году. После 1914 г. патент А. Строуджера утратил силу, и больше имя изобретателя не упоминалось.

Начиная с 1922 года, дисковый принцип набора номера получил широкое распространение. Он оставался стандартным методом вызова в телефонии до появления тонального набора (1961 г.). На рис. 1.16, б показан аппарат с тональным набором образца 70-х гг. XX века.

¹ Элмон Браун Строуджер (англ. Almon Brown Strowger, 1839—1902) — американский бизнесмен из города Канзас-Сити (штат Миссури), запатентовал первую в мире автоматическую телефонную станцию, чем заслужил титул «Отца всех АТС».

1.7. Изобретение радио

Открытие радио связано с именами многих ученых и инженеров. В 90-х годах XIX в. термин «радио» как средство связи еще не применялся. Использовались другие, в частности «беспроволочная телеграфия», «сигнализация без проводов» и т. п. Термин «радио», следует рассматривать как сокращенный аналог исходных терминов. В Большой Советской Энциклопедии приводятся следующие значения понятия радио:

- 1) способ беспроводной передачи сообщений;
- 2) область науки и техники, связанная с изучением физических явлений, лежащих в основе этого способа, и его практическим использованием.

С этим определением можно согласиться. Однако следует сделать следующее дополнение. Понятием радио охватывается не только область науки, связанную с изучением физических явлений (*радиофизика*), но и область технической науки (*радиотехника*), изучающей структуру и функции соответствующих устройств.

Радиофизика является одновременно областью физики. Эта наука окончательно оформилась в самостоятельную область знаний в 30-х годах XX века. Первоначально она включала *теорию колебаний и волн, физическую электронику и электродинамику*. Однако круг рассматриваемых вопросов постоянно расширяется. Радиофизика не ограничивается решением только фундаментальных проблем, но активно способствует развитию радиотехники. Поэтому четкой границы между радиофизикой и радиотехникой не существует. Недаром к созданию первого квантового генератора, а затем и лазеров, были причастны и радиофизики, и радиоинженеры, и специалисты по электронике.

На настоящем этапе развития радиосистем очень часто электромагнитные волны передаются по специальным кабельным линиям и волноводам. С начала 70-х годов XX века в качестве носителя информации используется когерентный свет, распространяющийся по стеклянному волокну. Поэтому теперь будет правильным понимать под термином «радио» передачу информации на расстояние с помощью электромагнитных волн относительно высоких частот. Хотя слово «относительно» имеет весьма расплывчатый смысл.

Со середины XX века в радиоаппаратуре начинают использовать полупроводниковые микросхемы, которые выполняют сразу несколько функций. Создание таких микросхем требует объединения усилий, как радиоинженеров, так и специалистов в области электроники. Поэтому, пожалуй, теперь более уместно использовать вместо термина радиотехника термин «*радиоэлектроника*».

В 70-х годах XX века в радиосвязи начинают использовать цифровые технологии. Характер передаваемой информации резко расширяется. Он уже не ограничивается только передачей речи и изображения. Аппаратура современной системы радиосвязи становится похожей

на специализированную ЭВМ, а сама эта система — на распределенную компьютерную сеть. Поэтому к настоящему моменту практически невозможно установить границу между радиотехникой и информатикой. Можно, пожалуй, сказать, что радиотехника занимается созданием специализированных вычислительных машин и сетей. Далее вы узнаете, что первоначально и ЭВМ задумывались, и разрабатывались, в частности, как средства обслуживания радиотехнических комплексов, а в их создании принимали участие радиоинженеры.

Отправной точкой появления радио можно считать 1845 год, когда М. Фарадей¹ ввел понятие электромагнитного поля. По мнению Альберта Эйнштейна, идея поля была самым важным научным открытием со времен И. Ньютона. До этого пространство считалось наполненным телами и зарядами, через которые передавалось воздействие. А поле — это пустота, которая, тем не менее, может обеспечивать взаимодействие на расстоянии.

В 1873 г. Дж. Максвелл² опубликовал работу под названием «Трактат об электричестве и магнетизме», в которой изложил, созданную им теорию электромагнитного поля. Все основные закономерности этого явления теперь принято записывать в виде четырех уравнений, которые называют уравнениями Максвелла³. Главный вывод теории — предсказание свободного распространения электромагнитного поля в пространстве со скоростью света. В 1886—1887 годах Г. Герц⁴ провел эксперименты, которые подтвердили теорию Максвелла. Схема экспериментального оборудования Г. Герца показана на рис. 1.17.

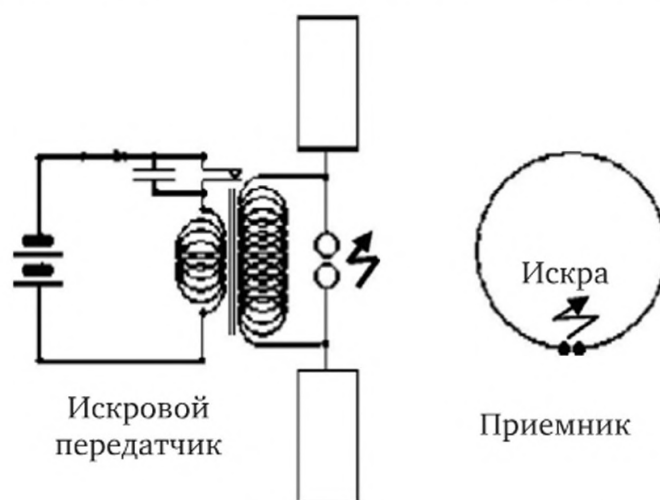


Рис. 1.17. Схема эксперимента Г. Герца

¹ Майкл Фарадей (англ. *Michael Faraday*, 1791—1867) — английский физик-экспериментатор и химик. Член Лондонского королевского общества (1824) и почетный член Петербургской академии наук (1830).

² Джеймс Клерк Максвелл (англ. *James Clerk Maxwell*; 1831—1879) — британский физик, математик и механик. Член Лондонского королевского общества.

³ Современная форма уравнений Максвелла появилась около 1884 г. после работ О. Хевисайда, Г. Герца и Дж. Гиббса.

⁴ Генрих Рудольф Герц (нем. *Heinrich Rudolf Hertz*; 1857—1894) — немецкий физик. В 1886—87 гг. впервые наблюдал и дал описание внешнего фотоэффекта.

Регистратором приемника были глаза Г. Герца. Искра в зазоре приемной антенны была слабой. Поэтому эксперименты приходилось вести в полной темноте. Г. Герц наблюдал отражение, преломление, дифракцию и интерференцию электромагнитных волн (см. раздел 5). Он установил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. Важно также, что он придал уравнениям Максвелла симметричный вид, тем самым в более явной форме записал связь электрического и магнитного полей. Для своих экспериментов он создал искровой источник электромагнитных волн (вибратор Герца) и приемник (резонатор Герца). Однако, обнаружив прямолинейность распространения электромагнитных волн, Г. Герц сделал вывод об их полной практической бесполезности для целей связи.

Первые шаги к практическому использованию электромагнитных волн для целей передачи информации были, пожалуй, сделаны П. С. Мунком¹. В статье, опубликованной в 1835 году, он сообщил о своих опытах с порошками из сульфида ртути, измельченного олова, угля и других материалов, помещенных в стеклянную трубку, снабженную проволочными электродами. Он разряжал через порошок (или затвердевшую массу) лейденскую банку (конденсатор). После разряда при достаточно высоком напряжении электрическое сопротивление порошка резко уменьшалось и сохраняло затем низкое значение. При встряхивании трубки происходило резкое повышение сопротивления. Подобные результаты были получены и другими исследователями. Так в 1866 г. в Великобритании было запатентовано устройство защиты телеграфной аппаратуры, которое содержало два медных электрода, разделенных тонким слоем угольного порошка в смеси с порошком изолирующего материала.

В 1890 г. Э. Бранли² обнаружил, что железный порошок изменяет сопротивления под действием электромагнитного поля электрической икры («трубка Бранли»). Для того чтобы привести трубку Бранли в исходное высокоомное состояние ее надо было встряхивать. Э. Бранли назвал, изобретенный прибор «радиокондуктором» (радиореле). Э. Бранли радиосвязь не интересовала. Его целью было осуществление управления на расстоянии. Именно он в 1905 г. ввел термин *телемеханика*. В начале XX века Э. Бранли построил несколько радиоуправляемых моделей судов.

В 1894 г. О. Лодж³ усовершенствовал трубку Бранли. Для встряхивания порошка он использовал молоточек, который приводился в дей-

¹ П. С. Мунк ав Росеншёльд (швед. *P. S. Munck af Rosenschold*, 1804—1860) — шведский физик.

² Эдуард Бранли (фр. *Edouard Eugene Desire Branly*; 1844—1940) — французский изобретатель, физик и инженер. Член Французской академии наук (1911).

³ Оливер Джозеф Лодж (англ. *Oliver Joseph Lodge*; 1851—1940) — британский физик и изобретатель. Он изобрел динамический громкоговоритель и электрическую свечу зажигания.

ствие часовым механизмом. Именно О. Лодж ввел термин «когерер»¹ для обозначения прибора, обнаруживающего на расстоянии источник электромагнитных колебаний.

Используя когерер в качестве регистратора, 14 августа 1894 г. О. Лодж на лекции в Музее естественной истории Оксфордского университета продемонстрировал опыты по беспроводной телеграфии. Однако он не стал продолжать эти работы, и как впоследствии говорил, ему не хватило понимания, насколько экстраординарное значение будут иметь работы по радиосвязи.

Наиболее значимый шаг к практическому использованию радиосвязи сделал А. С. Попов². Начиная с 1889 г. он активно проводит опыты с электромагнитными волнами. На рис. 1.18 показан макет одного из приемников А. С. Попова.

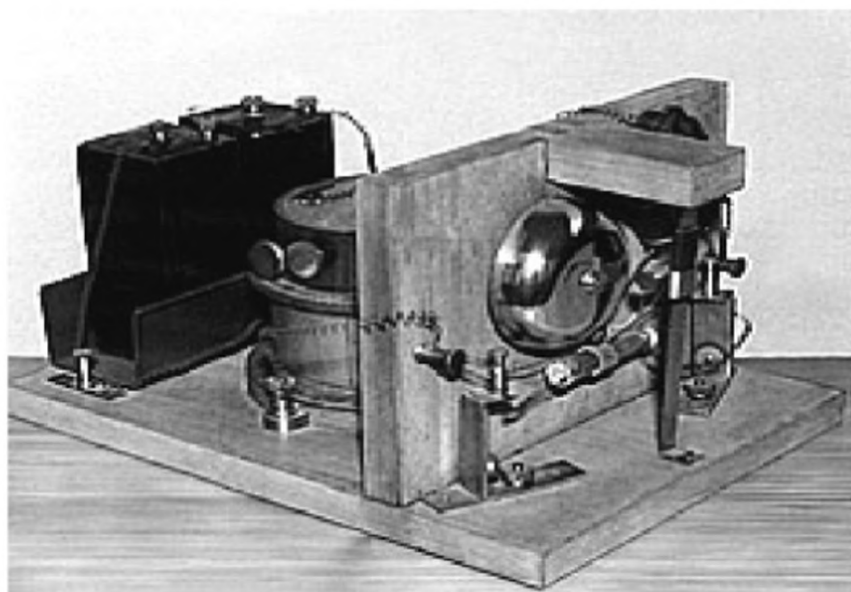


Рис. 1.18. Приемник А. С. Попова

В 1894 г. А. С. Попов уже располагал достаточно мощным и надежным искровым передатчиком, построенным по образцу вибратора Герца. Однако приемная часть его не удовлетворяла. Он усовершенствовал схему О. Лоджа. В его радиоприемнике молоточек, встряхивавший когерер, работал не от часового механизма, а от принятого радиоимпульса. Кроме того, устройство было экранировано для исключения действия внешних переменных полей.

Принятые меры позволили сразу же увеличить дальность действия приемника. Так как приемник был защищен от действия посторонних полей экраном, то А. С. Попову удалось обнаружить, что дальность действия значительно увеличивается при присоединении к схеме доста-

¹ О. Лодж образовал термин «когерер» от латинского слова «*cohaerere*» (сцепляться).

² Александр Степанович Попов (1859—1906) — русский физик и электротехник, профессор, изобретатель. С 1901 г. — профессор физики Санкт-Петербургского императорского электротехнического института Александра III (ныне ЛЭТИ).

точно длинного провода. Так появилась привычная теперь для нас радиоантенна.

Современники А. С. Попова признавали, что его конструкция представляла собой прибор, пригодный для практического использования в беспроводной телеграфии.

Свой прибор А. С. Попов продемонстрировал 7 мая 1895 г. (25.04 по ст. стилю), используя в качестве источника электромагнитного излучения вибратор Герца. В своей статье в 1896 г. А. С. Попов писал: *«В соединении с вертикальной проволокой длиной 2,5 метра прибор отвечал на открытом воздухе колебаниям, произведенным большим герцевым вибратором (квадратные листы 40 сантиметров в стороне) с искрой в масле, на расстоянии 30 сажень (64 м)... При дальнейшем усовершенствовании его может быть применен к передаче сигналов на расстояния при помощи быстрых электрических колебаний»*¹.

В 1899 г. А. С. Попов разработал более чувствительный приемник, основанный на так называемом телефонном детектировании. В нем звонок был заменен наушниками. А. С. Попов 14 июля 1899 г. подал заявку на выдачу ему патента на телефонный приемник. Патент Великобритании № 2797 был выдан ему в 12 февраля 1900 года, российский — № 6066 30 ноября 1901 года. Такие телефонные приемники использовались с 1901 г. на линии связи с островом Готланд².

Коснемся приоритетной стороны дела, споры вокруг которой не затихают. В этом отношении судьба изобретений А. С. Попова мало чем отличается от других.

Технический аспект оценки каких-либо устройств в изобретательстве имеет существенное значение, ибо устройство только в том случае становится средством техники, когда оно пригодно для выполнения определенной функции. Эта функция к тому же должна быть общественно значимой. По этой причине, в частности, не всякое впервые созданное устройство, предназначенное для проведения физических опытов, является изобретением.

Работы Г. Герца, Э. Бранли, О. Лоджа, о которых шла речь выше, и предшествующие работам А. С. Попова, не содержали законченного комплекса технических средств, необходимых для радиосвязи. Это также относится и к работам, которые проводил Н. Тесла³. Кроме того, следует учитывать, что Н. Тесла преследовал цель передачи без проводов не столько сигналов и сообщений, сколько энергии. Что касается Г. Герца, то он в своих опытах установил прямолинейность распро-

¹ Попов А. С. Прибор для обнаружения и регистрации электрических колебаний. ЖРФХО, Вып. 1. Ч. физ. Отд. 1, С-Петербург, 1896, с. 1—14.

² Остров в Финском заливе, в 180 км к западу от Санкт-Петербурга.

³ **Никола Тесла** (серб. *Никола Тесла*, англ. *Nikola Tesla*, 1856—1943) — австро-венгерский изобретатель в области электротехники и радиотехники. С 1891 г. — гражданин США. Широко известен благодаря своему вкладу в создание устройств, работающих на переменном токе.

странения радиоволн и на основании этого сделал вывод о их полной практической бесполезности.

Приемник, пригодный для телеграфии, был создан впервые А. С. Поповым. Для этого ему потребовалось, как известно, провести серию опытов по исследованию материала порошка и формы когерера, включить дополнительный контур релейного усиления, добавить звуковой регистратор приема сигналов (электрический звонок), цепь автоматического восстановления чувствительности когерера для приема каждого последующего сигнала, вертикальную проволочную антенну для повышения чувствительности приемника. Многие из этих элементов в отдельности были известны ранее. Но лишь все они в совокупности, объединенные А. С. Поповым в одном устройстве единственно возможным способом, привели к изобретению приемника, а, следовательно, и радио.

Иногда в качестве контрдовода приводят то факт, что 7 мая 1895 г. А. С. Попов продемонстрировал грозоотметчик, а передачу радиотелеграфного сообщения только 24 марта 1896 года. Однако идея использования его приемника для метеорологических целей была изложена еще в апреле 1895 г. на объединенном собрании метеорологической комиссии Географического общества и сотрудников Главной физической обсерватории. Для этой же цели в мае 1895 г. А. С. Попов изготовил другой прибор, записывающий на движущуюся бумажную ленту сигналы, вызванные электромагнитным излучением гроз. Прибор впоследствии был назван «грозоотметчиком» и использовался в 1895—1896 гг. для изучения характера атмосферных помех. Сам термин грозоотметчик появился у А. С. Попова в 1897 году. Если бы он преследовал цель изобрести грозоотметчик, то вполне мог применить для такого назначения созданный им и продемонстрированный в действии на заседании РФХО еще в 1893 г. «радиометр» — прибор, регистрирующий электромагнитные волны.

Даже если допустить, что оппоненты правы и А. С. Попов продемонстрировал грозоотметчик, то надо иметь в виду, что искровой разряд грозового облака отличается от искрового излучателя Герца только мощностью и непредсказуемостью времени появления излучения. Сомнительно также, что члены РФХО терпеливо ждали появления грозового разряда 7 мая 1895 года.

Приходится сожалеть о том, что А. С. Попов не запатентовал свое изобретение. Он впоследствии признавал, что не проявил должной настойчивости в продвижении своего изобретения.

Казалось бы, что больше других оснований претендовать на право изобретателя радио у Г. Маркони¹. Как и у А. С. Попова, система Маркони вначале работала лишь на небольшие расстояния, тем не менее,

¹ Гугльермо Маркони (итал. *Guglielmo Marchese Marconi*; 1874—1937) — итальянский радиотехник и предприниматель, лауреат Нобелевской премии по физике (1909). С 1975 ежегодно за выдающийся вклад в технологии связи вручается Премия Маркони.

он тут же загорелся желанием найти ей самое широкое применение. Он обратился в итальянское почтовое министерство, но получил отказ. В начале 1896 г. Маркони отправился в Великобританию, где в июне 1896 г. подал заявку на «усовершенствование передачи импульсов и сигналов, а также аппаратуры». В июле 1897 г. он получил британский патент № 12,039¹ и основал коммерческую компанию. Правда, во Франции и Германии, а позже и в России, ему в патенте отказали, ссылаясь на работы А. С. Попова.

В общих чертах приемник Г. Маркони воспроизводил приемник А. С. Попова, а его передатчик — вибратор Герца с усовершенствованиями А. Риги². Принципиально новым было то, что приемник был изначально подключен к телеграфному аппарату, а передатчик соединен с ключом С. Морзе, что и сделало возможным радиотелеграфную связь. Г. Маркони также усовершенствовал когерер (см. рис. 1.19), что повысило чувствительность приемника.

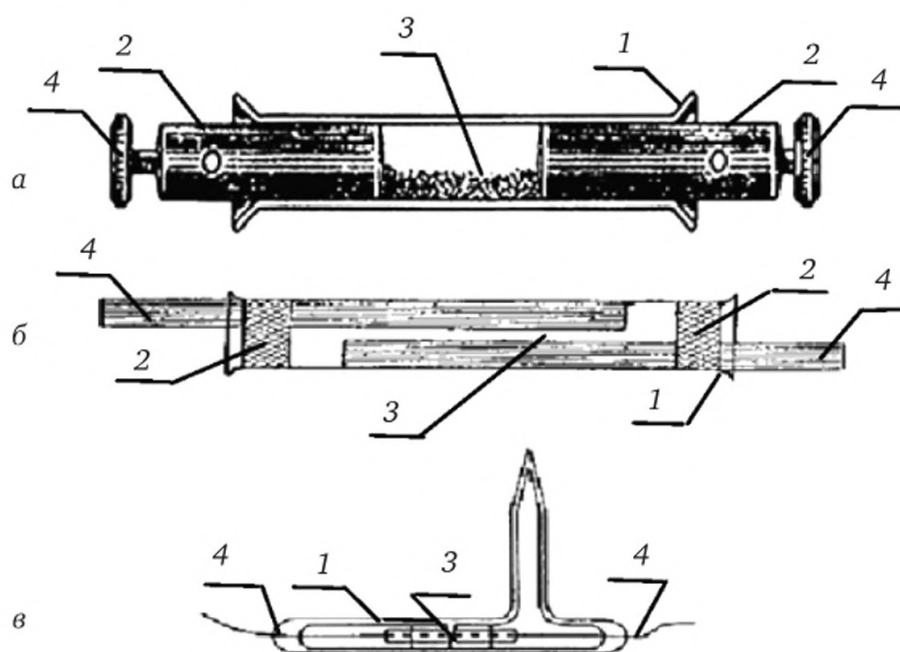


Рис. 1.19. Трубка Э. Бранли (а), когерер А. С. Попова (б) и вакуумированный когерер Г. Маркони (в):

1 — стеклянная трубка; 2 — изоляционные пробки; 3 — область, заполненная: железными опилками (а), железным порошком (б), никелевыми опилками с добавкой 4 % серебряных (в); 4 — металлические электроды: стержневые (а), ленточные из фольги (б), серебряные цилиндрические с платиновыми проводниками (в)

¹ «Improvements in transmitting electrical impulses and signals, and in apparatus therefore». Date of Application, 2nd June 1896. Complete Specification Left, 2nd Mar. 1897; Accepted, 2nd July 1897.

² **Аугусто Риги** (итал. *Augusto Righi*; 1850—1920) — итальянский физик, автор более чем 250 научных публикаций, член ряда академий наук, в частности иностранный член Лондонского королевского общества (1907), член-корреспондент Петербургской Академии наук (1896). Для широкой публики известен как один из главных учителей Г. Маркони.

Наконец, Г. Маркони соединил и передатчик, и приемник с землей. Все это вместе значительно увеличило дальность связи. Это обстоятельство признавал и А. С. Попов.

Общепризнанным считается то, что Г. Маркони не открыл, что совершенно новое, но он собрал воедино множество предыдущих открытий и технических решений, использовал их для достижения своей цели — повсеместного распространения радиосвязи¹. Шумиха, поднятая Г. Маркони вокруг еще достаточно несовершенного аппарата, дошла до России. А. С. Попов изложил свой взгляд на деятельность Г. Маркони следующим образом: *«Заслуга открытия явлений, послуживших Маркони, принадлежит Герцу и Бранли, затем идет целый ряд предложений, начатых Минчиным, Лоджем и многими после них, в том числе и мною, а Маркони первый имел смелость стать на практическую почву и достиг в своих опытах больших расстояний усовершенствованием действующих приборов»*²



Рис. 1.20. Г. Маркони (слева) руководит подъемом антенны с помощью воздушного змея (1900 г.)

Следует признать, что действия Г. Маркони на поприще коммерциализации своих идей были вполне успешны. В результате он действительно стал «отцом радио» — но не как изобретения (здесь, по меньшей мере, в самом начале, он отставал от А. С. Попова), а как бизнеса. Следуя его законам, он запатентовал принцип и аппаратуру радиосвязи, провел шумную рекламную кампанию, и, даже, попытался ввести монополию на предоставление услуг радиосвязи, запретив своим операторам устанавливать связь с радиостанциями других производителей, хотя технически она была вполне возможна. После того как береговые стан-

¹ G. Marconi, «Wireless Telegraphic Communication: Nobel Lecture, 11 December 1909» Nobel Lectures. Physics 1901—1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1967.

² Попов А. С. Письмо в редакцию газеты «Новое время» в связи с работами Г. Маркони, направленное в ответ на обвинения его в недостаточно активной пропаганде своего изобретения. — Новое время, № 7686, 1897, 22 июля (3 авг. н. с.), с. 3. Цитируется по «Изобретение радио А. С. Поповым. Сб. документов и материалов / Под ред. А. И. Берга. — М.-Л.: АН СССР, 1945».

ции «Маркони» отказались передавать сообщения брата германского кайзера президенту США и кайзеру Германии, кайзер Вильгельм потребовал созыва первой международной конференции по радиосвязи. Она собралась в Берлине в 1903 г. и выработала предложения по общим правилам радиосвязи.

В 1906 г. на второй берлинской конференции правила были окончательно приняты. В соответствии с ними все береговые станции должны были связываться с кораблями вне зависимости от производителя оборудования. Чтобы облегчить связь, были приняты правила по использованию кода (азбуке Морзе), длинам волн и условным сигналам — в частности, сигналом призыва о помощи был объявлен знаменитый сигнал «SOS» (три точки, три тире, три точки ••• — — — •••).

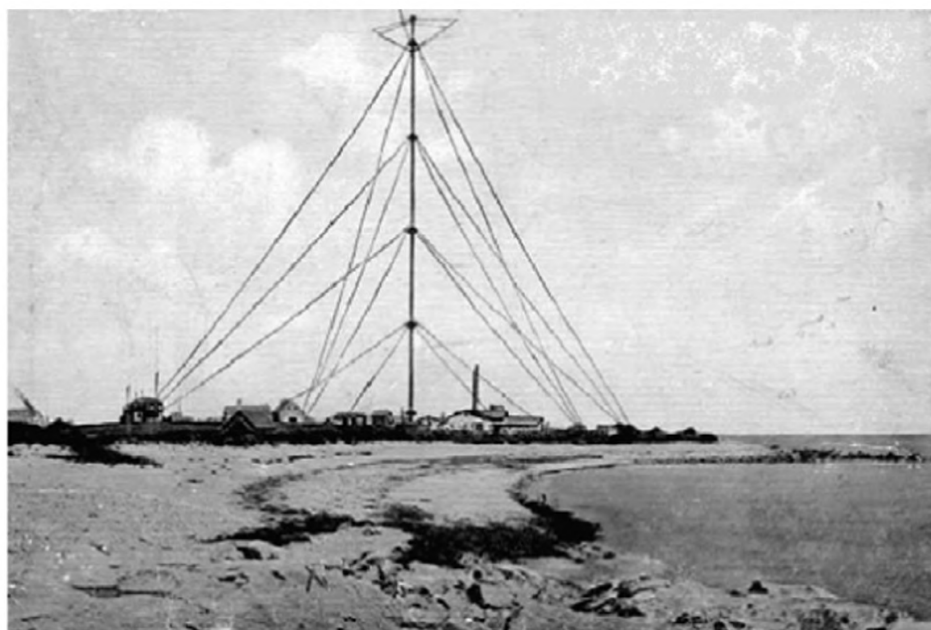


Рис. 1.21. Радиостанция в Брент Рок (Brant Rock) штат Массачусетс:
с этой радиостанции 24 декабря 1906 г. была проведена первая в мире радиопередача музыки и речи

Однако следует признать, что широким распространением радиосвязи мир обязан в первую очередь Г. Маркони. За это достижение ему в 1909 г. была присвоена Нобелевская премия (совместно с К. Ф. Брауном). К сожалению А. С. Попова уже не было в живых и по установленным правилам ему нельзя было присудить Нобелевскую премию.

Вопрос приоритета остается спорным до сих пор. В США приоритет отдается Н. Тесла, запатентовавшему в 1893 г. радиопередатчик, а в 1895 г. приемник. Права на патенты правительство США вскоре после выдачи передало фирме Г. Маркони. Только в 1943 г. приоритет Н. Тесла перед Г. Маркони был восстановлен в судебном порядке. Во Франции изобретателем беспроволочной телеграфии долгое время считался создатель когерера Э. Бранли. В Великобритании — изобретателя когерера с прерывателем О. Лодж, который в 1894 г. первым продемонстрировал радиосвязь на расстояние 40 м.

1.8. Зарождение и развитие теории информации

Теория информации — наука о статистических (случайных) процессах передачи информации в технических, природных и социальных системах. Принято считать, что она берет свое начало с работ К. Шеннона¹, который в 40-е годы XX в. ввел основные понятия этой науки: меру количества информации, пропускную способность канала связи, эффективность кодирования сообщения. По своей сути теория информации является статистической теорией связи. Ее особенность состоит в том, что информация рассматривается с количественной стороны без учета смыслового содержания. Тем не менее, ее положения носят настолько общий характер, что позволяют решать широкий круг задач получения, хранения и обработки информации². Конечно, у К. Шеннона были предшественники. Это, прежде всего, Г. Найквист³, Р. Хартли⁴. Значительный вклад в развитие современной теории связи внесли отечественные ученые. Среди них В. А. Котельников⁵, А. Я. Хинчин⁶, А. Н. Колмогоров⁷ и многие другие.

Первые работы по корреляционной теории случайных процессов были выполнены в 1934 году А. Я. Хинчиным, а первая работа по фильтрации сигналов на фоне помех по среднеквадратичному критерию качества в 1939 году А. Н. Колмогоровым. Такой фильтр теперь называют фильтром Колмогорова-Винера.

В 1941 году К. Шеннон поступил на работу в фирму «Bell Laboratories». В свободное время он начал развивать идеи, которые потом вылились в теорию информации. Исходная цель К. Шеннона заключалась в повышении качества передачи информации по телеграфному или телефон-

¹ **Клод Элвуд Шеннон** (англ. *Claude Elwood Shannon*, 1916—2001) — американский инженер и математик. Его работы являются синтезом математических идей с конкретным анализом чрезвычайно сложных проблем.

² В частности кодирование наследственности в молекуле ДНК.

³ **Гарри Найквист** (англ. *Harry Nyquist*; 1884—1976) — один из пионеров теории информации. По происхождения швед. Иммигрировал в США в 1907 году.

⁴ **Ральф Винтон Лайон Хартли** (англ. *Ralph Vinton Lyon Hartley*, 1888—1970) — американский ученый-электронщик. Он предложил новую схему генератора (генератор Хартли), преобразование Хартли, сделал вклад в теорию информации.

⁵ **Владимир Александрович Котельников** (1908—2005) — советский и российский ученый в области радиотехники, радиосвязи и радиолокации планет, академик АН СССР (1953) и Российской академии наук, с 1931 г по 1941 г, а затем с 1944 г по 1980 г работал в МЭИ деканом РТФ и заведующим кафедрой Основ радиотехники радиотехнического факультета МЭИ.

⁶ **Александр Яковлевич Хинчин** (1894—1959) — советский математик, один из наиболее значимых ученых в советской школе теории вероятностей. С 1927 г. — профессор МГУ, член-корреспондент АН СССР (1939).

⁷ **Андрей Николаевич Колмогоров** (1903—1987) — советский математик, один из крупнейших математиков XX века. Один из основоположников современной теории вероятностей, Им получены основополагающие результаты в ряде областей математики и ее приложений. академик АН СССР (1939). Иностраный член Национальной академии наук США (1967), Лондонского королевского общества (1964).

ному каналу, находящемуся под воздействием помех. Он вскоре пришел к выводу, что решение проблемы заключается в более эффективном кодировании информации. Первоначальные результаты К. Шеннона были расширены многими математиками и в первую очередь нашими соотечественниками А. Н. Колмогоровым и А. Я. Хинчиным.

Для решения проблемы, прежде всего, надо было определить количественную меру информации. К. Шеннон первым ввел такую меру и опубликовал свои идеи в работах 1948—1949 годов. Он определил количество информации через энтропию — величину, известную в термодинамике и статистической физике как мера хаотичности системы. За единицу информации он принял то, что впоследствии окрестили «битом», то есть выбор одного из двух равновероятных вариантов. Трудно представить, что чуть более полувека назад понятие «количество информации» еще нуждалось в строгом определении и что это определение могло вызывать какие-то споры.

На прочном фундаменте определения количества информации К. Шеннон доказал теорему о пропускной способности каналов связи в присутствии помех. Во всей полноте эта теорема была опубликована в его работах 1957—1961 годов. Суть теоремы К. Шеннона заключается в следующем.

В присутствии шумов и помех всякий канал связи характеризуется своей предельной скоростью передачи информации, называемой пределом Шеннона. При скоростях передачи выше этого предела неизбежны ошибки в передаваемой информации. Однако снизу к этому пределу можно подойти сколь угодно близко, обеспечивая соответствующим кодированием информации сколь угодно малую вероятность ошибки при любом уровне шума в канале¹.

Кроме теории информации, К. Шеннон проявил себя во многих других областях научной и технической деятельности. Одним из первых он высказал мысль о том, что машины могут играть в игры и самообучаться. В 1950 г. он создал механическую мышку «Тесей»², дистанционно управляемую сложной электронной схемой. Эта мышка училась находить выход из лабиринта. В честь его изобретения IEEE (Международный институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике) учредил международный конкурс «микро-мышь», в котором принимают участие тысячи студентов технических вузов. Тогда же К. Шеннон создал машину, которая «читала мысли» при игре в «монетку»: человек загадывал «герб» (аверс) или «решетку» (реверс), а машина отгадывала сделанный выбор с вероятностью выше 50 %. Этот результат связан с тем, что человек никак не может избежать каких-либо закономерностей, которые машина выявляла и использовала.

¹ Эти результаты в несколько ином виде были получены В. А. Котельниковым в 1933 году.

² Тесей — в греческой мифологии, великий афинский герой, сын царя Афин Эгея. Он победил Минотавра, а чтобы не заблудится в лабиринте, использовал нить клубка, подаренного ему Ариадной.

В конце 40-х — начале 50-х гг. XX века В. А. Котельников разработал теоретические основы помехоустойчивости радиосвязи, которые изложил в своей докторской диссертации «Теория потенциальной помехоустойчивости», защищенной в 1947 г. на заседании Ученого совета Московского энергетического института.

В этой работе идет речь о предельных возможностях радиоприема при наличии шумов. Ее фундаментальность заключается в том, что она устанавливает принципиальные ограничения на чувствительность радиоприемников в присутствии шума. Такого рода предельные ограничения весьма важны в физике и инженерной практике, так как они предостерегают разработчиков от попыток решения задач, принципиальная неразрешимость которых обусловлена фундаментальными законами природы.

Большую роль в распространении идей и методов статистической теории связи сыграли работы многих ученых, как в нашей стране, так и за рубежом. Благодаря их усилиям статистическая теория связи приобрела современный вид. Ее достижения используются для решения широкого круга практических задач передачи, приема, обработки и хранения сигналов (информации)¹.

1.9. Автоматическое управление и кибернетика

Автоматическое управление — это совокупность действий, направленных на поддержание или улучшение функционирования управляемого объекта в соответствии с заданной целью без непосредственного участия человека.

История техники насчитывает много ранних примеров конструкций, обладающих всеми отличительными чертами систем автоматического управления (САУ). Например, регулирование потока зерна на мельнице, уровня воды в паровом котле машины И. И. Ползунова² (см. рис. 1.22, а). Первой замкнутой САУ, получившей широкое техническое применение, была система автоматического регулирования с центробежным регулятором (см. рис. 1.22, б) в паровой машине Дж. Уатта³.

По мере совершенствования паровых машин, турбин и двигателей внутреннего сгорания все более широко использовались различные механические регулирующие системы и устройства, достигшие значительного развития в конце XIX века.

¹ Вплоть до задач, связанных с исследованием наследственности и мутаций в живой природе.

² **Иван Иванович Ползунов** (1728—1766) — русский изобретатель, создатель первой в России паровой машины и первого в мире двухцилиндрового парового двигателя.

³ **Джеймс Уатт** (англ. *James Watt*; 1736—1819) — шотландский инженер, изобретатель-механик. Член Лондонского королевского общества (1785), Парижской академии наук (1814). Его именем названа единица мощности — Ватт. Усовершенствовал паровую машину. Работы Уатта положили начало промышленной революции вначале в Великобритании, а затем и во всем мире.

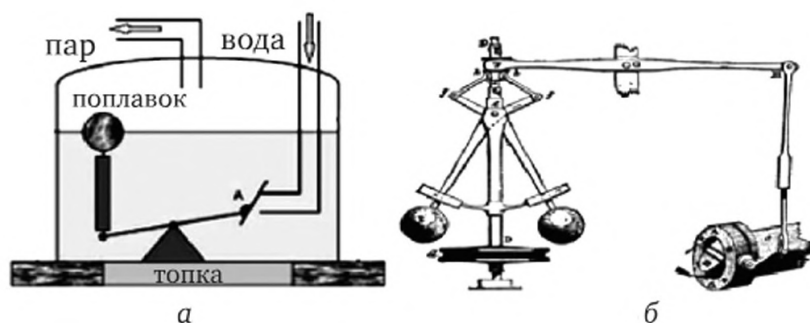


Рис. 1.22. Эскизы автоматических регуляторов:

а — уровня воды в котле И. И. Ползунова, б — скорости вращения Дж. Уатта

В конце 30-х гг. XX века в связи с бурным прогрессом техники проблема автоматического управления различными объектами, а также проблема передачи команд на объект и получение данных с него, приобретают большое значение. Это новый этап в САУ характеризуется внедрением в системы регулирования и управления электронных элементов, устройств автоматики и телемеханики. Именно в эти годы в САУ начинают широко использовать радиоканал для передачи команд и получение телеметрической информации. Все это привело к появлению высокоточных систем слежения и наведения, телеуправления и телеизмерения, автоматического контроля и коррекции. Середина XX в. ознаменовалась внедрением в производственные процессы и промышленные комплексы сложных САУ на базе электронных управляющих вычислительных машин.

Фундаментальные основы науки об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах, живых организмах и обществе заложил Н. Винер¹. Именно он наделил термин — «кибернетика» (от греч. *kybernetike* — «искусство управления», от греч. *kybernao* — «правлю рулем, управляю», от греч. *Κυβερν της* — «кормчий») его современным смыслом.

Однако впервые термин кибернетика использовал еще А. М. Ампер² в своей работе «Опыт о философии наук, или аналитическое изложение естественной классификации всех человеческих знаний», первая часть, которой вышла в 1834 году. Он назвал кибернетикой «науку о текущем управлении государством, которая помогает правительству решать встающие перед ним конкретные задачи с учетом разнообразных обстоятельств с целью принести в страну мир и процветание». Однако вскоре термин кибернетика был забыт.

Во время второй мировой войны Н. Винер работал над математическим аппаратом для систем зенитного огня. В результате он разра-

¹ **Норберт Винер** (англ. *Norbert Wiener*, 1894—1964) — американский ученый, выдающийся математик и философ, основоположник кибернетики и теории искусственного интеллекта. В его честь назван кратер на обратной стороне Луны.

² **Андре-Мари Ампер** (фр. *Andre-Marie Ampere*; 1775—1836) — знаменитый французский физик, математик и естествоиспытатель, член Парижской Академии наук, иностранный почетный член Петербургской Академии наук (1830).

ботал новую эффективную вероятностную модель управления силами ПВО США.

В 1948 г. увидела свет книга Н. Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном мире и машине». Таким образом Н. Винер стал отцом-основателем кибернетики, как отдельной самостоятельной науки. Основные положения этой науки были позже использованы при создании первых ЭВМ, которые по своей сути являются автоматами для операций над числами.

Поскольку любые процессы управления связаны с принятием решений на основе получаемой информации, то теперь кибернетику часто определяют еще и как науку об общих законах получения, хранения, передачи и преобразования информации в сложных управляющих системах.

Развитие кибернетики как науки было подготовлено многочисленными работами ученых в области математики, механики, автоматического управления, физиологии высшей нервной деятельности. Заметный вклад внесли отечественные ученые. Основы теории автоматического регулирования и теории устойчивости систем регулирования содержались в трудах И. А. Вышнеградского¹, обобщившего опыт эксплуатации и разработавшего теорию и методы расчета автоматических регуляторов паровых машин. Общие задачи устойчивости движения, являющиеся фундаментом современной теории автоматического управления, были решены А. М. Ляпуновым², многочисленные труды которого сыграли огромную роль в разработке теоретических вопросов технической кибернетики. Работы А. М. Ляпунова по теории устойчивости движения и сегодня являются научным фундаментом теории разнообразных автоматических устройств, в частности, систем управления полетом самолетов и ракет.

Работы по теории колебаний, выполненные коллективом ученых под руководством А. А. Андропова³, послужили основой для решения впоследствии ряда нелинейных задач теории автоматического регулирования. А. А. Андронов ввел в теорию автоматического управления понятия и методы фазового пространства, сыгравшие важную роль в решении задач оптимального управления.

Значительный вклад в теорию вероятностных схем, теорию автоматов и теорию систем управления — областей наук, входящих в понятие

¹ Иван Алексеевич Вышнеградский (1832—1895) — русский ученый-механик и государственный деятель. Основатель теории автоматического регулирования, почетный член Петербургской Академии наук (1888). В 1887—1892 гг. — министр финансов России.

² Александр Михайлович Ляпунов (1857—1918) — русский математик и механик, академик Петербургской Академии наук (1901) и ряда иностранных академий наук и научных обществ.

³ Александр Александрович Андронов (1901—1952) — советский физик, механик и математик. Специалист в области электротехники, радиофизики и прикладной механики, создатель нового направления в теории колебаний и динамике систем, талантливый деятель высшей школы. Академик АН СССР (1946).

кибернетика, внес К. Шеннон. Его мышка «Тесей» стала прообразом современных кибернетических систем. На рис. 1.23 К. Шеннон демонстрирует эту забавную игрушку, обладающую элементами разума.

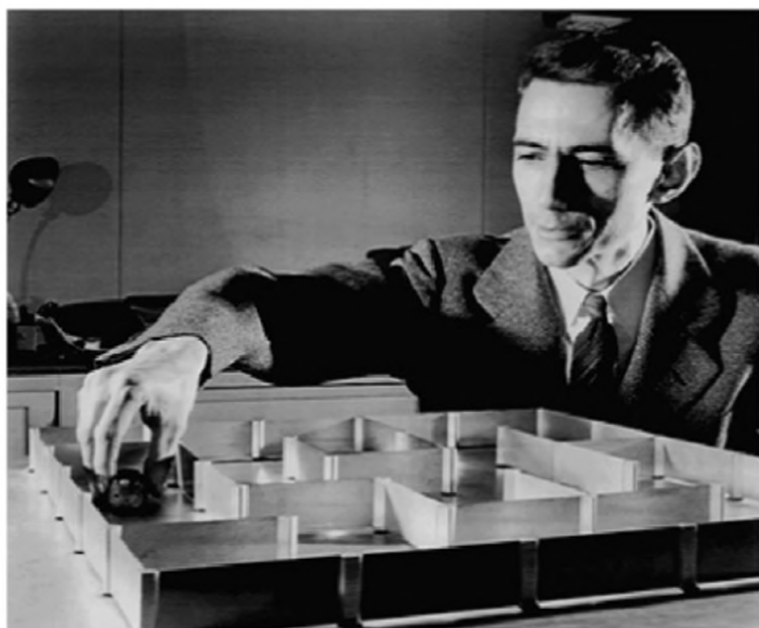


Рис. 1.23. К. Шеннон с кибернетической мышкой «Тесей»

В отечественном сознании продолжает существовать мнение о жестоких гонениях сторонников новой науки. На самом деле идеологический пресс касался только той части работ Н. Винера и его последователей, которая распространяла идеи кибернетики на живой мир и, в особенности, на человеческое общество. Н. Винер изложил свои взгляды на вопросы управления в социальных системах в книге «Кибернетика и общество», опубликованной в 1954 году.

В СССР работы по автоматическому управлению продолжались и вскоре проявились достижениями в космической технике. Никаких задержек работ по созданию отечественных ЭВМ также не было. Уже в 1947 г. в Институте электроники Академии наук Украины под руководством академика С. А. Лебедева были начаты работы по созданию первой отечественной универсальной ЭВМ. Результатом этих работ стало создание первой в Европе ЭВМ, а в 1965 г. в стенах этого института был создан первый в мире персональный компьютер.

Современный уровень развития радиоэлектроники позволяет создавать устройства, которые могут непосредственно управлять производственным процессом, освободив человека от необходимости следить за ним. Появился новый класс машин — управляющие машины, которые могут выполнять самые разнообразные и часто весьма сложные задачи управления производственными процессами, движением транспорта и т. д. Создание управляющих машин позволило перейти от автоматизации отдельных станков и агрегатов к комплексной автоматизации целых заводов. Вычислительная техника уже используется не только для управления технологическими процессами, но и в сфере

управления производством в масштабах государства, сферах экономики и планирования.

1.10. Появление электронной вычислительной машины

Появление электронной вычислительной машины тесно связано с системами автоматического регулирования и кибернетикой. По своей сути ЭВМ это автомат оперирующий числами. Однако первые попытки создания вычислительных средств можно датировать третьим тысячелетием до н. э. Тогда в Древнем Вавилоне были изобретены первые механические счеты (абак). С тех пор работы по созданию и совершенствованию вычислительных средств не прекращались. В новейшей истории первой машиной, облегчающей процесс сложения и вычитания чисел, была счетная машина В. Шиккарда¹, созданная им в 1635 году.

В 1642 г. Б. Паскаль² создал арифмометр, способный производить четыре основных арифметических действия. Основой его устройства было зубчатое колесо. В 1671 году Г. Лейбниц³ создал арифмометр, также на основе зубчатого колеса, выполняющий четыре арифметических действия и извлечение корней. Наконец в 1941 году К. Цузе⁴ создал первую электронную вычислительную машину (модель «Z3»), которая была полнофункциональной программно управляемой и свободно программируемой в двоичном коде с плавающей точкой, и которая имела все признаки современного компьютера.

Создание первой большой универсальной ЭВМ «ENIAC» (*Electronic Numerical Integrator and Computer*) было начато по заказу армии США в 1943 г. Первоначально она была задумана для расчета таблиц артиллерийских стрельб. Дело в том, что для вычисления одной траектории необходимо выполнить около 750 расчетов, а в каждой таблице содержится около 3000 траекторий. Вычисление одной траектории занимало у одного специалиста (их называли вычислителями — англ. *computer*) приблизительно 12 дней, а расчет таблицы — более 4-х лет.

¹ Вильгельм Шиккард (нем. *Wilhelm Schickard*, 1592—1635) — немецкий ученый, астроном, математик и востоковед, создатель первого в современной истории арифмометра.

² Блез Паскаль (фр. *Blaise Pascal*, 1623—1662) — французский математик, механик, физик, литератор и философ. Классик французской литературы, один из основателей математического анализа, теории вероятностей и проекционной геометрии, создатель первых образцов счетной техники, автор основного закона гидростатики. В честь него названа единица давления — Па (паскаль).

³ Готфрид Вильгельм фон Лейбниц (нем. *Gottfried Wilhelm von Leibniz*; 1646/1716) — немецкий философ и математик. Предложенные им ступенчатый валик и подвижная каретка легли в основу всех последующих арифмометров. Он стал первым гражданским лицом Германии, которому воздвигли памятник.

⁴ Конрад Цузе (нем. *Konrad Zuse*; 1910—1995) — немецкий инженер. Наиболее известен как создатель первого работающего программируемого компьютера и первого языка программирования высокого уровня для него.

Разработка компьютера велась под руководством Дж. Мочли¹ и Дж. П. Эккерта² в 1943—1946 гг. В 1946 г. машина была публично представлена под именем «*Giant Brain*» (дословно — «Гигантский мозг»).

В ЭВМ использовалась десятичная система счисления. Вычислительная мощность — 300 операций умножения или 5000 операций сложения в секунду. Компьютер содержал более 17 тысяч вакуумных ламп шестнадцати типов, более 7 тысяч кристаллических диодов и более 4 тысяч магнитных элементов. Общая стоимость базовой машины чуть-чуть не дотянула до одного миллиона долларов. Потребляемая мощность составляла около 150 кВт. Машина имела габариты $2,6 \times 0,9 \times 26$ м, а ее масса составляла 27 тонн.

Первоначально программа ЭВМ «ENIAC» задавалась путем установки переключателей на специальной коммутационной панели. Это было весьма трудоемким занятием. Для изменения программы машины ENIAC требовалось несколько дней³. Процесс программирования ЭВМ «ENIAC» показан на рис. 1.24.

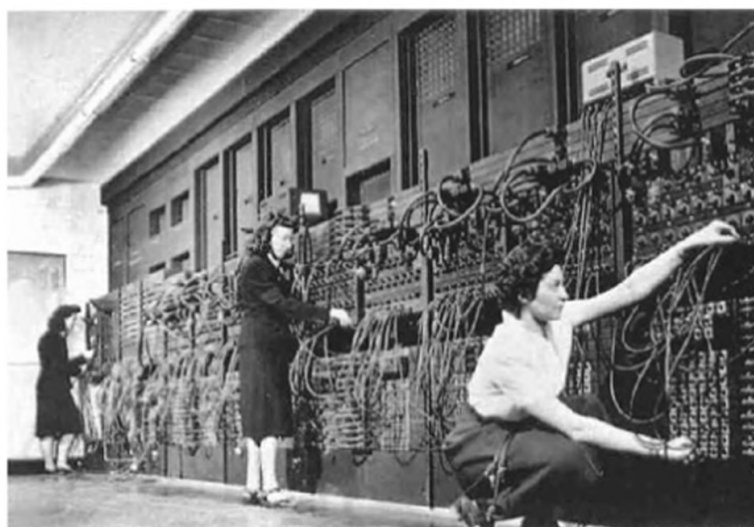


Рис. 1.24. Процесс программирования ЭВМ «ENIAC»

В 1944 г. к созданию первой ЭВМ подключился Дж. фон Нейман⁴. В процессе работы во время многочисленных дискуссий со своими кол-

¹ Джон Уильям Мочли (англ. *John William Mauchly*, 1907—1980) — американский физик и инженер.

² Джон Преспер Эккерт-младший (англ. *John Adam Presper Eckert*, 1919—1995) — американский инженер, работавший в области вычислительной техники. В 1948—1966 гг. он получил 85 патентов, главным образом за вклад в информационные технологии.

³ Однако сам расчет из-за выхода из строя какой-либо из многочисленных электронных ламп мог продолжаться всего несколько минут. Наибольший зарегистрированный отрезок безотказной работы был равен 116 ч.

⁴ Джон фон Нейман (англ. *John von Neumann*; 1903—1957) — венгеро-американский математик, сделавший важный вклад в квантовую физику, квантовую логику, функциональный анализ, теорию множеств, информатику, экономику и другие отрасли науки. Его имя присвоено кратеру на обратной стороне Луны.

легами Г. Голдстайном¹ А. Берксом² Дж. фон Нейман высказал идею принципиально новой ЭВМ. Новый проект был представлен Дж. фон Нейманом в 1945 г. под названием «EDVAC» (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*).

В отличие от «ENIAC», в новой ЭВМ должна была использоваться двоичная система счисления. Однако основополагающей идеей является предложенный Дж. фон Нейманом принцип хранения данных и инструкций в единой памяти³. Эта идея Дж. фон Неймана была реализована в машине «EDVAC», работа над которой была начата в сентябре 1948 г. Эту ЭВМ можно считать первым полнофункциональным цифровым компьютером в современном понимании этого термина.

Как и «ENIAC», «EDVAC» разрабатывался в Лаборатории баллистических исследований Армии США. Проектирование «EDVAC» началось еще до того, как заработал «ENIAC».

Однако, впервые идеи Дж. фон Неймана были реализованы в ЭВМ «EDSAC» (англ. *Electronic Delay Storage Automatic Computer*), которая в 1949 г. была создана в Кембриджском университете (Великобритания) группой во главе с М. Уилксом⁴.

В компьютере было около 3000 электронных ламп. Его основная память состояла из 32-х ртутных ультразвуковых линий задержки (1024 ячеек памяти). Кроме того была возможность подключить дополнительные линии задержки, что позволяло работать со словами в 35 двоичных разрядов. Вычисления производились в двоичной системе со скоростью от 100 до 15000 операций в секунду, потребляемая мощность составляла 12 кВт, занимаемая площадь — 20 м².

Проект «EDVAC» был закончен в 1950 году. Компьютер располагал встроенными операциями сложения, вычитания и умножения, а также программной реализацией деления; объем памяти составлял тысячу 44 разрядных слов. Компьютер был оснащен устройством записи на магнитную ленту и чтения с нее. Операции сложения занимала около 1 мс, а умножения — 3 мс.

Компьютер состоял почти из 6000 электровакуумных ламп, и 12000 диодов, и потреблял 56 кВт электрической мощности, занимал площадь — 45,5 м², имел массу — 7850 кг. В каждую 8-часовую рабочую смену ЭВМ обслуживало 30 человек.

¹ Герман Хайн Голдстайн (англ. *Herman Heine Goldstine*; 1913—2004) — математик, один из создателей первой из современных ЭВМ

² Артур Вальтер Бурке (англ. *Arthur Walter Burks*, 1915—2008) — американский математик. Принял участие и в разработке проекта «EDVAC», Развивал теорию автоматов Дж. фон. Неймана.

³ Часто совершенно необоснованно фон Нейману приписывают авторство исходной идеи хранения программы в памяти ЭВМ.

⁴ Морис Винсент Уилкс (англ. *Maurice Vincent Wilkes*, 1913—2010) — британский ученый в области компьютерных наук. К его заслугам относится изобретение микрокода — программы, реализующей набор инструкций процессора. Он основал в 1957 г. Британское компьютерное общество и был его первым президентом. Почетный член Лондонского королевского общества (1956).

В 1951 г. Дж Мочли и Дж. Эккерт закончили работы по созданию первого общедоступного компьютера UNIVAC (*UNIVersal Automatic Computer*).

Разработка первого в СССР проекта цифровой электронной вычислительной машины под руководством И. С. Брука¹ и Б. И. Рамеева² была возобновлена в Москве после окончания второй мировой войны. В 1948 г. И. С. Брук совместно с Б. И. Рамеевым составил отчет о принципах действия электронной цифровой вычислительной машины. Первое в СССР авторское свидетельство на изобретение цифровой ЭВМ на имя И. С. Брука и Б. И. Рамеева датировано декабрем 1948 года.

Академик С. А. Лебедев³, в Институте электротехники АН УССР в 1946—1950 гг. руководил работами по созданию МЭСМ (Малая Электронная Счетная Машина). Первоначально МЭСМ задумывалась как макет или модель Большой Электронной Счетной Машины. Поэтому первое время буква «М» в аббревиатуре означала «модель». Работа над машиной носила исследовательский характер, в целях экспериментальной проверки принципов построения универсальных цифровых ЭВМ. После первых успехов и с целью удовлетворения обширных потребностей в вычислительной технике, было принято решение доделать макет до полноценной машины, способной решать реальные задачи.

Машина МЭСМ была расположена в зале площадью около 60 м². Общее количество электронных ламп насчитывало около 3500 триодов и около 2500 диодов. Суммарная потребляемая электрическая мощность составляла около 25 кВт (см. рис. 1.25).

Одновременно С. А. Лебедев в Москве работал над созданием быстродействующей электронной счетной машины (БЭСМ). Он сам разработал структуру БЭСМ и составил план реализации проекта ее разработки. В апреле 1953 г. работы были завершены. На базе этой машины был начат серийный выпуск ЭВМ БЭСМ-2 (см. рис. 1.26).

В октябре 1955 г. в Дармштадте (ФРГ) на Международной конференции по электронным счетным машинам доклад С. А. Лебедева произвел сенсацию, поскольку БЭСМ оказалась лучшей ЭВМ в Европе.

Машинами БЭСМ-2 были оснащены практически все крупные вычислительные центры страны. На ней осуществлялись расчеты при запусках искусственных спутников Земли и первых космических кораблей с человеком на борту.

¹ **Исаак Семёнович Брук** (1902—1974) — советский ученый в области электротехники и вычислительной техники, член-корреспондент АН СССР (1939). С 1956 г. возглавлял Лабораторию управляющих машин и систем АН СССР, с 1958 г. — директор созданного на базе этой лаборатории Института электронных управляющих машин.

² **Башир Искандарович Рамеев** (тат. *Bağşır Iskəndər uğlı Rəmiyev*, *Башир Искəндəр улы Рəмиев*, 1918—1994) — советский ученый-изобретатель, разработчик первых советских ЭВМ («Стрела», «Урал-1»). Участник Великой Отечественной войны (войска связи).

³ **Сергей Алексеевич Лебедев** (1902—1974) — основоположник вычислительной техники в СССР, академик АН СССР (1953) и АН УССР (1945). В 1996 г. удостоен самой престижной награды Компьютерного сообщества IEEE — медалью «Пионер компьютерной техники» — за разработку МЭСМ, первой ЭВМ в СССР и континентальной Европе. Некоторое время он руководил кафедрой автоматизации электрических систем МЭИ.



Рис. 1.25. Малая электронная счетная машина (СССР)



Рис. 1.26. Электронная счетная машина БСЭМ-2 (СССР)

В 1997 г. пионерские работы С. А. Лебедева получили достойное признание за рубежом. Международное компьютерное общество IEEE «Computer Society» удостоило его своей высшей награды — медали «Computer Pioneer Award» за выдающие пионерские работы в области создания вычислительной техники.

В 1947—1948 гг. Дж. Бардин¹, У. Браттейн², У. Шокли³ создали первый транзистор. Точечный транзистор был создан в 1947 г. (Дж. Бардин

¹ Джон Бардин (англ. John Bardeen, 1908—1991) — американский физик, один из четырех человек, получивших сразу две Нобелевские премии, единственный ученый в истории, получивший две Нобелевские премии по физике. В русскоязычном произношении в фамилии Бардин ударение часто ошибочно ставится на первом слоге.

² Уолтер Хаузер Браттейн (англ. Walter Houser Brattain, 1902—1987) — американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1956).

³ Уильям Брэдфорд Шокли (англ. William Bradford Shockley; 1910—1989) — американский физик, исследователь полупроводников, лауреат Нобелевской премии по физике (1956). Он основал названную его именем лабораторию, которая стала одним из истоков «Кремниевой долины».

и У. Браттейн), а плоскостной — в 1948 г. (У. Шокли). Около 6-ти месяцев, пока транзистор не был усовершенствован, изобретение сохранялось в строжайшей тайне. Не было зарегистрировано никаких патентов. Первое публичное объявление прозвучало 30 июня 1948 года. Использование в ЭВМ транзисторов коренным образом изменило ситуацию. Уменьшились габариты и потребляемая мощность. Увеличилось время безотказной работы.

Еще в 1959 г. на Всесоюзной конференции по вычислительной технике в Киеве В. М. Глушков¹ высказал идею мозгоподобных структур, которые станут реальностью, когда конструктор сможет объединить в единую систему не тысячи, а миллиарды элементов практически без каких-либо ограничений на число соединений между этими элементами. В таких структурах может быть осуществлено слияние памяти с обработкой данных, т. е. такое функционирование системы, при котором данные обрабатываются по всей памяти с максимально возможной степенью распараллеливания всех операций.

В 1974 г. В. М. Глушков высказал мнение о том, что только разработка принципиально новой ненеимановской архитектуры вычислительных систем, позволит решить проблему построения супер-ЭВМ с неограниченным ростом производительности при наращивании аппаратных средств². Дальнейшие исследования показали, что полная и бескомпромиссная реализация принципов построения таких ЭВМ и мозгоподобных структур при имевшемся тогда уровне электронной технологии невозможна. В. М. Глушков нашел решения, которые были положены в основу оригинальной структуры высокопроизводительной ЭВМ, названной им макроконвейером.

В. М. Глушков не смог увидеть созданные по его идеям макроконвейерные ЭВМ ЕС-2701 и ЕС-1766, не имеющие аналогов в мировой практике. Производительность ЕС-1766 при использовании полного комплекта процессоров (256 устройств) оценивалась в полмиллиарда операций в секунду. Машины ЕС-2701 и ЕС-1766 были переданы в серийное производство в 1984 и 1987 годах, соответственно. К сожалению, машины столь мощные, соперничающие с лучшими американскими ЭВМ, и столь нужные науке и технике, были выпущены лишь малой серией. А в новой России им вообще не нашлось места.

И все же ЭВМ были громоздкими, а общение с ними производилось через операторов.

¹ Виктор Михайлович Глушков (1923—1982) — советский математик, кибернетик. Академик АН СССР (1964) и АН УССР (1961). Член многих академий наук и научных обществ мира. Заслуженный деятель науки УССР (1978), вице-президент АН УССР (1962) Автор трудов по алгебре, кибернетике и вычислительной технике.

² Самым значимым и принципиальным недостатком архитектуры фон Неймана является ограничение пропускной способности канала связи процессор-память. Серьезность проблемы постоянно возрастает по мере появления новых поколений процессоров.

1.11. Создание персонального компьютера

Персональный настольный компьютер появился как результат успехов, достигнутых в физике и технологии полупроводников, микросхемотехнике, электромеханике, когерентной оптике.

Программа работ по созданию ЭВМ, общение с которой доступной рядовому пользователю, была составлена еще в 1958 г. Б. Н. Малиновским¹ в стенах Вычислительного центра АН Украины. Речь тогда конечно не шла о настольной ЭВМ, но технологический рывок микроэлектроники был уже не за горами. Отечественному читателю будет полезно ознакомиться с историей проекта, который опередил время.

В 1962 г. Вычислительный центр АН Украины был преобразован в Институт кибернетики. Через два-три года исследования института охватили практически все области кибернетики. Научные отделы были объединены в секторы теоретической и экономической кибернетики, кибернетической техники, технической, биологической, медицинской кибернетики.

В области теории ЭВМ продолжалось быстрое развитие абстрактной и прикладной теории автоматов. Появились работы по вероятностным автоматам, вопросам надежности функционирования автоматов, экономного и помехоустойчивого кодирования.

В 1958 г. в Институте кибернетики АН Украины приступили к созданию машины для инженерных расчетов. Работа началась с разработки цифрового вычислительного автомата. В 1963 г. была запущена в серийное производство машина «Проминь» (укр. «Промінь»).

Эта машина была, по сути, новым словом в мировой практике, имела в техническом отношении целый ряд новшеств. Позднее они были использованы в машине для инженерных расчетов «МИР-1», созданной под руководством В. М. Глушкова в 1965 году (см. рис. 1.27).

В 1969 г. была принята в производство новая более совершенная ЭВМ «МИР-2». На ЭВМ серии «МИР» впервые в практике математического машиностроения был реализован диалоговый режим работы, использующий дисплей со световым пером, прообразом современных сенсорных экранов. Затем была разработана следующая модель ЭВМ «МИР-3».

По скорости выполнения аналитических преобразований ЭВМ серии «МИР» не было конкурентов. Машина «МИР-2», например, успешно соревновалась с универсальными ЭВМ обычной структуры, превосходящими ее по номинальному быстродействию и объему памяти в сотни раз.

Все эти новшества позволили уменьшить габариты машины до размеров письменного стола (площадь около 2 м²), несмотря на применение транзисторов и объемный монтаж плат.

¹ Борис Николаевич Малиновский (род. 1921) — советский ученый, ветеран вычислительной техники, член-корреспондент НАН Украины (1969), академик Международной Академии информатизации.



Рис. 1.27. ЭВМ «МИР-1» для инженерных расчетов, прототип современных персональных компьютеров (СССР)

Каждая из этих машин была шагом вперед на пути построения разумной машины — стратегического направления развития ЭВМ в Институте кибернетики АН Украины, целью которого являлось повышение эффективности эксплуатации ЭВМ путем упрощения взаимодействия человека с машиной.

Чем же ЭВМ серии «МИР» отличались от других?

Во-первых, тем, что у них был значительно усложнен машинный язык. В то время во всем мире господствовала точка зрения, что машинный язык должен быть по возможности максимально простым, а все остальное сделают программы.

Во-вторых, при проектировании ЭВМ серии «МИР» была поставлена задача — сделать машинный язык возможно более близким к человеческому языку¹. И такой язык «Аналитик» был создан в 1968 г. и поддержан оригинальной системой его интерпретации на аппаратном уровне.

Машины «МИР» использовались во всех уголках Советского Союза. Их создание является промежуточным этапом развития работ по искусственному интеллекту. Хотя он и выглядел пока еще довольно примитивным, но, когда машина начинала «щелкать» интегралы как неопределенные, так и определенные, находя нужные подстановки, то это выглядело очень убедительно.

Успех в разработке ЭВМ серии «МИР» связан с отказом от доминировавших в то время взглядов западных авторитетов. Так в основу работы по архитектуре машин был положен последовательный отказ от хорошо известных принципов фон Неймана. Появление именно таких принципов не удивительно. В эпоху ламповых машин, когда каждый разряд арифметического устройства — это минимум один вакуумный триод, необходима простая машина с простыми командами. Однако бурное

¹ Имеется, конечно, в виду математический, а не разговорный язык, хотя делались опыты и по созданию машин с нормальным человеческим языком.

развитие микроэлектроники и то, что конструктивные элементы могут изготавливаться в едином технологическом процессе, позволяют перейти на композиционное конструирование твердого тела для создания машинной среды. В этом случае принципы фон Неймана не эффективны, а выход состоит в усложнении машинного языка и реализации отдельных процедур в законченном виде на аппаратном уровне¹.

В 1967 г. на выставке в Лондоне, где демонстрировалась ЭВМ «МИР-1», она была куплена американской фирмой IBM. Это была первая (и единственная) покупка советской ЭВМ американской компанией.

К сожалению, возможности совершенствования машин семейства «МИР» были, далеко не исчерпаны. Если бы Институт кибернетики АН Украины не прекратил работы по ЭВМ этой серии, и продолжалось их развитие и производство, то Советский Союз обладал бы лучшей в мире моделью персональной ЭВМ и неизвестно какая бы сложилась политическая ситуация в мире к концу XX века.

Создание микросхем позволило существенно сократить размеры ЭВМ и увеличить их надежность. Это позволило перейти к разработке и производству малогабаритных управляющих вычислительных комплексов специального назначения. Достаточно вспомнить о бортовых ЭВМ космических аппаратов.

В 1972 г. появился первый цифровой микрокомпьютер, доступный для персонального использования, а годом позже полнофункциональный персональный компьютер, укомплектованный монитором.

Вскоре фирма «IBM» разработала ЭВМ IBM-5100, Однако предпринятая в 1975 г. попытка продажи этого устройства была неудачной. Коммерческий успех пришел только в 1981 году.

В СССР в 1982 г. появился на свет диалоговый вычислительный комплекс «ДВК-1», который сегодня бы мы без сомнения называли не иначе, как персональным компьютером. Местом рождения первого советского ПК по праву считается г. Зеленоград. Усовершенствованная модель ДВК-2, массовое производство которого началось в 1984 году, была вполне полноценной машиной. Специально для компьютеров серии «ДВК» была создана операционная система «ФОДОС», которая и названием, и своим внешним видом напоминала всем известную систему «DOS». В 1991 г. развитие этого модельного ряда, как, впрочем, и всей отечественной электронной промышленности, прекратилось.

Внедрение персональных компьютеров в повседневную практику стало самым удачным коммерческим проектом XX века. То, что было сделано Г. Маркони в деле распространения радиосвязи, повторил по отношению к персональным компьютерам Б. Гейтс².

¹ В дальнейшем этот принцип был использован в сигнальных процессорах.

² Уильям Генри Гейтс III (англ. *William Henry Gates III*; род. 1955), — американский предприниматель и общественный деятель, филантроп, один из создателей и бывший крупнейший акционер компании Microsoft. Является сопредседателем благотворительного Фонда Билла и Мелинды Гейтс. В период с 1996 по 2007 год, в 2009 и в 2015 годах — самый богатый человек планеты по версии журнала Forbes.

В 1973 г. Б. Гейтс поступил на первый курс Гарвардского университета. Во время своего пребывания в Гарварде он разработал язык программирования «BASIC» (англ. *Beginner's Allpurpose Symbolic Instruction Code*) для первого миникомпьютера MITS «Altair 8800» (см. рис. 1.28), разработанного компанией MITS (*Micro Instrumentation and Telemetry Systems*) в 1975 году.



Рис. 1.28. Компьютер «Altair 8800»

В 1975 г. Б. Гейтс оставил учебу в Гарварде, решив полностью посвятить себя «Microsoft», компании которую он основал в 1975 году с П. Алленом¹. Твердо уверенные в том, что персональный компьютер станет незаменимым на каждом рабочем месте и в каждом доме, они начали разрабатывать программное обеспечение для персональных компьютеров.

На рис. 1.29 показан один из первых персональных компьютеров фирмы IBM. Современный мир трудно уже представить без персональных компьютеров.



Рис. 1.29. Персональный компьютер фирмы IBM (1983 г.)

¹ Пол Гарднер Аллеи (англ. *Paul Gardner Allen*, род. 1953) — американский предприниматель, соучредитель корпорации Microsoft, которую он вместе со своим школьным другом Б. Гейтсом основал в 1975 году. В 2015 году Аллеи занимал 51-е место в списке журнала *Forbes*.

В 2005 году мировые поставки персональных компьютеров составили 202,7 млн. штук (рост на 15,8 % по сравнению с 2004 годом). В 2007 году продажи персональных компьютеров в мире составили 269 млн. штук (рост по сравнению с предыдущим годом на 14,3 %) В 2008 году продажи персональных компьютеров в мире составили 291 млн. штук. В 2009 году мировые поставки персональных компьютеров составили уже 308,3 млн. штук.

Следует отметить, что успех в значительной мере обязан коммерческой стороне дела — превращению ПК в бытовой прибор. Однако не все шаги в этом направлении следует считать полезными и необходимыми. Персональный компьютер — это, прежде всего, инструмент для профессиональной деятельности.

Эксплуатация с целью наживы повседневных интересов людей (и особенно детей) выглядит аморально.

1.12. Создание цифровых систем связи

Цифровые системы связи, по сути, возникли вместе с электрическим телеграфом. После всех усовершенствований в телеграфном аппарате П. Л. Шиллинга осталась одна магнитная стрелка, которая могла занимать два положения («0» и «1»). Для передачи букв и цифр П. Л. Шиллинг использовал равномерный шестизначный код, который по существу был двоичным кодом символов. С 1837 г. во всем мире стали использовать азбуку С. Морзе, каждый символ которой тоже можно рассматривать как двоичное число. Только почти 40 годами позже Э. Бодо предложил двоичный код фиксированной длины в пять символов.

Долгое время на это сходство не обращали особого внимания из-за отсутствия приемных устройств, способных действовать с такими сигналами как с числами. Кроме того, развитие телефонии, радиовещания, телевидения сделало передачу сообщений дискретными символами неактуальной. Однако телеграфия продолжала существовать и совершенствоваться. Она с успехом использовалась в линиях специальной связи, так как обеспечивала более высокую помехозащищенность и конфиденциальность при более экономном расходе энергии.

Однако уже в конце 20-х годов XX в. даже в радиопереводных линиях стала ощущаться нехватка каналов связи. В телеграфии способ увеличения пропускной способности канала связи был предложен Э. Бодо еще в конце XIX века. При передаче дискретных символов в промежутках между символами одного сообщения можно передавать символы других. Однако реальные сообщения — это в подавляющем числе случаев не тексты, а сведения о каких-то непрерывных процессах. Поэтому на пути к цифровым линиям связи надо было преодолеть сложившиеся стереотипы и создать новую систему взглядов на проблему передачи информации.

Прежде всего, надо было решиться на передачу дискретных значений сообщения вместо непрерывных. Критерием правомерности такой замены является возможность восстановления по дискретным значениям исходного непрерывного сообщения с заданной достоверностью.

Хотя первая электрическая система цифровой связи (телеграфная связь) уже существовала в XIX веке, начало того, что мы теперь считаем современной теорией цифровой связи, следует из работ Г. Найквиста. В 1924 г. он исследовал проблему определения максимальной скорости передачи, которую можно обеспечить по телеграфному каналу с заданной полосой пропускания Δf без межсимвольных искажений. Г. Найквист рассмотрел модель телеграфной системы, в которой передаваемый дискретный сигнал имеет общую форму

$$S(t) = \sum_n a_n g(t - nT),$$

где a_n — числа, принимающие значения 0 и 1.

Эти исследования привели его к заключению, что максимальная скорость передачи равна $2\Delta f$ отсчетов в секунду. Эту скорость теперь называют скоростью (чаще частотой) Найквиста. Более того, предельное значение скорости передачи можно достичь при использовании импульса вида

$$f(t) = \frac{\sin(2\pi\Delta f t)}{2\pi\Delta f t} = \text{sinc}(2\pi\Delta f t)^1.$$

Именно эта форма импульса допускает восстановление данных в выборочные моменты времени $t_k = k\Delta t$, где $k = 0, 1, 2, 3, 4$ без межсимвольных помех. Таким образом, выводы Г. Найквиста, которые называют теоремой Найквиста, касаются проблемы передачи дискретного сигнала по непрерывному каналу связи.

В продолжение работы Г. Найквиста Р. Хартли в 1928 г. рассмотрел вопрос о количестве данных, которые могут быть переданы надежно по каналу с ограниченной полосой частот, если для их передачи используются импульсы со многими фиксированными уровнями амплитуды. Он показал, что при наличии шума приемник может надежно оценивать амплитуду принятого сигнала с некоторой ошибкой δA . Это исследование привело Р. Хартли к заключению, что имеется максимальная скорость передачи данных по каналу с ограниченной полосой частот, зависящая от максимальной амплитуды сигнала $A_{\text{макс}}$ (фиксированной максимальной мощности, т. е. $A_{\text{макс}}^2$) и величины допустимой ошибки δA .

В 1933 г. В. А. Котельников первым сформулировал и доказал теорему, в которой речь идет о передаче непрерывного сигнала с помощью его отсчетов (т. е. по каналу с дискретным временем). Это было сделано

¹ Эта функция так часто встречается, что ей придумали собственное имя.

в наиболее общей постановке. Для восстановления сигнала было предложено использовать ряд (ряд Котельникова)

$$s(t) = \sum_k s_k \frac{\sin[2\pi f_B(t - k/2f_B)]}{2\pi f_B(t - k/2f_B)},$$

где f_B — верхняя граница спектра сигнала.

Согласно теореме Котельникова произвольный сигнал, спектр которого ограничен частотой f_B , может быть восстановлен, если известны его отсчетные значения, взятые через равные промежутки времени $1/(2f_B)$. Позднее обнаружилось, что выводы теоремы отсчетов можно распространить на одномерные и двумерные изображения при их обработке матричными фотоприемниками.

В 1949 г. теорема отсчетов независимо была вновь сформулирована и доказана К. Шенноном. Эта теорема имеет для техники связи исключительное значение. Следует отметить, что в 1915 г. Е. Т. Уиттекером¹ эта теорема была доказана, как один из частных математических результатов теории интерполяции функции. Однако это крупнейшее научное достижение по праву связывают с именами В. А. Котельникова и К. Шеннона, так как именно благодаря открытию ими теоремы отсчетов, инженеры получили возможность создания цифровых систем, которые в конце XX в. произвели революцию в теории связи. В мировой литературе за этой теоремой закрепилось название — Теорема Уиттекера — Котельникова — Шеннона (теорема УКШ).

За впервые полученное строгое доказательство знаменитой теоремы отсчетов в 1999 году В. А. Котельникову присуждена престижная международная награда фонда Э. Рейна (Германия). В 2000 г. за фундаментальный вклад в теорию связи IEEE награждает его Золотой медалью им. А. Г. Белла, а также почетной наградой IEEE — «Медалью 2000-летия». *«Академик Котельников — выдающийся герой современности. Его заслуги признаются во всем мире. Перед нами гигант радиоинженерной мысли, который внес самый существенный вклад в развитие радиосвязи»* так оценил научные заслуги В. А. Котельникова Президент IEEE профессор Брюс. Айзенштайн.

Необходимость перехода на дискретный способ передачи информации стала очевидной в процессе решении проблемы обмена информацией с летательными аппаратами. С борта аппарата надо была передать показания значительного числа датчиков (сигналы телеметрии), а на борт послать команды (сигналы телеуправления) на большое число исполнительных механизмов. Проблему надо было решить при жестких ограничениях на потребление энергии. Развитие космической техники свидетельствует, что уже в 50-х годах XX в. основные трудности были преодолены.

¹ Эдмунд Тейлор Уиттекер (англ. *Edmund Taylor Whittaker*, 1873—1956) — британский математик, специалист по прикладной математике, математической физике и теории специальных функций. Член Лондонского королевского общества (1905).

С появлением ЭВМ стало ясно, что значение каждого из дискретных отчетов можно передавать в форме числа. Это позволило сделать последний шаг к цифровым методам кодирования информации. Однако представление отчетов в форме двоичных чисел не является принципиальным с теоретической точки зрения, поскольку нигде выше не оговаривался вид дискретного сигнала. Конкретная форма представления информации становится важной только на этапе декодирования сигнала и дальнейшей обработки результата (см. раздел 3.2). Таким образом, переход к цифровому сигналу следует отнести скорее к переходу на новую технику кодирования, чем к революционному перевороту. Однако фантастические результаты этого перехода изменили наши представления и о системах связи, и о самом смысле информации.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Назовите основные вехи на пути создания современной письменности.
2. В чем состоит заслуга И. Гуттенберга?
3. Опишите принцип действия оптический телеграф К. Шаппа.
4. Каковы недостатки оптического телеграфа?
5. Что являлось отличительной чертой электрического телеграфа П. Л. Шиллинга?
6. Что собой представляет код Морзе?
7. Какие новшества внес С. Морзе в электрический телеграф?
8. Кто причастен к созданию телефонной связи?
9. Что собой представляли первые телефонные станции?
10. Когда появилась первая автоматическая телефонная станция и каков принцип ее действия?
11. Какой вклад внесли в усовершенствование телефонной связи русские инженеры?
12. Что описывают уравнения Максвелла?
13. Какова роль Г. Герца в становлении электромагнитной теории?
14. Что такое когерер?
15. В чем основное отличие использования когерера в приемнике А. С. Попова от работ других изобретателей?
16. Что нового внес А. С. Попов в конструкцию приемника?
17. Какова роль Г. Маркони в создании радио?
18. Дайте развернутое определение термина «теория информации».
19. Какие проблемы передачи сигналов решает теория информации?
20. Дайте определение количества информации.
21. Какой вклад в теории информации внес В. А. Котельников?
22. Что такое автоматические системы управления?
23. Что на современном этапе развития науки и техники понимают под кибернетикой?
24. Какова связь систем автоматизированного управления и кибернетики с созданием первых ЭВМ?
25. Что собой представляла ЭВМ «ENIAC»?
26. Как производилось программирование ЭВМ «ENIAC»?
27. В чем состояла основополагающая идея Дж. Фон Неймана?
28. Почему в ЭВМ применяется двоичная система счисления?

29. Какое событие можно принять за первый шаг к созданию и использованию персональных компьютеров?
30. Что собой представляли ЭВМ серии «МИР»?
31. Какой вклад в развитие ПК внес Б. Гейтс?
32. В чем состоит основной принцип передачи информации в цифровых системах связи?
33. Что устанавливает теорема отсчетов, и какова ее роль в теории и практике передачи информации?

2. Информационный канал и канал связи

Информационный канал (ИК) — это совокупность источника информации, ее получателя и канала связи для ее доставки.

Получателем информации, в конечном счете, всегда является человек, так как информация является продуктом деятельности человеческого общества¹. Что касается источника, то в большинстве случаев в этой роли также выступает человек. Хотя возможны и другие варианты. Информация часто извлекается из сигналов естественного происхождения, например в астрономии. Вы ориентируетесь в пространстве, получая изображения окружающих предметов и извлекая из них информацию. Но некоторые искусственные источники информации, например надписи на станциях метрополитена, строго говоря, нельзя считать истинными источниками, ибо они всего лишь носители информации, созданной ранее человеком. Однако по сложившейся традиции в подобных случаях тоже говорят об информации. Это следует понимать как информацию в широком смысле слова, в то время как выше шла речь об информации в узком смысле.

Очень важным вопросом является вопрос о скорости передачи информации по ИК. Обычно говорят о ее недостаточности, и необходимости ее увеличения. Однако, поскольку потребителем информации является человек, то скорость ее поступления должна быть согласована со скоростью физиологических процессов, а форма ее представления должна быть доступной для восприятия органами чувств.

Жизнедеятельность человека поддерживается электрохимическими реакциями на уровне молекул и ионов. Характерное время таких процессов составляет в лучшем случае единицы миллисекунд. Это важно иметь в виду при разработке систем связи и аппаратуры. Тактовая частота центрального процессора ПК может быть сколь угодно высока, в то время как считывание информации с экрана дисплея не может превышать 20—30 полных кадров в секунду. Ну а время принятия человеком осознанного решения на основании полученной информации измеряется долями секунды².

¹ В популярной и околону научной литературе можно встретить утверждения, что животные и даже растения обмениваются информацией. На самом деле они обмениваются сигналами. Яркие лепестки цветка — это сигнал пчеле. Если бутон не раскрылся — сигнал другой. Пчела, получив такой сигнал, не сможет решить, когда цветок распустится и ей снова следует прилететь на это место. Иное дело человек!

² Крайне удивительно, что такой медленный «центральный процессор» способен быстро решать задачи недоступные даже суперкомпьютеру. Этот факт должен ➡

Основные процессы, происходящие в информационном канале, станут более понятными, если изобразить ИК в виде некоторой схемы, которая отображает связи между его отдельными частями. Такую схему называют структурной схемой. В процессе обучения вы часто будете встречаться с такими схемами.

2.1. Структура информационного канала

На рис. 2.1 показана структурная схема ИК, который обеспечивает обмен информацией двух абонентов.

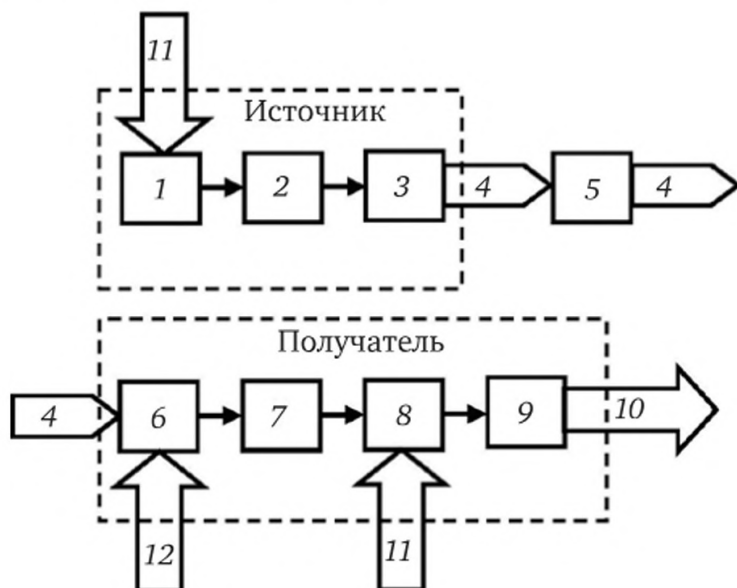


Рис. 2.1. Структура канала передачи информации:

- 1 — индивидуальное сознание, 2 — кодирование, 3 — преобразование,
4 — сигнал, 5 — канал связи, 6 — обратное преобразование, 7 — декодирование,
8 — индивидуальное сознание, 9 — принятие решения, 10 — действие,
11 — общественное сознание, 12 — другие сигналы и помехи

Как уже указывалась выше, информация нематериальна и субъективна. В схеме, показанной на рис. 2.1, она рождается в индивидуальном сознании (блок 1) в еще неосознанном, неконтролируемом виде. Эту фазу принято называть подсознанием. З. Фрейд¹ первым указал на существование подсознания и определил его роль в поведении человека. Далее информация проходит кодирование (блок 2). На этом этапе она уже частично контролируется человеком и существует в сознании в виде некоторых образов, например, в форме «речи про себя» на родном языке. Для того чтобы передать информацию, ей надо придать

➡ охладить пыл рядовых пользователей, да и создателей ЭВМ. Скорость вычислений растет, но мастерства головного мозга ЭВМ так и не может достичь. Хотя и обратное утверждение имеет силу — некоторые задачи доступные ЭВМ человек решить не может (по крайней мере, быстро решить).

¹ Зигмунд Фрейд (нем. *Sigismund Schlomo Freud*; 1856—1939) — австрийский психолог, психиатр и невролог. Известен как основатель психоанализа.

материальную форму — превратить в некоторый физический процесс (сигнал)¹. Это происходит в преобразователе (блок 3).

Результатом преобразования является сигнал (блок 4). Поскольку возможности человека ограничены, то сигнал это или колебания воздуха, или изменение интенсивности отраженного или рассеянного света².

Канал связи (блок 5) обеспечивает доставку сигнала (информации) получателю. Из канала связи сигнал, содержащий информацию, поступает к потребителю. Теперь необходимо восстановить первичную форму информации, доступную для восприятия человеком. Прежде всего, наши органы чувств преобразуют сигнал в нервные импульсы, которые обрабатываются головным мозгом. Эти две процедуры происходят в блоках 6 и 7. После преобразования мы получаем полностью или частично осознанную информацию. Например, на начальном этапе обучения чтению многие дети произносят прочитанное вслух или «про себя» (некоторые шевелят при этом губами). Однако в большинстве случаев усвоение информации происходит почти неконтролируемо. Извлеченная информация пополняет индивидуальное сознание (блок 8), где она превращается в знания и умения. Далее информация обязательно анализируется с привлечением общественного сознания (блок 11). На основании этого анализа принимается решение (блок 9) и, наконец, осуществляется действие (блок 10). Без этих двух заключительных этапов обмен информацией теряет всякий смысл. Конечно, заключительные этапы могут не совпадать по времени с моментом получения сигнала.

С практической точки зрения важно иметь в виду, что передача и прием информации всегда происходит на фоне помех (блок 12). Выделение конкретной информации обеспечивается блоком 7. В шумном вагоне метрополитена вы без особых затруднений ведете беседу со своим попутчиком, не обращая внимания на разговоры остальных пассажиров.

2.2. Канал связи

Канал связи может быть естественным или искусственным.

Естественным каналом связи — окружающим пространством — мы с вами постоянно пользуемся. В этом канале нет никаких дополнительных элементов и преобразователей. В нем используются только естественные природные явления, доступные восприятию органам

¹ Строго говоря, и подсознанию соответствуют некие физические процессы на уровне физиологии мозга, т. е. оно — материально. Это можно считать проявлением двойственной природы окружающего нас мира.

² Вряд ли можно всерьез говорить о передаче на расстояние запаха или вкуса. Хотя поиск и исследования частей головного мозга, ответственных за эти ощущения, ведутся и опыты по их активации предпринимаются.

чувств человека — механические колебания воздуха, а также рассеяние и распространение света. Этот канал передачи информации верой и правдой служит нам как минимум 200 000 лет.

Искусственный канал связи — это некоторое инженерно-техническое сооружение. Он может быть очень простым, а может иметь очень сложную структуру.

Структурная схема канала связи показана на рис. 2.2.

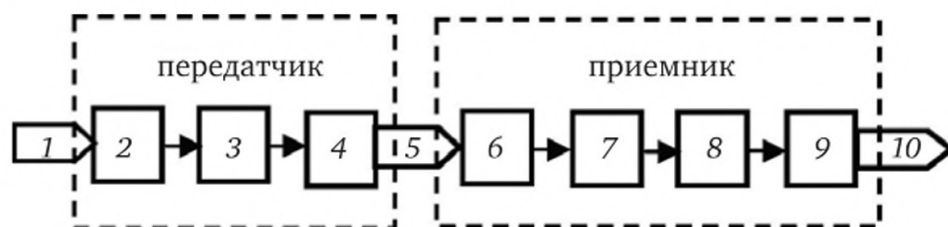


Рис. 2.2. Упрощенная схема канала связи:

1 — сигнал, 2 — преобразователь сигнала, 3 — кодировщик, 4 — источник носителя, 5 — линия связи, 6 — селектор сигнала, 7 — преобразователь сигнала, 8 — декодер, 9 — преобразование сигнала к исходному виду, 10 — сигнал в исходной форме

Сигнал (1) поступает на вход передатчика. Физическая природа входного сигнала может быть самой разнообразной. Например, это могут быть звуковые волны в воздухе или свет или что-то еще. Сигнал преобразуется в блоке 2 в форму, удобную для дальнейшей обработки. Если, например, сигнал звуковой, то его удобно преобразовать в электрический с помощью микрофона.

Для дальнейшей передачи информации может потребоваться кодировка (блок 3). Например, в мобильном сотовом телефоне аналоговый сигнал превращается в цифровой (см. раздел 3.2). В зависимости от условия передачи информации по каналу связи может потребоваться смена физического носителя. Если снова вернуться к мобильному телефону, то в сотовых системах связи в качестве носителя используются электромагнитные волны (см. главу 5) с частотами порядка 1 ГГц. Эта операция происходит в блоке 4.

Затем сигнал в новой физической форме поступает в линию связи (блок 5). В простейшем случае в роли линии связи выступает открытое пространство (см. главу 6). Однако каналов связи теперь стало так много, что приходится применять специальные линии передачи, чтобы каналы связи не создавали помех друг другу (см. главу 7). Кабельное телевидение является хорошо вам знакомым примером такой линии.

Из линии связи сигнал попадает в приемник. Поскольку по одной и той же линии связи могут передаваться несколько сигналов, то, прежде всего, следует выделить тот из них, который содержит нужную информацию (блок 6). Именно это вы делаете, когда выбираете нужный канал телевизионного вещания с помощью дистанционного пульта.

Далее следует преобразователь сигнала (блок 7), который необходим, так как при смене физического носителя сигнал изменил свой вид.

В ваш мобильный телефон с базовой станции (передатчика) поступает модулированный высокочастотный сигнал, который содержит информации в скрытой форме (см. раздел 4.3). Если предварительно в передатчике была проведена кодировка сигнала, то потребуется и обратная операция — декодирование (блок 8).

Как правило, сигнал необходимо вернуть в исходной форме. Это преобразование происходит в блоке 9. На выходе приемника мы имеем сигнал, пригодный для дальнейшего использования.

В канале связи сигнал попутно может использоваться для решения различных технических проблем, например, для приведения в действие каких-то механизмов, для управления движением объектов и т. п. Однако все это подлежит окончательному преобразованию в информацию в сознании человека.

Простейшая схема, показанная на рис. 2.2, может использоваться в блоке 5 на рис. 2.1 многократно. Так, например, доставка изображения на экран вашего телевизионного приемника в очень упрощенном изложении выглядит следующим образом.

Сигнал с микрофонов и телевизионных камер поступает через канал связи в режиссерскую аппаратную. Здесь изображение и звук воспроизводятся мониторами. Видеорежиссеры в соответствии со своими творческими планами из нескольких изображений монтируют одно единственное изображение, которое по каналу связи передается в центральную аппаратную. Здесь проводится окончательная техническая обработка сигнала перед пересылкой его по следующему каналу связи на телевизионный передающий центр. Часть сигналов записывается на видеомагнитофоны, сигналы из студии, если этого требует видеорежиссер, смешиваются с ранее записанными сигналами, сигналами с передвижных станций и т. п. Проводится заключительный контроль как технического, так информационного качества.

Наконец подготовленный сигнал по каналу связи поступает на телевизионный передающий центр и передается в свободное приземное пространство, на спутник-ретранслятор, в кабельные линии и т. д.¹. И только после этого сигнал поступает на вход вашего телевизионного приемника. Как видите, телевизионное изображение проходит длинный, а подчас долгий путь по каналам связи при этом сигнал не раз изменяет свою форму.

Как видите, в процессе обмена информацией важную роль играют технические средства ее доставки от источника к потребителю. Количество информации, которым обладает человечество, непрерывно растет и, как следствие, растет потребность в каналах связи. На современном этапе технического развития исключительное значение приобрели радиоэлек-

¹ Телевизионные центры, радиопередающие и ретрансляционные станции принадлежат различным ведомствам или компаниям. Так, что отдельные части каналов связи обособлены не только с инженерно-технической точки зрения, но и организационно.

тронные средства связи, так как они обеспечивают доставку информации не только в любую точку Земли, но в любую точку Вселенной. Разработка устройств, аппаратуры, систем передачи, приема, обработки информации как раз и является полем вашей будущей профессиональной деятельности.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Что является первичным источником информации?
2. Почему информационные табло, например, в метрополитене, нельзя считать действительными источниками информации?
3. Почему газету следует считать только носителем информации (сигналом)?
4. Чем, в конечном счете, определяется скорость передачи информации в информационном канале?
5. Назовите основные блоки информационного канала.
6. Что может выступать в роли источника информации?
7. Что может выступать в роли получателя информации?
8. Назовите основные блоки канала связи.
9. Почему необходимо проводить преобразование формы сигнала?
10. Зачем может потребоваться кодировка сигнала?
11. Что такое носитель информации?
12. Зачем проводится смена носителя информации?
13. Для чего в канале связи нужен селектор?
14. Опишите процесс передачи информации с использованием сотового телефона.
15. На основе рис. 2.1 и 2.2 опишите процесс получения информации о радиоэлектронике посредством учебного пособия, конторе лежит перед вами. Считайте для определенности, что блок 10 на рис. 2.1 — это получение зачета по курсу. Какие знания и умения вы в результате рассчитываете получить?

3. Сигналы и их математические модели

Выше мы с вами выяснили, что составной частью информационного канала является канал связи, по которому информация передается в виде сигнала. Дадим определение сигнала.

Сигнал — это некоторый физический процесс, адекватный передаваемой информации.

Сигнал, которым вы постоянно пользуетесь с момента появления на свет, это звук — колебания воздуха. В процессе передачи информации по каналу связи вид сигнала может не один раз измениться. Так, например, если вы пользуетесь обычным телефоном, то звуковой сигнал преобразуется в электрический сигнал с помощью микрофона. Ну, а если телефон мобильный, то электрический сигнал превращается в радиосигнал. Для передачи по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) (см. раздел 7.5) радиосигнал преобразуется в оптический.

С точки зрения передачи информации, любой из перечисленных выше физических процессов можно рассматривать как *носитель информации*. Вы легко можно обнаружить и другие виды носителей. Некоторые из них тут же исчезают, выполнив свою функцию, а некоторые живут тысячелетиями, многократно передавая информацию, заложенную в них. Так, например, долговременным носителем информации является страница книги.

3.1. Математические модели сигналов

Каждому сигналу можно поставить в соответствие некоторую математическую модель.

Математическая модель сигнала устанавливает его связь (желательно однозначную) с информацией. Таким образом, сигнал можно рассматривать и как абстрактный, нематериальный объект. Уже давно математические модели сигналов используются для описания процессов обмена информацией. С появлением ЭВМ роль таких моделей существенно возросла. Со страниц научных статей, книг и учебников они переселились в недра специализированных ЭВМ — *сигнальных процессоров*. Математические модели позволяют классифицировать сигналы по наиболее общим признакам, отвлекаясь от конкретной формы физического процесса, им соответствующего.

Математические модели сигналов стали такими распространенными среди специалистов, что когда говорят «сигнал» почти всегда имеют в виду его математическую модель, а не физический процесс.

С математической точки зрения сигнал можно описать некоторой функцией времени. На рис. 3.1 приведен график некоторого сигнала $S(t)$. Функция $S(t)$ — непрерывная и однозначная функция времени. Для реальных сигналов однозначность фундаментальное физическое свойство, поскольку время течет в одном направлении (если бы это было не так, то как много ошибок можно было бы исправить!). Каждому значению функции $S(t)$ в любой момент времени соответствует единственное значение сигнала — реального непрерывного физического процесса. Это означает, что математическая модель аналогична физическому сигналу, а, следовательно, и передаваемой информации.

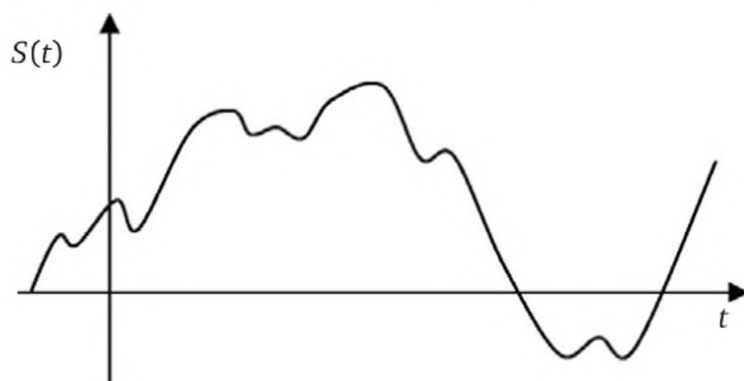


Рис. 3.1. Математическая модель реального сигнала

Математические модели сигналов играют чрезвычайно важную роль при разработке принципов передачи, приема и обработки информации, а также на этапе проектирования аппаратуры и систем связи. Это связано с тем, что такие модели позволяют проводить анализ процессов в информационном канале с использованием математических методов, а, следовательно, в наиболее общей постановке. В результате выявляются фундаментальные закономерности, которые оберегают разработчиков от неоправданных затрат времени и средств на разработку заведомо неосуществимых идей.

Математические модели легли в основу всех разделов радиотехники — от теории цепей и сигналов до статистической радиотехники и современной теории информации.

3.2. Виды сигналов

Математическую модель, описанную выше, принято называть *аналоговым сигналом*. Иногда говорят о непрерывном сигнале, что ближе к сути этой математической модели.

Однако если обратиться к телеграфии, то легко обнаружить, что с математической точки зрения сигнал может быть и дискретным. Передача в этом случае ведется дискретно символами азбуки. Мы уже затрагивали этот вопрос. Всерьез занялись дискретными сигналами в 30-х годах XX века в связи с нехваткой каналов связи (см. раздел 1.12). Оказалось,

что без существенной потери информации непрерывный (аналоговый) сигнал можно заменить его дискретными значениями — *отсчетами*. Такой сигнал принято называть *дискретным сигналом*.

На рис. 3.2 приведена иллюстрация процедуры дискретизации математической модели сигнала. Отсчеты функции $S(t)$ берутся, как правило, с равномерным шагом по оси времени.

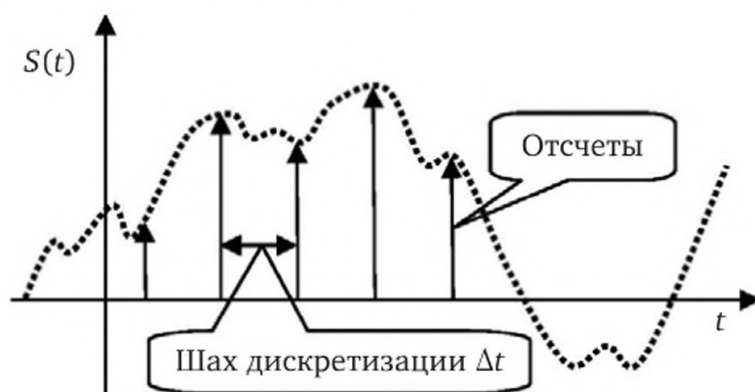


Рис. 3.2. Математическая модель дискретного сигнала

Обратите внимание на то, что мелкие (быстрые) подробности в результате дискретизации исчезают. Однако общая закономерность поведения сигнала сохраняется. В промежутках между отсчетами одного сигнала можно передавать отсчеты других сигналов. Так идея Э. Бодо нашла свое применение в телефонии (см. раздел 1.5).

Вид реального сигнала, соответствующего дискретному математическому сигналу, показан на рис. 3.3. Отсчетам сигнала ставятся в соответствие достаточно короткие импульсы, высота которых равна значению сигнала в точке отсчета¹. Такой элементарный сигнал называют *импульсным сигналом*.

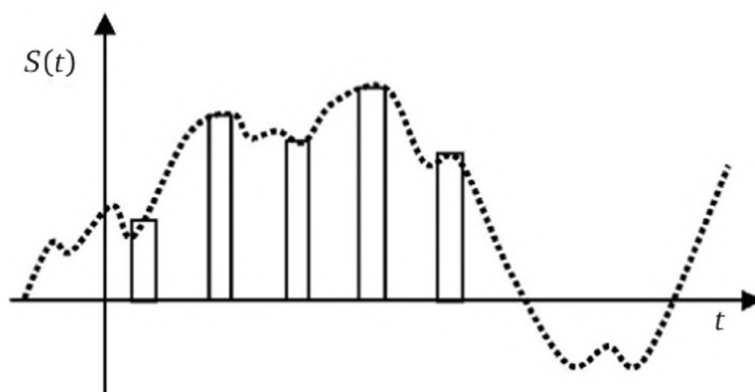


Рис. 3.3. Реальный дискретный (импульсный) сигнал

Выше мы говорили о том, что получателем информации, в конечном счете, является человек. Поэтому на выходе канала связи дискретный сигнал должен быть преобразован в непрерывный (аналоговый) сиг-

¹ Такую процедуру называют амплитудно-импульсной модуляцией.

нал. Ясно, что обратное восстановление происходит с ошибкой. Однако всегда можно установить допустимую погрешность восстановления. Ошибка восстановления увеличивается при действии на канал связи помех (см. разделы 1.8 и 1.12). В процессе развития систем связи были предложены методы уменьшения влияния помех на дискретный сигнал. Об этих методах вы узнаете при изучении специальных дисциплин.

Появление ЭВМ позволило сделать еще один, возможно самый важный шаг, в технике передачи информации — шаг к передаче дискретных отсчетов в форме двоичных чисел (см. раздел 1.12).

Кодирование информации с использованием двух состояний нам уже известно. В телеграфии это первым сделал П. Л. Шиллинг, который предложил шестизначный равномерный код (см. раздел 1.5). Затем появился неравномерный код С. Морзе. В телеграфии сигнал представляет собой буквы и цифры. Поэтому очень скоро появились устройства преобразования символов в импульсный код и обратно (аппараты Э. Бодо, раздел 1.5). С непрерывными сигналами ситуация сложнее.

Во-первых, значение сигнала в точке отсчета величина непрерывная, а двоичные числа дискретны и имеют ограничения по точности из-за конечной разрядности.

Во-вторых, надо было не только превратить отсчет в число, но восстановить исходный непрерывный сигнал.

Проблемы были решены благодаря прогрессу микроэлектронных технологий. В 70-х годах XX в. инженеры получили в свое распоряжение интегральные электронные схемы для преобразования аналогового сигнала в цифровой (АЦП) и цифрового в аналоговый (ЦАП). Это привело к стремительному развитию цифровых систем передачи, приема, обработки и хранения сигналов.

Иллюстрация цифровой формы представления отсчетов приведена на рис. 3.4. В качестве примера выбрано кодирование четырехразрядными двоичными числами. Обратите внимание на ошибки по значению отсчетов, вызванные конечной разрядностью чисел (так называемый шум квантования).

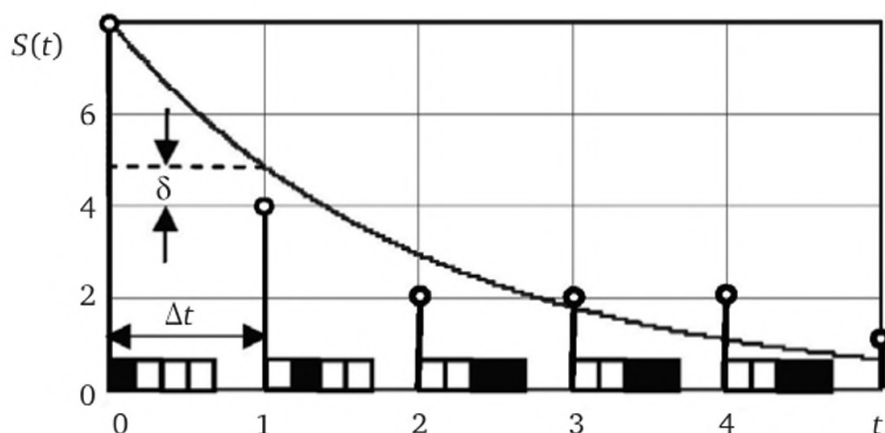


Рис. 3.4. Математическая модель цифрового сигнала:

Δt — шаг дискретизации, δ — ошибка квантования; отсчеты — 1000 (8), 0100 (4), 0011 (2), 0011 (2), 0011 (2), 0001 (1)

На рис. 3.5. показан реальный сигнал, наделенный свойствами числа в соответствии с моделью рис. 3.4. По виду графика нет никакой возможности установить является ли сигнал цифровым или это все лишь некоторая последовательность импульсов, неравномерно расположенных на оси времени. Преобразование в число станет возможным только, если будут известна система кодирования и, что не менее важно, начальная точка отсчета времени. До процедуры декодирования вообще не важно, что это за сигнал.

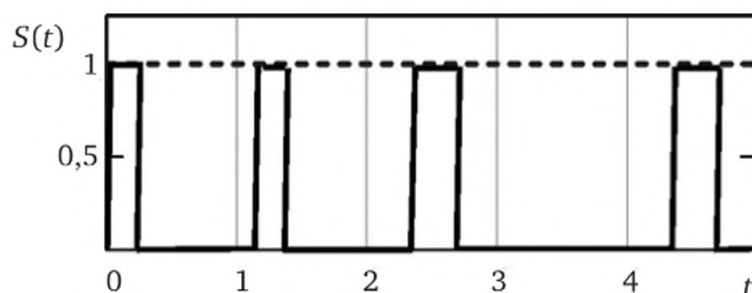


Рис. 3.5. Вид реального (аналогового) сигнала, соответствующего цифровому представлению дискретных отсчетов на рис. 3.4

Математические модели сигналов, о которых шла речь, можно представить в виде некоторой диаграммы. Эта диаграмма показана на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Виды сигналов

Принцип действия всех цифровых устройств, включая ЭВМ и ваш ПК, базируется на реальных, непрерывных (аналоговых) физических явлениях в реальных физических объектах (электрических цепях). Переход на цифровую форму представления информации связан исключительно с тем, что мы наделяем эти процессы свойствами числа. Это всего лишь математическая модель, которая позволяет обращаться с такими сигналами как с числами. Этого можно было бы и не делать, но тогда описание процесса обработки сигнала стало бы крайне громоздким.

Возможно, вы обратили внимание на то, что дискретные, а тем более, цифровые сигналы недостоверно воспроизводят информацию. Да, это действительно так. Возникает вопрос, почему же в современных системах связи все шире используются именно такие сигналы.

Преимущества дискретных сигналов заключается, во-первых, в том, что появляется возможность уплотнения каналов связи. Во-вторых, цифровая форма сигналов позволяет реализовать такие численные математические методы обработки сигнала, которые не доступны аналоговым устройствам. Это преимущество особенно отчетливо проявляется при наличии в канале связи шумов и помех.

Как видите, радиоинженер должен владеть математикой, которая положена в основу теоретического фундамента радиотехники, радиоэлектроники и связи.

На современном этапе развития методов и технических средств обработки информации невозможно обойтись без навыков программирования, а профессиональное программирование невозможно без владения математикой.

Контрольные вопросы и задачи к главе 3

1. Что такое сигнал?
2. Дайте определение сигнала как реального объекта.
3. Дайте определение сигнала как математической модели
4. Приведите пример математических моделей сигнала.
5. Что такое непрерывный аналоговый сигнал?
6. Что такое дискретный сигнал?
7. Какие преимущества дает использование дискретных сигналов?
8. Что такое цифровой сигнал?
9. Какие преимущества дает использование цифровых сигналов?
10. Какие ошибки возникают при передаче информации цифровыми сигналами?
11. Что нужно делать, чтобы уменьшить ошибку, вызванную переходом к цифровому представлению сигнала?
12. Периодическая последовательность треугольных импульсов, показанных на рис. 3.7, передается по каналу связи в дискретной форме в виде четырехразрядных двоичных чисел. Шаг дискретизации равен 1 с.

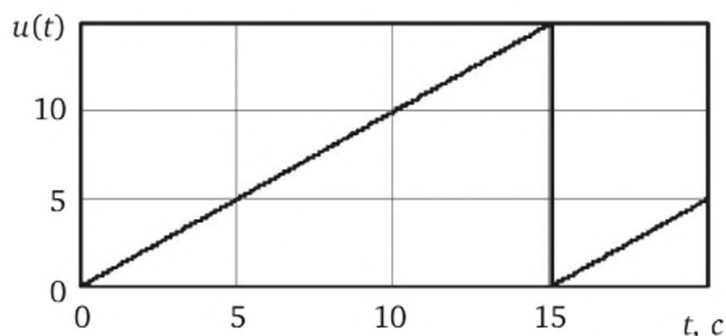


Рис. 3.7. Пилообразное напряжение

Изобразите реальный импульсный сигнал, который передается в канале связи (см. рис. 3.5). Примите длительность единичного импульса равной 0,1 с.

13. На рис. 3.8 показан цифровой сигнал, переданный по каналу связи.

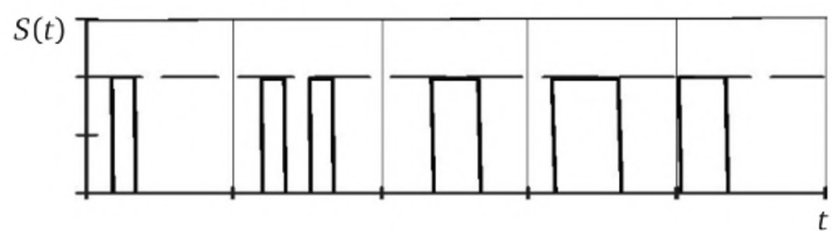


Рис. 3.8. Сигнал в канале связи

Запишите последовательность отсчетов в десятичной форме, если сигнал был передан в виде четырехразрядных двоичных чисел.

4. Гармоническое колебание в роли носителя информации

Гармоническое колебание, как математическая модель носителя информации, охватывает большое число разнообразных физических процессов, которые можно использовать для передачи информации. Это связано с тем, что, как вы узнаете из курсов физики и математики, многие системы совершают движение по гармоническому закону вполне естественным образом. Это, в свою очередь означает, что такую форму движения достаточно легко получить практически. Вы уже знакомы с системами, совершающими гармонические (точнее почти гармонические) колебания. Вспомните, как вы раскачивались на качелях. Ритмичные движения ног порождали незатухающие колебания механического маятника, которым и являются качели. Пара тренировок и вот вы уже лихо взлетаете вверх и падаете вниз.

Можно предложить несколько способов отображения гармонического колебания.

4.1. Способы представления гармонического колебания

Аналитическая форма — это запись закономерности в виде формулы

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi).$$

Графическое представление, которое получается в результате построения графика этой функции, дает наглядное представление о ее свойствах. На рис. 4.1 показано семейство графиков гармонического колебания для трех значений угла φ . Глядя на рисунок, легко установить параметры гармонического колебания.

Во-первых, гармоническое колебание изменяется во времени периодически. *Период* колебания равен T . Во-вторых, его *амплитуда* (максимальное значение) равна U_m . Скорость изменения колебания во времени определяется *круговой частотой* ω , которая численно равна скорости изменения аргумента косинуса и измеряется в рад/с. В инженерной практике вместо круговой частоты используют *циклическую частоту* (или просто *частоту*) $f = 1/T$. Она показывает какое число периодов укладывается на отрезке времени в одну секунду. Циклическая частота измеряется в герцах (Гц). Наконец, φ — это начальная фаза колебания. Для одиночного гармонического колебания в фазе мало смысла, но когда колебаний несколько, то φ дает представление

о расположении колебаний на оси времени друг относительно друга. Если $\varphi > 0$, то второе колебание сдвинуто влево, т. е. опережает первое, а если $\varphi < 0$, то ситуация обратная (см. рис. 4.1).

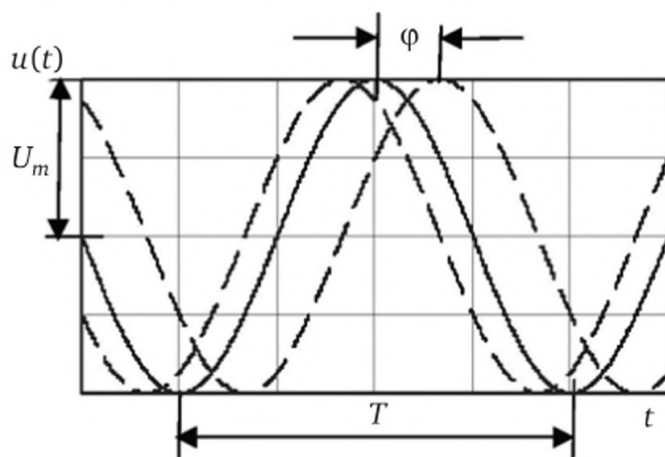


Рис. 4.1. Гармоническое колебание

Векторное представление гармонических колебаний на плоскости делает очень наглядным фазовые и амплитудные соотношения между ними. Строгое обоснование этого приема вам изложат на старших курсах. Мы же поступим формально.

Обратите внимание, что если частота колебания задана, то все значения на оси времени становятся известными, если известны начальная фаза и амплитуда, т. е. значение $u(t)$ при $t = 0$, которое равно

$$u(t) = U_m \cos(\varphi).$$

Если принять U_m за гипотенузу прямоугольного треугольника, то $u(0)$ будет выступать в роли его катета. Следовательно, гармоническому колебанию можно поставить в соответствие геометрическое представление, показанное на рис. 4.2.

Отрезок, имеющий длину и направление, в математике рассматривается как вектор. На рис. 4.2 гипотенуза изображена в виде вектора длиной U_m , который образует угол $\varphi > 0$ с горизонтальной осью. Такое представление гармонического колебания называют *векторной диаграммой*.

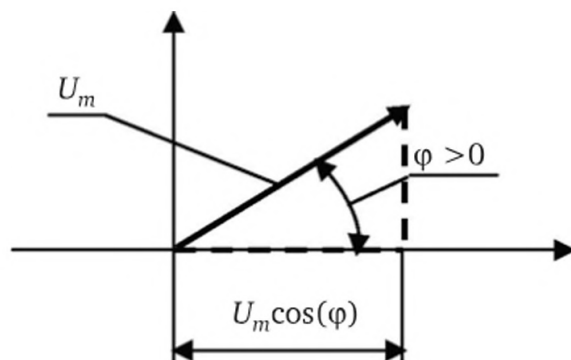


Рис. 4.2. Векторная диаграмма

Удобство использования векторной диаграммы становится очевидным при сложении нескольких гармонических колебаний. Вот простой, но очень показательный пример. Пусть

$$u(t) = 1,0\cos(\omega t + 45^\circ) + 1,0\cos(\omega t - 45^\circ).$$

Конечно, можно воспользоваться формулами тригонометрии. При равных амплитудах это сделать нетрудно. Но посмотрите насколько проще решается эта задача с помощью векторной диаграммы. Воспользуемся векторными построениями для решения этой задачи. На рис. 4.3 представлено ее графическое решение.

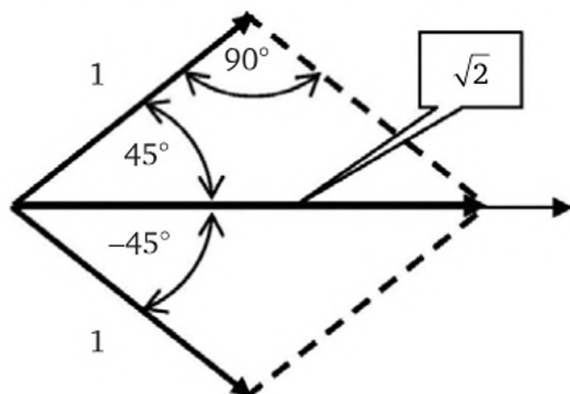


Рис. 4.3. Сложение двух гармонических колебаний

Прежде всего, построим два вектора длиной, равной 1 и образующих с горизонтальной осью углы $\pm 45^\circ$. Используя известное со школьных лет правило сложения векторов по правилу параллелограмма, находим суммарный вектор. Он будет направлен по биссектрисе угла между векторами, т. е. по горизонтальной оси ($\varphi = 0$). Длина суммарного вектора равна квадратному корню из суммы квадратов катетов ($U_m = \sqrt{2}$). Итак ответ очевиден:

$$u(t) = 1,0\cos(\omega t + 45^\circ) + 1,0\cos(\omega t - 45^\circ) = \sqrt{2}\cos(\omega t).$$

Вы можете возразить, что графическое сложение векторов не очень-то точная процедура. Да, это действительно так. Однако в инженерной практике очень часто из-за дефицита времени достаточно и приближенного качественного ответа. Нужно также помнить и том, что точность номиналов комплектующих изделий редко превышает 10 %. Наконец, получив приближенный ответ, можно его уточнить, обратившись к компьютеру (если это нужно, а потеря времени оправдана).

4.2. Спектральное представление сложных сигналов

Реальные сигналы имеют сложную форму, которая значительно отличается от простого гармонического колебания. В этом отношении хорошим примером является музыкальный аккорд, состоящий

из нескольких гармонических колебаний (нот). Такой сигнал удобно представить в виде спектральной диаграммы, которая дает наглядное представление об амплитудных и частотных соотношениях между гармоническими составляющими. Рассмотрим, как это делается.

На рис. 4.4 показан график изменения звукового давления (звучания) большого мажорного аккорда (септаккорда) в первой октаве.

Как видите, форма сигнала чрезвычайно сложна. Нет никакой возможности только по его виду повторить звучание. Конечно, при наличии музыкального слуха аккорд можно воспроизвести, но как быть, если звучание аккорда неизвестно или память подводит.

Музыканты нашли выход из этого положения. Для обмена музыкальными произведениями была изобретена нотная грамота.

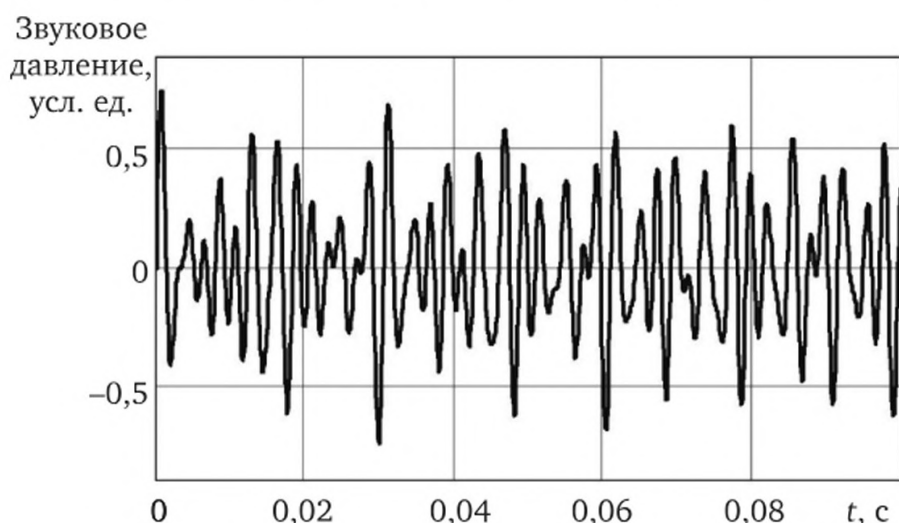


Рис. 4.4. Графическое представление «звучания» септаккорда 1-ой октавы

Септаккорд состоит из четырех нот — простых гармонических колебаний. Используя правила нотной грамоты музыканты, изображают его на нотном стане, так как показано на рис. 4.5.

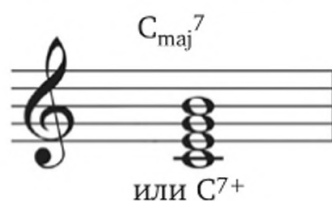


Рис. 4.5. Запись септаккорда с помощью нотных знаков

Однако такой способ представления нельзя распространить на произвольные сигналы.

Во-первых, музыкальные звуки строятся на основе дискретного, однозначно установленного набора нот (частот), в то время как реальные сигналы могут содержать гармонические колебания любых произвольных частот.

Во-вторых, в музыке ноты звучат конечное время и могут иметь разную громкость. И это очень важно при исполнении музыкального

произведения. Длительность звучания задают дискретными дробными соотношениями с помощью специальных знаков. Абсолютные значения длительности и громкости носят субъективный характер. Это открывает творческий простор для исполнителя, но совершенно недопустимо в точных науках.

В начале XIX века Ж. Фурье¹ создал аналитическую теорию теплопроводности. Для решения уравнений он предложил метод, основанный на разложении функции в тригонометрические ряды, следующего вида

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(2\pi x) + b_1 \sin(2\pi x) + a_2 \cos(4\pi x) + b_2 \sin(4\pi x).$$

Позже этот метод был положен в основу так называемого *спектрального представления* сложных сигналов.

В научной и инженерной практике спектральный состав сложных сигналов изображают в виде так называемой *спектральной диаграммы* (спектра). На рис. 4.6 показан спектр музыкального аккорда на отрезке времени его звучания.

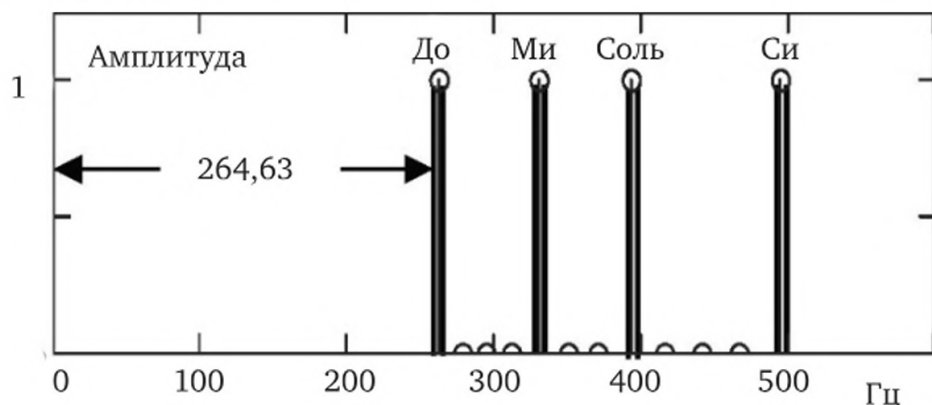


Рис. 4.6. Спектральная диаграмма музыкального аккорда

Этому спектру соответствует следующая аналитическая форма записи

$$S(t) = \sin(2\pi 2^{-9/12} F_{\text{ля}} t) + \sin(2\pi 2^{-5/12} F_{\text{ля}} t) + \sin(2\pi 2^{-2/12} F_{\text{ля}} t) + \sin(2\pi 2^{2/12} F_{\text{ля}} t),$$

где $F_{\text{ля}} = 440$ Гц — частота ноты «Ля» первой октавы. График этой функции был уже показан на рис. 4.4.

¹ Жан Батист Жозеф Фурье (фр. *Jean Baptiste Joseph Fourier*, 1768—1830) — французский математик и физик. Представление функции в виде рядов тригонометрических функций (ряда Фурье) и интегралов от них (преобразование Фурье) стало исключительно мощным инструментом математического исследования самых разных задач — особенно там, где есть волны и колебания. А этот круг чрезвычайно широк — астрономия, акустика, теория приливов, радиотехника и др. Имя Ж. Фурье внесено в список величайших ученых Франции, помещенный на первом этаже Эйфелевой башни. В курсе математики вам изложат эти методы, а затем вы постоянно будете сталкиваться с ними в специальных дисциплинах.

Представление сигналов в виде спектров является не только наглядным, но очень важным элементом анализа преобразования сигналов в канале связи. Уже в следующем параграфе мы с вами воспользуемся этим приемом.

4.3. Модулированные сигналы

Передача информации с помощью гармонического колебания осуществляется с помощью модуляции (изменения) его параметров. Это необходимо потому, что само гармоническое колебание содержит минимум информации. Если такой сигнал принят, то мы получим сведения только о трех постоянных его параметрах: амплитуде, частоте и фазе.

Поскольку гармоническое колебание имеет три параметра, возможно три вида модуляции: *амплитудная модуляция* (АМ), *частотная модуляция* (ЧМ) и *фазовая модуляция* (ФМ). Частотную и фазовую модуляцию иногда объединяют в так называемую угловую модуляцию.

Первой появилась амплитудная модуляция¹, так как ее легче получить и из нее проще выделить исходный сигнал. Если некоторый сигнал $S(t)$ передается с использованием амплитудной модуляции, то в соответствии с ним изменяется амплитуда колебания. Поскольку амплитуда величина положительная, а сигнал может быть знакопеременным (см. рис. 4.4), приходится к нему добавлять некоторую константу.

На рис. 4.7 показан вид АМ-колебания, с помощью которого передается гармонический сигнал $S(t) = S_m \cos(\Omega t)$. Аналитическая форма такого модулированного колебания имеет следующий вид

$$U(t) = U_m(1 + M \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t).$$

Такой сигнал называют однотоновым амплитудно-модулированным сигналом. Константа M называется коэффициентом модуляции. Так как отрицательные значения амплитуды недопустимы, M может изменяться от 0 до 1.

На рис. 4.7 показан график гармонического сигнала с частотой $f_0 = 15,0$ кГц, промоделированного на амплитуде сигналом с частотой $F_0 = 1,0$ кГц с коэффициентом модуляции $M = 0,8$.

Исходное гармоническое колебание $\cos(\omega_0 t)$ называют *несущим колебанием*. Частота ω_0 — это *частота несущего колебания*. Штриховую линию называют *огibaющей* АМ-колебания. Она повторяет исходный сигнал. Однако само АМ-колебание совпадает с сигналом только в дискретных точках. Поэтому для удовлетворительного восстановления сигнала из АМ-колебания необходимо, чтобы несущая частота была раз в 10 выше частоты передаваемого сигнала. Если принять макси-

¹ Амплитудную модуляцию изобрел Р. О. Фессенден. В 1906 г. он провел первую радиопередачу музыки и речи.

мальную частоту звука, равной 10 кГц, то для передачи его с помощью АМ-колебания частота несущего колебания $f_0 = \omega_0/2\pi \geq 100$ кГц.

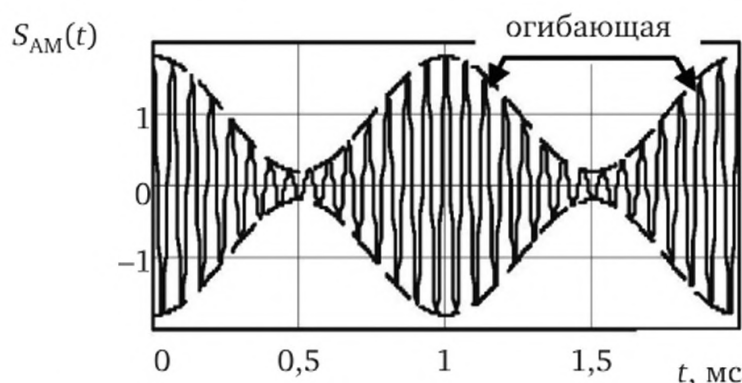


Рис. 4.7. Сигнал с однотоновой амплитудной модуляцией

Однотоновый амплитудно-модулированный сигнал можно представить в виде суммы трех непрерывных гармонических колебаний. Действительно, используя известные тригонометрические формулы, получаем

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t) + \frac{M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t] + \frac{M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t].$$

Три гармонические составляющие АМ-сигнала можно изобразить в виде спектральной диаграммы. Ее вид показан на рис. 4.8.

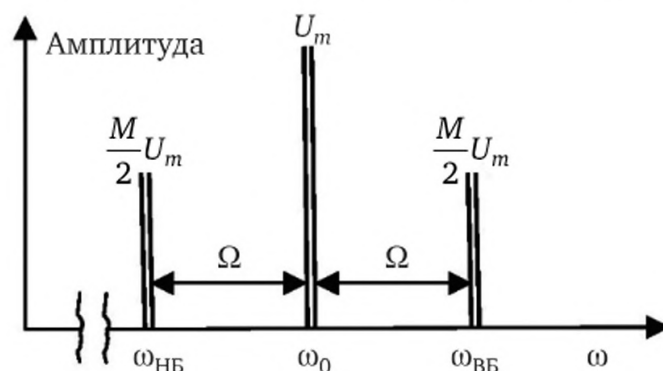


Рис.4.8. Спектр амплитудно-модулированного сигнала

Слева и справа от несущей частоты присутствуют гармонические колебания боковых частот. Колебание с частотой $\omega_{\text{вб}} = \omega_0 + \Omega$ — это колебание *верхней боковой частоты*, а с частотой $\omega_{\text{нб}} = \omega_0 - \Omega$ — *нижней боковой частоты*.

Для произвольного сигнала $S(t)$ амплитудно-модулированное колебание имеет вид

$$u(t) = U_m [1 + M \cdot S(t)] \cos(\omega_0 t).$$

В качестве примера на рис. 4.9 показан спектр АМ-сигнала, передающего септаккорд, спектр которого показан на рис. 4.6.

Каждой спектральной составляющей исходного сигнала соответствует пара боковых частот.

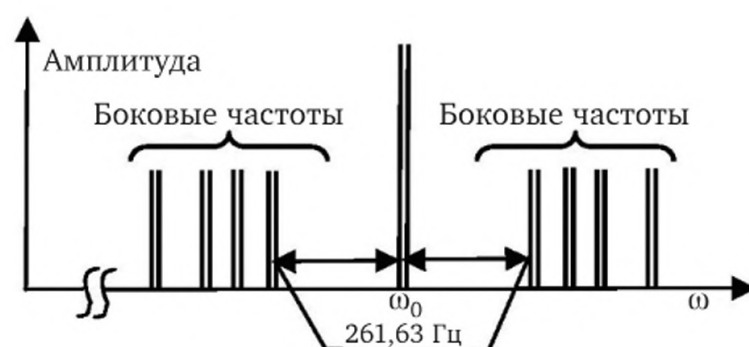


Рис. 4.9. Спектр гармонического сигнала, промоделированного по амплитуде септаккордом

Амплитудная модуляция применяется для радиовещания на длинных и средних волнах. Сигнал изображения в телевидении передается одной из разновидностей такой модуляции.

При частотной модуляции в соответствии с передаваемым сигналом изменяется частота¹. Пусть $S(t)$ имеет вид, показанный на рис. 4.10.

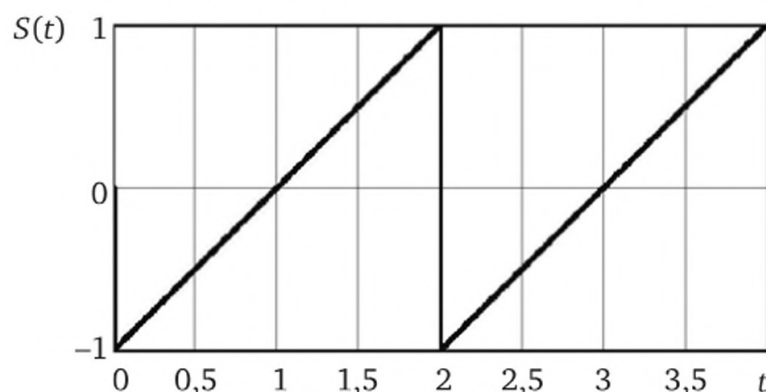


Рис. 4.10. Вид исходного сигнала

По такому же закону при частотной модуляции будет меняться частота модулированного колебания. Вид частотно-модулированного колебания, соответствующего исходному сигналу рис. 4.10, показан на рис. 4.11.

Хорошо видно, что расстояние между нулями изменяются. Однако между этими точками аргумент косинуса нелинейным образом изменяется во времени. Для такого колебания обычное понятие частоты теряет смысл, а это означает, что сигнал $S(t)$ невозможно восстановить. Положение можно поправить, если потребовать, чтобы частота несущего колебания очень мало менялась за время его периода. Это требование гораздо более жесткое, чем для АМ-колебания. Для надеж-

¹ Частотная модуляция предложена Э. Армстронгом. В 1933 г. он получил патент на этот вид модуляции.

ного восстановления информации частота несущего колебания должна быть в несколько сотен раз выше частоты передаваемого сигнала. Так для передачи звукового сигнала с частотой 10 кГц несущая частота должна быть порядка 10 МГц. Спектр колебания с частотной модуляцией имеет очень сложный вид. Вам расскажут о нем в специальных дисциплинах.

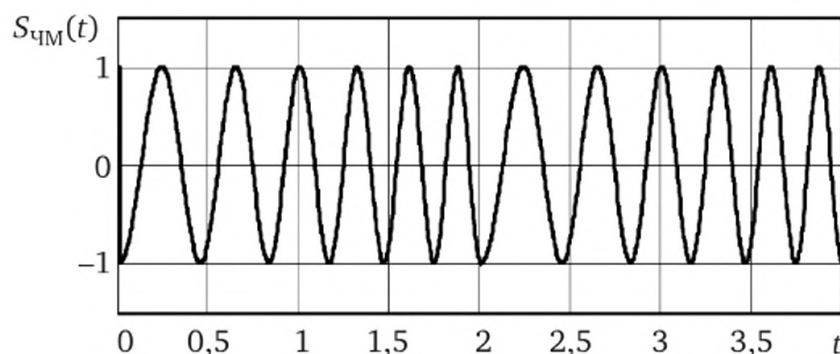


Рис. 4.11. Частотно-модулированный сигнал

Основное преимущество частотной модуляции состоит в меньшем влиянии помех на качество передачи информации. Обычно помехи складываются с полезным сигналом и искажают закон изменения во времени его огибающей, мало влияя на его частоту¹. Именно по этой причине высококачественное вещание ведется с использованием частотной модуляции.

Частотная модуляция используется для высококачественного радиовещания на ультракоротких волнах (частоты порядка 100 МГц)². Звуковое сопровождение в телевизионном вещании передается также с помощью частотной модуляции.

Фазовая модуляция используется в ограниченном числе специальных случаев. Поэтому оставим ее изучение на более позднее время.

Как видите, гармонические функции широко используются при решении практических задач радиосвязи.

Поэтому вы должны хорошо знать основные положения элементарной геометрии и тригонометрии и уметь их применять. Курс высшей математики существенно расширит ваши знания и умения в этих областях.

¹ Во всех телевизионных стандартах изображение передается с помощью одной из разновидностей амплитудной модуляции, а звуковое сопровождение — с помощью частотной. Поэтому помехи почти не действуют на звук, но сильно сказываются на качестве изображения. Вы можете наблюдать это различие при приеме телевизионного сигнала за городской чертой на внешнюю антенну. В городе применяется кабельное телевидение, и действие помех сведено к минимуму.

² Так, что «105 FM» (англ. «One O Five FM», а не смесь русского с английским «Сто пять ФМ»!) — это всего лишь англоязычная аббревиатура вещания на частоте 105 МГц с частотной модуляцией (*Frequency Modulation*). В русском варианте — «УКВ ЧМ на частоте 105 МГц» (длинновато, но правильно).

Контрольные вопросы и задачи к главе 4

1. Изобразите гармоническое колебание и дайте определения его параметров.
2. Гармоническое колебание имеет вид

$$u(t) = 4\cos(2\pi t + 45^\circ).$$

Чему равны численные значения его параметров?

3. Изобразите график колебания задачи 2, по возможности соблюдая масштабы по осям.
4. Гармоническое колебание с частотой 1 кГц и амплитудой 5 В имеет начальную фазу 60° . Выполните эскиз этого колебания, по возможности соблюдая масштабы по осям.
5. Используя векторное представление гармонических колебаний, найдите сумму трех следующих колебаний $2\cos(\omega t + 120^\circ)$, $2\cos(\omega t + 120^\circ)$ и $2\cos(\omega t + 120^\circ)$.
6. На рис. 4.12 показана векторная диаграмма гармонического колебания с частотой 10 кГц. Запишите его аналитическое представление. Найдите время запаздывания этого колебания.

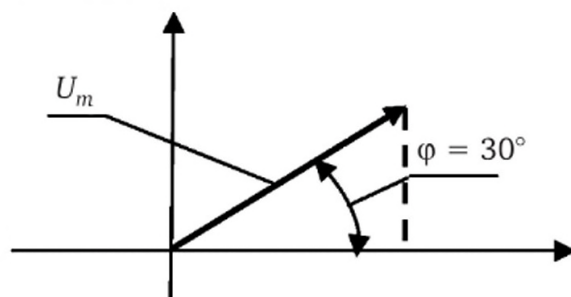


Рис. 4.12. Векторная диаграмма гармонического колебания

7. Изобразите график колебания задачи 6, по возможности соблюдая масштабы по осям.
8. Гармоническое колебание с частотой 100 кГц и амплитудой 5 В промоделировано по амплитуде гармоническим сигналом с частотой 10 кГц с коэффициентом модуляции $M = 0,5$. Выполните эскиз этого колебания, по возможности соблюдая масштабы по осям.
9. Изобразите спектр сигнала задачи 8.
10. Выведите формулу для определения коэффициента модуляции АМ-колебания через максимальное $U_{\text{макс}}$ и минимальное $U_{\text{мин}}$ значение его амплитуды.
11. Амплитуда несущего колебания 1 В, частота — 100 кГц. Он промоделирован по амплитуде гармоническим колебанием с частотой 10 кГц. Максимальное значение колебания равно 1,8 В, а минимальное — 0,2 В. Изобразите это колебание, по возможности соблюдая масштабы по осям. Найдите значение коэффициента модуляции.
12. Последовательность положительных импульсов длительность 10 мкс и периодом 20 мкс, передается с помощью амплитудной модуляции несущего колебания с частотой 1 МГц. Выполните эскиз этого колебания, по возможности соблюдая масштабы по осям.
13. Колебание с угловой модуляцией имеет вид

$$u(t) = \cos[\omega_0 t + m\cos(\Omega t)],$$

где m — так называемый, индекс модуляции. Используя приложение 13 и таблицу П.15, получите выражения для этого колебания с точностью до первой степени m .

14. Используя результат задачи 13, постройте приближенный спектр колебания с угловой модуляцией для малых значений m .

5. Электромагнитные поля и волны как носители информации

Электромагнитные поля и волны оказались очень удобным носителем информации. Это, прежде всего, связано с тем, что они способны распространяться в свободном пространстве со скоростью $c \approx 3 \cdot 10^8$ м (300 тыс. км) в секунду.


Свойства электромагнитных волн теоретически описал в 1873 году Дж. Максвелл. Уравнения Максвелла показывают, что распространение электромагнитных волн сопровождается непрерывным превращением переменных электрического и магнитного полей друг в друга. Превращение требует времени и поэтому скорость движения поля велика, но конечна. Это чрезвычайно важное обстоятельство в формировании современного представления об окружающем нас мире.

Дело в том, что до появления теории Максвелла существовала теория дальнего действия. Эта теория основывается на том, что тела взаимодействуют друг с другом посредством механических сил, на любом расстоянии, и действие этих сил передается между ними с бесконечно большой скоростью. Из уравнений Максвелла следует, что силовое взаимодействие тел на расстоянии происходит посредством электромагнитного поля, которое распространяется с конечной скоростью (близкое действие).

Первоначально передача воздействия через пустоту казалась невозможной. Поэтому некоторое время считалось, что электромагнитные волны, наподобие акустических волн, распространяются в некоторой материальной среде — эфире¹.

В 1881 г. и 1887 г. А. А. Майкельсон² провел тщательные эксперименты, с помощью которых он пытался найти разницу в скорости рас-

¹ **Эфир** (светоносный эфир, др. греч. αἰθήρ — верхний слой воздуха; лат. *aether*) — термин, обозначавший в истории физики гипотетическую всепроникающую среду, колебания которой обнаруживают себя как свет или электромагнитные волны. Изначально, в древнегреческой мифологии термин «эфир» обозначал верхний (горный), особо тонкий (разреженный), прозрачный и лучезарный слой воздуха, которым дышат боги. Следовательно, этот термин может иметь только единственное число. Поэтому штампы, внедренные в словесную практику журналистами типа «прямой эфир», «наш эфир» и т. п., выглядят более чем странно. В отечественной радиотехнической практике используется оборот «выйти в эфир». Это аналог английского оборота «*In air*», предупреждающего всех участников передачи о начале радиовещания — выходе в эфир.

² **Альберт Абрахам Майкельсон** (англ. *Albert Abraham Michelson*, (1852—1931)) — американский физик. Известен изобретением интерферометра, названного его 

пространения света вдоль и поперек направления орбитального движения Земли. В его опытах и последующих опытах других исследователей разность скоростей не была обнаружена. Таким образом, для объяснения распространения электромагнитных волн в привлечении теории эфира нет необходимости¹.

Важно, что волны приходящие от разных источников необходимо складывать с учетом их запаздывания, т. е. так, как мы с вами делали в разделе 4.1. Это существенно усложняет картину многих явлений. С такими явлениями мы с вами познакомимся в следующих разделах.

5.1. Математическая модель электромагнитной волны

Простейшая математическая модель электромагнитной волны имеет вид так называемой плоской монохроматической волны. Поля *плоской волны* зависят только от времени и одной пространственной координаты, вдоль которой она движется. С учетом запаздывания гармоническое колебание, описывающее монохроматическую плоскую волну (любой физической природы), которая движется вдоль оси z , имеет вид

$$u(t, z) = U \cos \left[\omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \right].$$

Из повседневной практики вы знаете, что запаздывание во времени движущегося объекта однозначно связано с пройденным расстоянием. Волна за время, равное периоду колебания T , проходит путь равный

$$z_T = Tc = \frac{c}{f} = \lambda.$$

Эту величину называют *длиной волны*. Наблюдая за волнами, бегающими на берег, вы без труда определите длину волны, как расстояние между ее гребнями. Для электромагнитных волн все было бы так же, если бы мы могли видеть электрическое или магнитное поле.

Запаздывание гармонического колебания во времени можно преобразовать в запаздывание по фазе

$$u(t, z) = U \cos \left[\omega \left(t - \frac{z}{c} \right) \right] = U \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{z}{\lambda} \right).$$

☞ именем, и прецизионными измерениями скорости света. Лауреат Нобелевской премии по физике (1907).

¹ Это не означает, что теория эфира отвергнута. Современная наука не запрещает ей появляться в неканонических теориях пространства-времени. Неоспоримо одно — эфир нельзя наделять свойствами классической материи. Однако в популярной и околонаучной литературе, а также в Интернете, регулярно появляются все новые и новые теории эфира. Их беда в том, что они не имеют экспериментального подтверждения и противоречат известным опытным данным. Однако хорошо известно, что критерием истины является практика.

Движение волны в пространстве можно изобразить в виде векторной диаграммы так же, как мы это делали выше. Если волна пройдет расстояние, равное длине волны, то вектор на рис. 5.1 совершит полный оборот (сравни рис. 4.2 и рис. 5.1).

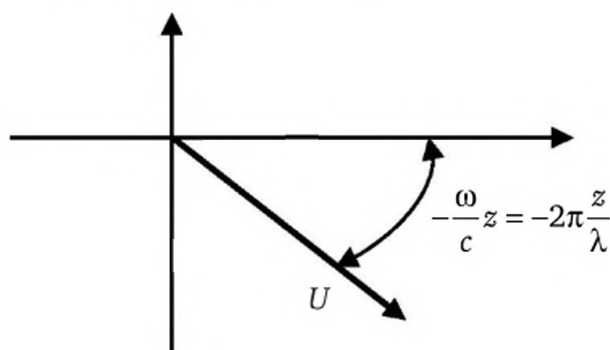


Рис. 5.1. Векторная диаграмма электромагнитной волны

Распространение электромагнитных волн сопровождается несколькими чрезвычайно важными явлениями, которые во многом определили, и определяют принципы их практического использования. Поскольку свет является частным случаем электромагнитных волн, то эти явления впервые наблюдали и исследовали в оптике. Именно поэтому они излагаются в школьном курсе физики. Однако волны другой физической природы обладают схожими свойствами и поэтому явления, о которых пойдет речь, имеют аналоги, например, в акустике.

5.2. Отражение и преломление электромагнитных волн

Отражение электромагнитных волн происходит на границе раздела двух сред, обладающих разными свойствами. Это явление хорошо известно с древних времен. Впервые закон отражения упоминается в работах Евклида¹. Широко распространенная формулировка «угол падения равен углу отражения» не вполне точна, но, тем не менее, передает основное содержание закона. На рис. 5.2 приведена иллюстрация отражения луча от зеркальной поверхности.

Закон отражения является следствием действия принципа, сформулированного П. Ферма². Согласно этому принципу луч света дол-

¹ **Евклид** (ок. 365-ок. 300 до н. э.) — древнегреческий математик. Работал в Александрии в III веке до новой эры. Главный труд «Начала» (15 книг), который содержит изложение планиметрии, стереометрии и ряда вопросов теории чисел, алгебры, метода определения площадей и объемов.

² **Пьер де Ферма** (фр. *Pierre de Fermat*, 1601—1665) — французский математик, один из создателей аналитической геометрии, математического анализа, теории вероятностей и теории чисел. Наиболее известен формулировкой «Великой теоремы Ферма». Принцип Ферма является частным случаем более общего экстремального физического принципа, согласно которого: «Система ведет себя таким образом, чтобы некоторая величина принимала минимальное (реже: максимальное) возможное значение».

жен двигаться из начальной точки в конечную так, чтобы достичь ее за минимально возможное время.

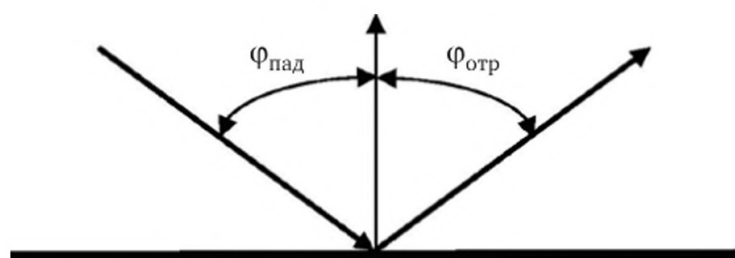


Рис. 5.2. Геометрия отражения волн

Закон отражения справедлив не только для зеркальных поверхностей, но и для границы двух сред, частично отражающей свет. Однако в этом случае, он не дает никаких сведений об интенсивности отраженного света.

Преломление электромагнитных волн происходит при прохождении ими границы раздела двух сред. Свое название явление получило от наблюдаемого изменения хода луча света после пересечения им границы раздела (см. рис. 5.3).

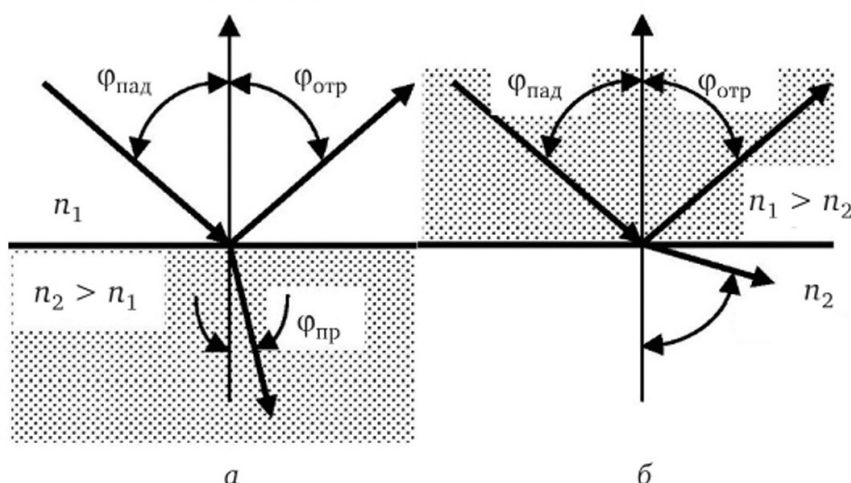


Рис. 5.3. Геометрия отражения и преломления волн

Закон преломления был установлен экспериментально в 1621 г. В. Снеллом¹, но был опубликован только после его смерти. Закон утверждает, что при любом угле падения луча на границу раздела двух сред отношение

$$\frac{\sin(\varphi_{\text{пад}})}{\sin(\varphi_{\text{пр}})}$$

является постоянной величиной, зависящей только от свойств граничащих сред. Это позволило ввести понятие показателя преломле-

¹ Виллеброрд Снелл (нидерл. Willebrord Snel van Royen, 1580—1626) — голландский математик, физик и астроном. Известен также под латинизированным именем Снеллиус.

ния n , с использованием которого этот закон записывается в следующем виде¹:

$$\frac{\sin(\varphi_{\text{пад}})}{\sin(\varphi_{\text{пр}})} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Угол преломления меньше угла падения, если $n_1 < n_2$ (рис. 5.3, а), например, при падении луча из воздуха на поверхность воды.

Если же $n_1 > n_2$, то $\varphi_{\text{пр}} > \varphi_{\text{пад}}$ (рис. 5.3, б). В этом случае при некотором угле падения преломленный луч скользит по границе раздела и энергия не покидает первую среду. Следовательно, коэффициент отражения становится равным единице. Это явление получило название явления полного внутреннего отражения. Область существования явления полного внутреннего отражения определяется соотношением

$$\varphi_{\text{пад}} \geq \varphi_{\text{по}} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right).$$

В 1637 г вышел в свет труд Р. Декарта² «Диоптрика», где излагается идея эфира, как переносчика света, дается теоретическое доказательство закона преломления, которое было высказано им еще в 1630 году.

Описание законов отражения и преломления с принципиально отличающихся физических позиций было дано И. Ньютоном³ и Х. Гюйгенсом⁴.

5.3. Интерференция электромагнитных волн

Интерференция волн (лат. *inter* — между, *ferens* (*ferentis*) — несущий, переносящий) связана со сложением в данной точке пространства когерентных гармонических колебаний, имеющих разные фазы. Разность фаз в большинстве случаев вызвана разностью путей, пройденных волнами. На рис. 5. 4 приведена геометрия задачи о сложения прямой и отраженной волны.

¹ Этот закон также является следствием принципа Ферма. Попробуйте его вывести, используя это принцип.

² **Рене Декарт** (фр. *Ren Descartes*, лат. *Renatus Cartesius* — Картезий, 1596—1650) — французский математик, философ, физик и физиолог, создатель аналитической геометрии и современной алгебраической символики, автор метода радикального сомнения в философии, механицизма в физике.

³ **Сэр Исаак Ньютон** (англ. *Sir Isaac Newton*, 1642—1727) — великий британский физик, математик и астроном. Автор фундаментального труда «Математические начала натуральной философии», в котором он описал закон всемирного тяготения и так называемые Законы Ньютона, заложившие основы классической механики. Разработал дифференциальное и интегральное исчисление, теорию цветности и многие другие математические и физические теории.

⁴ **Христиан Гюйгенс фон Цюйлихен** (нидерл. *Christiaan Huygens*, 1629—1695) — голландский математик, физик, астроном и изобретатель.

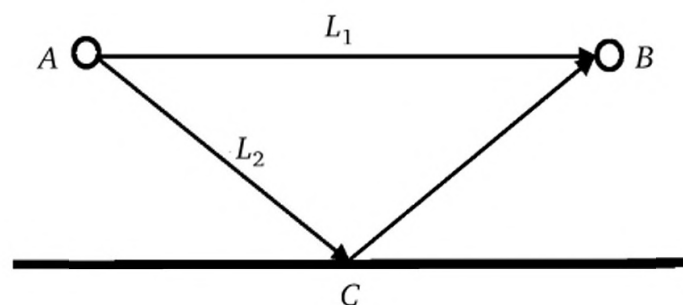


Рис. 5.4. Интерференция волн

В точке наблюдения B необходимо сложить два гармонических колебания. Для электрического поля электромагнитной волны это выглядит так

$$E(t) = E_1 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{L_1}{\lambda}\right) + E_2 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{L_2}{\lambda}\right).$$

Ради простоты положим, что амплитуды волн равны друг другу $E_1 = E_2 = E$ и без потери общности будем также считать

$$\frac{L_1}{\lambda} = N, \text{ а } \frac{L_2}{\lambda} = N + \frac{\Delta L}{\lambda}.$$

Тогда

$$E(t) = E \left[\cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}\right) \right].$$

Для иллюстрации явления интерференции удобно воспользоваться векторной диаграммой. Результат сложения волн в векторной форме показан на рис. 5.5.

Вектор первой волны (первое слагаемое) неподвижен, а вектор второй — вращается по часовой стрелке. Он отстает по фазе от первого на величину $2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}$. При изменении разности хода волн конец суммарного вектора движется по окружности. Если амплитуды волн равны, то окружность касается начала координат и при некоторой разности ΔL поле $E(t) = 0$.

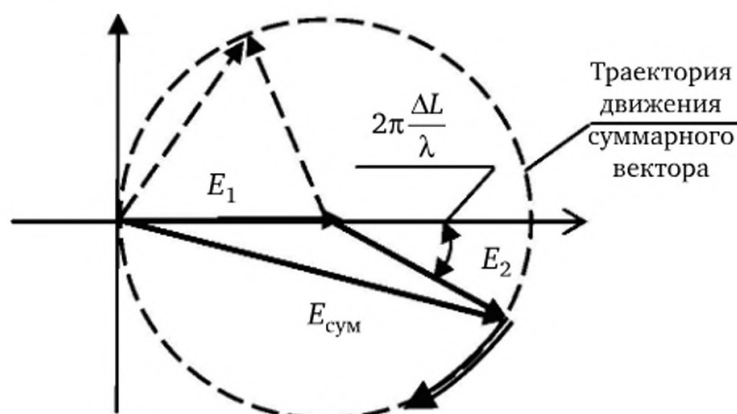


Рис. 5.5. Векторная диаграмма, поясняющая явление интерференции

На рис. 5.6 показана зависимость амплитуды суммарного поля от разности хода лучей, выраженной в долях длины волны.

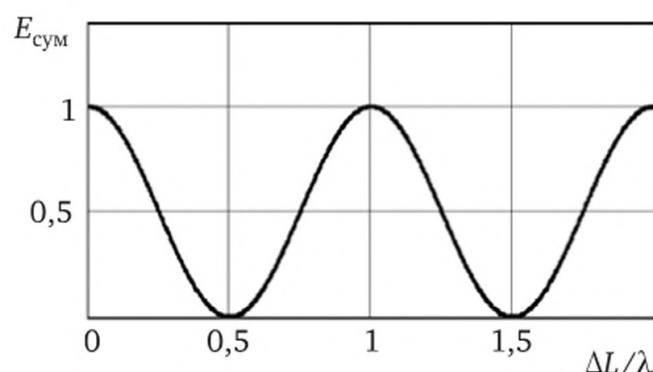


Рис. 5.6. Зависимость интенсивности суммарного поля от разности хода лучей

Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону. Он наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны (рис. 5.7, а). Разница хода лучей приблизительно равна зазору h между линзой и пластиной. Интерференция волн создавала картину в виде концентрических колец, получивших название колец Ньютона (рис. 5.7, б). На рис. 5.7, б слева изображена картина интерференции зеленого света ($\lambda \approx 0,5$ мкм), а справа — красного ($\lambda \approx 0,7$ мкм).

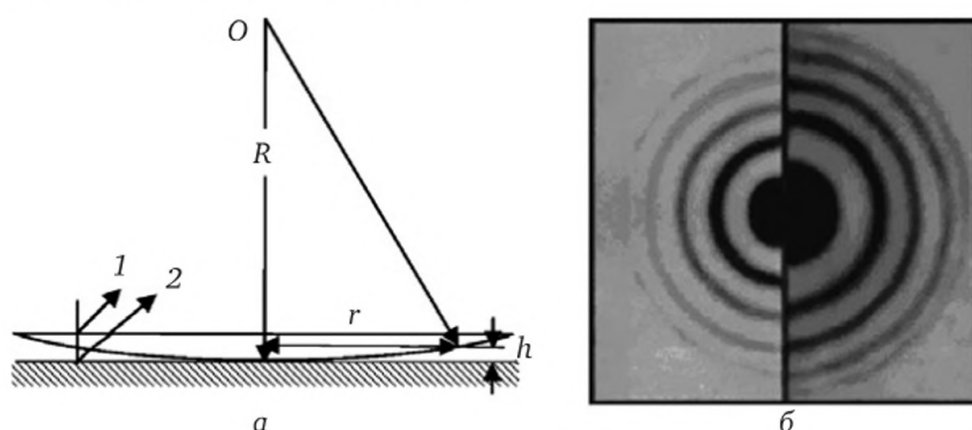


Рис. 5.7. Опыт И. Ньютона:

а — ход лучей, б — картина интерференции (кольца Ньютона) для света двух длин волн

Исторически первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, стал опыт Т. Юнга¹. В 1801 г. он наблюдал интерференцию света с помощью установки, изображенной на рис. 5.8.

¹ **Томас Юнг** (англ. *Thomas Young*, 1773—1829) — британский физик, врач, астроном и востоковед, один из создателей волновой теории света.

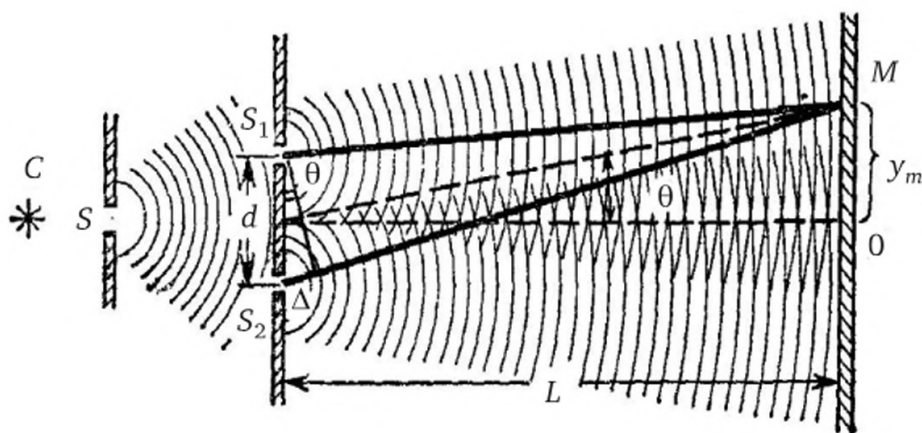


Рис. 5.8. Схема опыта Т. Юнга:

C — источник света, S — щель, формирующая первичный пучок света, S_1 и S_2 — вторичные источники волн, M — экран

В области перекрытия световых пучков наблюдалась картина в виде чередующихся светлых и темных полос. Т. Юнг правильно объяснил ее происхождение, как явление интерференции волн. Связав разность хода лучей Δ с расстоянием между щелями d и расстоянием до экрана L , он нашел положение максимумов y_m . Это позволило по экспериментальным данным вычислить длину волны λ , получив значение $\lambda \approx 0,5$ мкм (длину волны желтого света), сравнить ее со спектральными данными источника света C .

Интерференция наблюдается при сложении когерентных, монохроматических волн (когерентность — лат. *cohaerentia* — сцепление, связь). Если убрать в схеме рис. 5.8 первый экран, то интерференционная картина пропадет, так как источники S_1 и S_2 будут излучать некогерентные волны. Радиоволны это колебания с высокой степенью когерентности. Поэтому их интерференция наблюдается в естественных условиях. С появлением лазеров — когерентных источников света — интерференция оптического излучения перестала быть уникальным явлением, которое требует недюжинного экспериментального мастерства¹.

Явление интерференции радиоволн можно наблюдать самостоятельно при приеме телевизионного сигнала на внешнюю антенну за пределами города. Если вы взгляните на рис. 5.9, то поймете причину замираний сигналов изображения в показанной на нем ситуации.

Действительно схема рис. 5.9 мало чем отличается от схемы на рис. 5.4. Отличие только в том, что самолет движется, и разность хода лучей изменяется во времени.

В результате интенсивность сигнала в точке приема также меняется во времени. Это явление называют замиранием. В результате замирания сигнала изображение на экране будет мерцать². Задавшись высо-

¹ Интерференция лазерного излучения используется в микроэлектронике для создания периодических структур с размерами в сотни нанометров.

² Изображение передается с помощью амплитудной модуляции, а звук — частотной. Поэтому замирания слабо влияют на звуковое сопровождение.

той полета (10 км), скоростью самолета (800 км в час) и расстоянием до телецентра (50 км), вы легко сможете найти частоту мерцания экрана при приеме сигнала 1-го телевизионного канала ($\lambda \approx 6$ м).

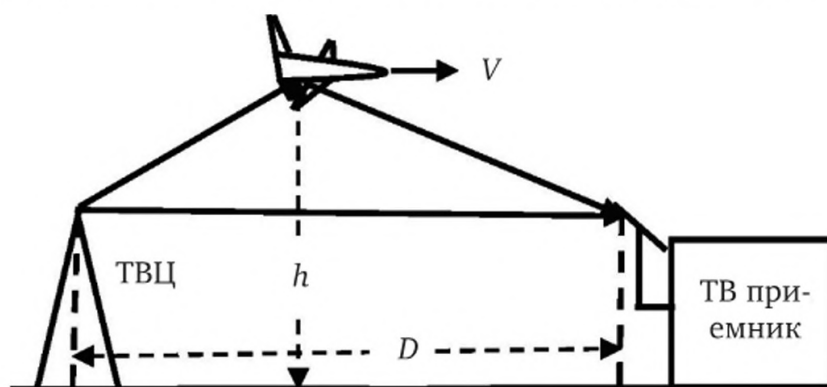


Рис. 5.9. Интерференция телевизионного сигнала

5.4. Дифракция электромагнитных волн

Дифракция (лат. *diffractus* — разломанный) — явление, которое можно рассматривать как отклонение света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени.

Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина — система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос. Характер картины свидетельствует от тесной связи дифракции с явлением интерференции.

В современном, более широком толковании, с дифракцией связывают весьма широкий круг явлений, возникающих при распространении волн и проявляющихся в преобразовании пространственной структуры волн. Подобные изменения наблюдаются не только в классических условиях, но и в неоднородных средах, а также при распространении ограниченных в пространстве пучков волн.

Оптические дифракционные явления были хорошо известны еще во времена И. Ньютона, но объяснить их на основе корпускулярной теории света оказалось невозможным. Первое качественное объяснение явления дифракции на основе волновых представлений было дано Т. Юнгом. Независимо от него О. Френель¹ развил количествен-

¹ Огюстен Жан Френель (фр. *Augustin-Jean Fresnel*, 1788—1827) — французский физик, один из создателей волновой теории света. Его имя внесено в список величайших ученых Франции, размещенный на 1-ом этаже Эйфелевой башни.

ную теорию дифракционных явлений (1818 г.). В основу теории О. Френель положил принцип Гюйгенса, дополнив его идеей об интерференции вторичных волн.

Принцип Гюйгенса в его первоначальном виде позволял находить только положения волновых фронтов в последовательные моменты времени, то есть определять направление распространения волны. По существу, это был принцип геометрической оптики. Гипотезу Гюйгенса о огибающей вторичных волн О. Френель заменил физически ясным положением, согласно которому вторичные волны, приходя в точку наблюдения, интерферируют друг с другом. Принцип Гюйгенса-Френеля представлял собой определенную гипотезу, но последующий опыт подтвердил ее справедливость¹. Воспользуемся этим принципом и нашими представлениями о гармонических колебаниях для выяснения сути явления дифракции.

Рассмотрим дифракцию волны на отверстии в экране диаметром D . Геометрия задачи показана рис. 5.10. В точке наблюдения с координатами (z, x) , находящейся в области тени, надо сложить вторичные волны, возникающие в плоскости отверстия. Воспользуемся для этого векторной диаграммой. Ради простоты ограничимся сложением пяти вторичных волн.

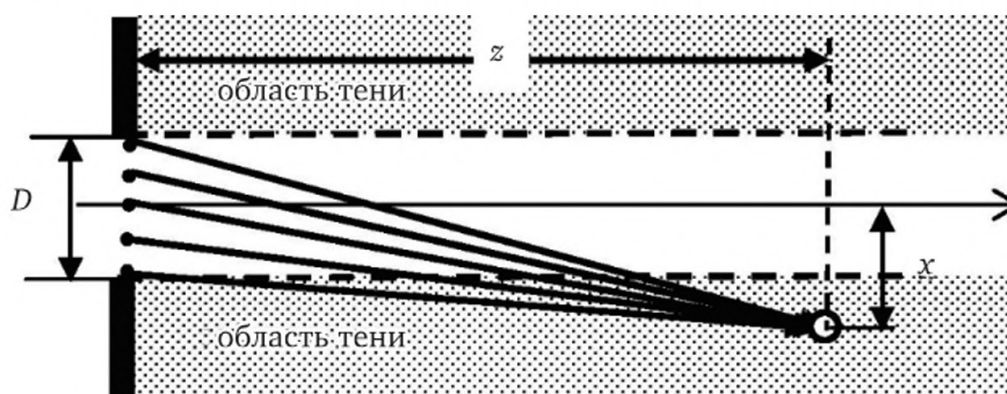


Рис. 5.10. Дифракция на отверстии

На рис. 5.11 изображена векторная диаграмма, иллюстрирующая сложения пяти вторичных волн. Поскольку на самом деле число вторичных волн бесконечно, то ломаная линия превращается в плавную кривую.

Приведенный пример показывает, что в общем случае поле в области тени не равно нулю, что и составляет физическую сущность явления дифракции. При некоторых соотношениях между D , x , z и λ векторная сумма может обращаться в нуль, а при других — достигать максимума. Это и означает, что в пространстве тени возникает чередование светлых и темных областей.

¹ Любая физическая теория является гипотезой. Экспериментальное подтверждение положений теории открывает путь к ее широкому использованию. И тогда гипотеза приобретает статус физического закона.

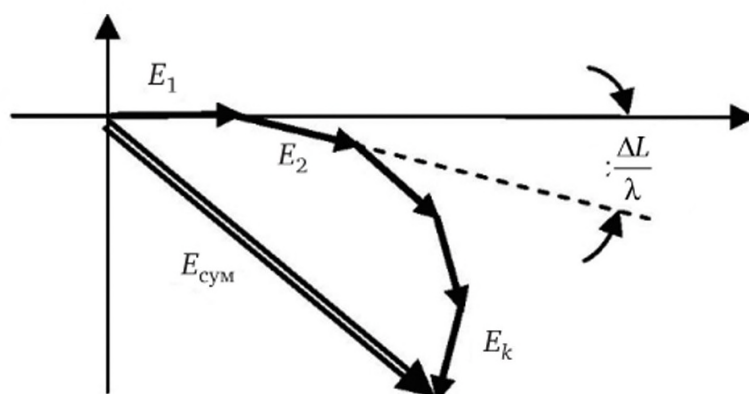


Рис. 5.11. Векторная диаграмма, поясняющая явление дифракции

Оценим положение точки (z_0, x_0) , в которой амплитуда волны равна нулю. Для оценки нам достаточно сложить две вторичные волны, выходящие с краев отверстия. Эти волны будут давать в сумме нуль, если разность хода ΔL будет равна $(k + 0,5)\lambda$. Ограничимся определением первого нуля, для которого $\Delta L = \lambda/2$. Согласно рис. 5.10 разность хода ΔL равна

$$\Delta L = \sqrt{z^2 + (x + 0,5D)^2} - \sqrt{z^2 + (x - 0,5D)^2}.$$

Найдем ΔL на очень большом удалении от экрана, где $z \gg D$ и $z \gg x$. В этом случае

$$\Delta L \approx \frac{Dx}{z},$$

а положение точки, в которой $E_{\text{сум}} = 0$

$$x_0 = \frac{\lambda z}{2D}.$$

Координату x_0 можно принять за границу первой светлой зоны. Таким образом, дифракция увеличивает сечение волнового пучка. Отношение x_0 к z дает оценку дифракционной расходимости пучка $\varphi_{\text{диф}}$

$$\text{tg}(\varphi_{\text{диф}}) = \frac{x_0}{z} = \frac{\lambda}{2D}.$$

Хорошо видно, что дифракционные эффекты зависят от соотношения между длиной волны и характерным размером неоднородностей среды либо неоднородностей структуры самой волны. Наиболее сильно они проявляются при размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны. При размерах неоднородностей существенно превышающих длину волны (на 3—4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь. В последнем случае распространение волн с достаточной степенью точности описывается законами геометрической оптики, о которой шла речь в школьном курсе физики, и которая согласуется с нашим повседневным опытом.

Теперь вы сможете оценить, например, размер светового пятна на поверхности Луны ($z \approx 380000$ км), возникающего при ее облучении лазером ($D \approx 1$ см, $\lambda \approx 0,6$ мкм)¹. А каков будет размер пятна при использовании антенны диаметром 60 м, излучающей радиоволну с $\lambda \approx 3$ см?

Как видите, электромагнитные поля проявляют себя самыми разнообразными физическими явлениями.

Поскольку радиоволны и волны оптического диапазона широко используются для передачи информации, радиоинженер должен хорошо знать физику волновых процессов и владеть навыками решения математических задач, связанных с передачей информации по каналам связи. Курсы математики и физики существенно расширят ваши знания в этих областях.

Контрольные вопросы и задачи к главе 5

1. Почему электромагнитные волны являются удобным носителем информации?
2. Расстояние от Земли до Солнца около 150 млн. км. Найдите время, которое потребуется свету, чтобы преодолеть это расстояние.
3. Что такое длина волны и как она связана с частотой колебаний?
4. Пусть в точке $z = 0$ волна электрического поля изменяется по закону

$$E(t, 0) = \cos(\omega t)$$

Изобразите на одном графике изменения поля E во времени на расстояниях $z = 0,25\lambda; 0,5\lambda; 0,75\lambda$.

5. Показатель преломления воды $n = 1,33$. Свет падает на границу раздела под углом 45° . Найдите угол преломления для случая, когда свет падает из воздуха в воду и — из воды в воздух. В расчетах используйте приемы, описанные в приложении 11.

6. Что такое явление полного внутреннего отражения.
7. Что такое интерференция волн?
8. Оцените частоту замирания телевизионного сигнала для ситуации, изображенной на рис. 5.9. Примите высоту полета равной 10 км, скоростью самолета — 800 км в час расстоянием до телецентра — 50 км и частоту несущего колебания — 50 МГц.
9. Рассчитайте расстояние между максимумами в опыте Т. Юнга (см. рис. 5.8) для излучения с длиной волны 0,6 мкм, если щели находятся на расстоянии 1 см, а экран — на расстоянии 1 м.
10. Что такое дифракция волн?
11. Рассчитайте размер пятна рубинового лазера на поверхности Луны, если его поперечник $D = 1$ см, а длина волны излучения $\lambda = 0,69$ мкм. Расстояние от Земли до Луны около 380 тыс. км.
12. Повторите расчет для радиотелескопа с диаметром антенны 60 м, работающего на длине волны 3 см.

¹ На самом деле размер пятна больше расчетного, поскольку лазерное излучение не вполне когерентно.

6. Распространение радиоволн в земных условиях

Радиосвязь появилась как альтернатива проводной, поскольку она не требовала затрат на сооружение линий связи. Уже в середине XX в. радиосигналы стали передавать и по специальным линиям передачи (см. главу 7), однако передача информации по естественным трассам и тогда, и сейчас доминирует в средствах связи. На то есть несколько причин.

Во-первых, радио с начала XX века стало использоваться как средство массовой информации. В те годы появилось радиовещание, которое предназначалось массовому слушателю, почти независимо от места его нахождения. В 20-х гг. XX века в СССР, с его огромной территорией, это имело особенно большое значение из-за сложностей с доставкой газет, а также в связи с низким уровнем грамотности населения. Вслед за радиовещанием появилось массовое телевизионное вещание.

Во-вторых, радиоволны способны обеспечить связь с подвижными объектами — морскими судами, самолетами, космическими аппаратами и т. п. С появлением мобильной телефонии это вид связи стал тоже массовым. Радиолокация и радионавигация, спутниковая связь и телевидение используют свободно распространяющиеся радиоволны.

Условия распространения радиоволн по естественным трассам определяются многими факторами. Решающее значение имеют свойства земной поверхности и процессы, происходящие в атмосфере Земли.

6.1. Свойства земной поверхности и атмосферы Земли

Земная поверхность оказывает существенное влияние на распространение радиоволн. Она отражает радиоволны (см. раздел 5.2), при этом часть энергии поглощается. Кривизна земной поверхности (средний радиус земного шара около 6370 км) препятствует распространению радиоволн за горизонт. Радиоволны, распространяющиеся в непосредственной близости (в масштабе длины волны) от поверхности Земли, называют земными (или поверхностными) радиоволнами.

Поскольку радиоволны распространяются прямолинейно, то кривизна Земли приводит к появлению области тени. Расстояние прямой видимости зависит от высоты подъема антенн.

На рис. 6.1 показана геометрия задачи, решение которой дает следующий ответ¹

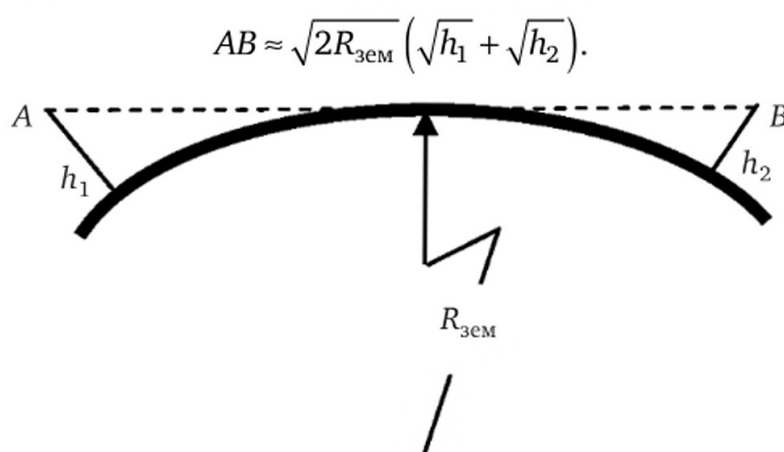


Рис. 6.1. Геометрия задачи для определения расстояния прямой видимости

Если высоты антенн подставлять в метрах, то расстояние прямой видимости в километрах равно

$$AB \approx 3,6(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$$

На самом деле, волна частично проникает в область тени за счет дифракции (см. раздел 5.4). Более подробно вы об этом узнаете позже при изучении в специальных дисциплин.

В окружающей земной шар атмосфере различают две области: нижнюю атмосферу (до ≈ 60 км) и верхнюю атмосферу (60—20000 км). Нижнюю атмосферу делят на тропосферу (до высоты около 15 км) и стратосферу (15—60 км). Верхнюю атмосферу часто называют ионосферой (см. рис. 6.2). Тропосфера и ионосфера оказывают наибольшее влияние на распространение радиоволн.

В ионосфере плотность газа весьма мала и он ионизирован, т. е. имеется большое число свободных электронов и ионов (10^9 — 10^{12} частиц в кубическом метре). В среднем эта среда электрически нейтральна и называется плазмой. Концентрация частиц меняется с высотой. Это дает основания деления ионосферы на несколько слоев (см. рис. 6.2). Слои принято обозначать латинскими буквами *D*, *E* и *F*.

Область *D* (60—90 км) характеризуется плотностями электронов 10^8 — 10^9 м⁻³. Основным ионизирующим фактором этого слоя является рентгеновское излучение Солнца. Некоторую роль играют дополнительные слабые источники ионизации: метеориты, сгорающие на высотах 60—100 км, космические лучи, а во время магнитных бурь — частицы магнитосферного происхождения. Ночью ионизация в слое *D* резко уменьшается, и он практически полностью исчезает.

¹ Решение этой задачи доступно выпускнику школы. Попробуйте получить приведенный здесь ответ.

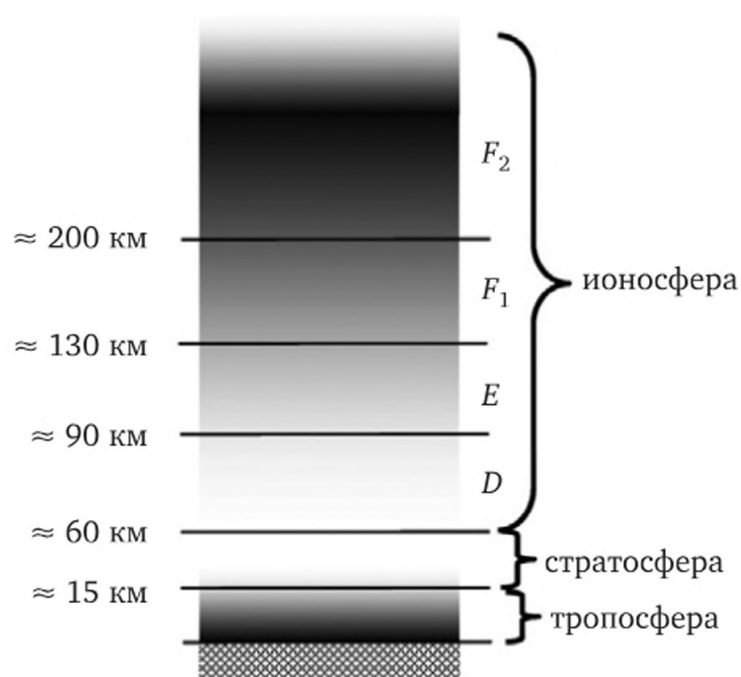


Рис. 6.2. Строение атмосферы Земли:

условные границы ионосферы указаны для дневного времени суток; плотность окраски грубо отражает концентрацию электронов в ионосфере и молекул в тропосфере

Область E (90—120 км) характеризуется плотностями около $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Рост концентрации электронов с высотой в дневное время, связан с поглощением солнечного коротковолнового излучения. Скорость рекомбинации ионов здесь велика. Поэтому с наступлением ночи концентрация электронов в области E быстро уменьшается до величины порядка 10^9 м^{-3} . Иногда случайным образом на высотах 100—110 км возникает слой E_s (спорадический), очень тонкий (всего 0,5—1 км), но очень плотный. Особенностью этого слоя является высокая концентрация электронов ($n_e \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$), которые оказывают сильное влияние на распространение радиоволн.

Областью F называют часть ионосферы выше приблизительно 130 км. Максимум образования ионов под действием солнечного коротковолнового излучения лежит на высотах 150—200 км. Однако ионы на больших высотах живут сравнительно долго, а процессы диффузии приводят к тому, что максимальная концентрация электронов и ионов в области F наблюдается на высотах 250—400 км. В дневное время мощная ионизация солнечным ультрафиолетовым излучением на этих высотах часто вызывает появление дополнительной «ступеньки» в распределении электронной концентрации с высотой, ее называют областью F_1 (150—200 км). Верхнюю часть слоя F часто называют слоем F_2 . Здесь плотность частиц днем достигает своего максимума около $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, а ночью падает до 10^{11} м^{-3} .

Приведенные значения концентрации электронов в ионосфере носят усредненный характер. Многое зависит от географических координат

точки наблюдения и времени года. Существенные изменения связаны с активностью Солнца. Мощные вспышки на Солнце так сильно изменяют состояние атмосферы, что радиосвязь может на некоторое время вообще исчезнуть.

Присутствие легко подвижных свободных электронов существенно влияет на электрические свойства плазмы и обуславливает возможность отражения радиоволн от ионосферы. Чем выше концентрация электронов в плазме, тем более высокие частоты она может отражать.

Каждый день мы с вами убеждаемся, что ионосфера полностью прозрачна для солнечного света. Это не удивительно — при концентрации частиц 10^{12} м^{-3} одна частица в среднем находится в объеме 10^{-12} м^3 , а среднее расстояние между частицами порядка 10^{-4} м (100 мкм). Это приблизительно в 200 раз больше длины волны видимого света. Поэтому свет распространяется, практически «не замечая» электронов.

Если же среднее расстояние между частицами значительно меньше длины волны, то плазма будет вести себя по отношению к электромагнитным волнам как сплошная среда. Вам хорошо известно, что в металле присутствуют свободные электроны и неподвижные ионы. Плазма также содержит свободные электроны и малоподвижные ионы, поэтому она в некотором смысле подобна металлу.

Концентрация электронов в металлах около 10^{29} м^{-3} . Как это вам не покажется странным, но экспериментально установлено, что металлы становятся прозрачными на длинах волн короче приблизительно $\lambda \approx 0,1 \text{ мкм}$ ($f \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ — ультрафиолетовое излучение).

Причина такого поведения металла связана с существованием, так называемых, плазменных колебаний, которые впервые в 1929 г. исследовал И. Ленгмюр¹. Эти колебания связаны со смещением легких электронов относительно практически неподвижных тяжелых ионов. При смещении возникает возвращающая сила Кулона, которая действует также как сила тяжести или сила пружины в механическом маятнике. Эту силу можно найти на базе школьного курса физики, а затем найти и частоту плазменных колебаний ω_0 . Наиболее дотошные могут проделать все выкладки, которые дают следующий результат

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}.$$

Если частота действующего гармонического электрического поля много меньше ω_0 , то электроны успевают следовать за полем, и свойства металл мало отличаются от его свойств на постоянном токе. В частности металл на частотах $\omega < \omega_0$ хорошо отражает электромагнитные волны. Если $\omega > \omega_0$, то раскачать электроны не удастся, так как длина волны электромагнитного поля меньше длины свободного

¹ Ирвинг Ленгмюр (англ. *Irving Langmuir*, 1881—1957) — американский химик, лауреат Нобелевской премии по химии в 1932 году.

пробега электронов. В результате поле перестает взаимодействовать с ними и свойства металла приближаются к свойствам вакуума.

Подставляя значения заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массы электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а также диэлектрической проницаемости вакуума $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$, для концентрации электронов в кб. м n_e получим

$$f_0 \approx 9\sqrt{n_e} \text{ или } \lambda_0 \approx \frac{10^{-8}}{3\sqrt{n_e}},$$

где f_0 и λ_0 — граничные значения частоты и длины волны для нормального падения волны, соответственно. При наклонном падении волн граница отражения смещается в область более коротких волн (более высоких частот).

Путем последовательного отражения от ионосферы и поверхности Земли радиоволны могут распространяться на очень большие расстояния. Радиоволны, распространяющиеся путем отражения от ионосферы, называют ионосферными волнами.

За пределами ионосферы концентрация частиц уменьшаются и на расстоянии около 5 радиусов земного шара атмосфера Земли переходит в космическое пространство, где газ полностью ионизирован, а плотность частиц составляет всего 10^6 — 10^7 м⁻³ (среднее расстояние между частицами около 1 см). Условия распространения радиоволн в космосе близки к условиям распространения в свободном пространстве (вакууме).

6.2. Диапазоны электромагнитных волн

По современным понятиям к радиоволнам относят электромагнитные колебания, длина волны которых лежит в пределах от $2 \cdot 10^{-9}$ м (2 нм) до 100 тыс. км, что соответствует частотам колебаний от $15 \cdot 10^{16}$ до 3 Гц. Широкое практическое применение находят радиоволны в диапазоне длин волн от 10 км (30 кГц) до 1 мм (300 ГГц). Хотя есть примеры уникальных систем радиосвязи, работающих и на более низких частотах, а также в оптическом диапазоне.

В зависимости от частоты колебаний одна и та же среда по-разному влияет на распространение радиоволн. Поэтому вся шкала электромагнитных волн разделяется; на диапазоны, которые введены для удобства выбора математической модели распространения радиоволн. Хотя волны каждого из диапазонов и имеют свои особенности распространения, все же резких границ между диапазонами не существует. Перечень диапазонов электромагнитных волн, границы которых согласованы с классификацией по международному соглашению, приведен в приложении 2. Мы далее будем использовать упрощенную (устаревшую) классификацию радиоволн.

Сверхдлинные волны (СДВ) — электромагнитные колебания с частотой ниже 30 кГц (длины волн более 10 км). Колебания таких низких частот используются в специальных системах связи и навигации. В частности для подземной и подводной связи.

Длинные волны (ДВ) — электромагнитные колебания с частотой от 30 до 300 кГц (длины волн 10—1 км). Длинные волны используются для радиотелеграфии, радиовещания с амплитудной модуляцией и радионавигации. В этом диапазоне созданы самые мощные радиовещательные передатчики (до ≈ 1 МВт).

Средние волны (СВ) — электромагнитные колебания с частотой от 0,3 до 3 МГц (длины волн 1000—100 м). Связь на средних волнах отличается относительной устойчивостью. Средние волны используются главным образом для радиовещания, специальной связи, включая связь с подвижными объектами, радионавигации.

Короткие волны (КВ) — электромагнитные колебания с частотой от 3 до 30 МГц (длины волн 100—10 м). Преимуществом работы на коротких волнах по сравнению с работой на более длинных волнах является то, что в этом диапазоне можно создать направленные антенны. Короткие радиоволны используются для дальней радиосвязи, подвижной связи, радиовещания, радионавигации. В КВ диапазоне выделены частоты для радиолучительской связи.

В последнее время все большее распространение находит цифровое радиовещание DRM (*Digital Radio Mondiale* — Всемирное цифровое радио). Приемник DRM имеет порт USB для передачи данных в компьютер и обновления программного обеспечения приемника. Есть среди этих станций и российская — «Голос России», которая ведет передачи на центральную и западную Европу. Вещание ведется на частоте 15,780 МГц.

Ультракороткие волны (УКВ) — электромагнитные колебания с частотой выше 30 МГц (длины волн короче 10 м). Со стороны более низких частот диапазон УКВ примыкает к коротким волнам, а со стороны высоких частот граничит с длинными инфракрасными лучами. Диапазон УКВ разбит на пять поддиапазонов:

- метровый — от 10 до 1 м (30—300 МГц),
- дециметровый — от 1 до 10 см (300—3000 МГц),
- сантиметровый — от 10 до 1 см (3000—30000 МГц),
- миллиметровый — от 10 до 1 мм (30—300 ГГц),
- субмиллиметровый (децимиллиметровый) — от 1 мм до 0,1 мм (0,3—3 ТГц).

Каждый из поддиапазонов находит применение в технике. Метровые волны используются в телевидении и радиовещании с частотной модуляцией, дециметровые и сантиметровые волны — в телевидении, радиолокации и многоканальной связи, а миллиметровые — в радиолокаторах высокого разрешения, для мониторинга состояния окружающей среды, в радиофизических исследованиях. В УКВ диапазоне выделены частоты для радиолучительской связи.

Уже достаточно давно диапазон УКВ используется для организации связи с подвижными объектами. В 50-х годах XX в. радиостанциями метрового диапазона были оснащены военные и гражданские самолеты, автомобили и железнодорожные поезда. В конце концов, это привело к появлению общедоступной мобильной сотовой радиосвязи.

Инфракрасные волны (ИК) — электромагнитные колебания с частотой от 3 до 400 ТГц (длины волн 100—0,75 мкм). Инфракрасный диапазон принято делить на три области. В литературе нет единообразия в отношении границ этих областей. Приведем один из встречающихся вариантов:

ближняя ИК область — от 0,75 до 1,5 мкм,

средняя ИК область — от 1,5 до 5,6 мкм,

дальняя ИК область — от 5,6 до 100 мкм.

В связи с продвижением границы традиционных радиоволн в направлении все более и более высоких частот, диапазон длин волн от 100—10 мкм иногда называют сантиметриллиметровым.

Волны ИК диапазона нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Системы, создаваемые для обнаружения источников излучения, значительно меньше, проще и дешевле радиолокационных систем аналогичного назначения. Простота схем и конструкций таких приборов объясняется применением оптики, что дает возможность конструировать приборы из более мелких и прочных деталей. Одним из преимуществ многих ИК систем является возможность использования собственного излучения целей, которые или сами являются источниками излучения или отражают излучение естественных источников. Такие системы называются пассивными. Активные ИК системы имеют мощный источник, излучение которого, отфильтрованное в узком участке спектра, концентрируется с помощью оптической системы и направляется в виде узкого пучка на объект наблюдения.

Оптические волны — электромагнитные колебания с частотой от 400 до 750 ТГц (длины волн 0,75—0,4 мкм), воспринимаемые человеческим глазом. Границы спектров оптических и инфракрасных волн взаимно перекрываются.

При использовании оптического и ИК диапазонов для целей связи преимуществом является возможность передачи большого количества информации, поскольку частота модуляции может достигать десятков гигагерц. Системы связи, локации и навигации оказываются защищенными от помех благодаря применению узкополосных оптических фильтров и большой направленности излучения. Эти преимущества стали еще более привлекательными в связи с созданием квантовых генераторов.

Что касается излучения еще более коротких длин волн, то вопрос о его использовании — это вопрос будущего. Работы по созданию когерентных источников таких волн продолжаются. Если, в конце концов, будут созданы практически пригодные квантовые генераторы коротко-

волнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения, то радиоинженеры продолжают свое восхождение к вершинам частотной шкалы электромагнитных волн. Не исключено, что в результате их усилий всем знакомый рентгеновский аппарат превратится в рентгеновский локатор.

6.3. Особенности распространения радиоволн различных частот

Поскольку свойства атмосферы зависят от частоты, волны различных диапазонов имеют ряд отличительных особенности распространения. Эти особенности определяют области практического использования волн различных частот.

Сверхдлинные волны слабо поглощаются при прохождении в толще суши или моря и поэтому могут проникать на глубину в несколько десятков метров. Это дает возможность их использования для связи с погруженными подводными лодками, а также для подземной радиосвязи. Существуют специальные системы связи с несущей частотой около 80 Гц.

Длинные волны при распространении земной (поверхностной) волной испытывают незначительное поглощение энергии независимо от вида и состояния земной поверхности. Кроме того, длинные волны хорошо огибают сферическую поверхность Земли, а также другие препятствия значительных размеров. Оба эти фактора обуславливают возможность распространения длинных волн земной волной на расстояние около 3000 км.

Начиная с расстояния 300—400 км, помимо земной волны, присутствует волна, отраженная от ионосферы. С увеличением расстояния амплитуда отраженной от ионосферы волны увеличивается, и на расстояниях 700—1000 км она становится соизмеримой с амплитудой земной волны. Сложение этих двух волн дает интерференционную картину.

На расстоянии свыше 2000—3000 км уже невозможно различить земную и ионосферную волны по отдельности. Распространение происходит в результате многократных отражений от поверхности Земли и нижней границы ионосферы¹. Поскольку расстояние между отражающими поверхностями сравнимо с длиной волны, приближение геометрической оптики не дает нужной точности, и задачу приходится решать с использованием уравнений Максвелла. О том, как решаются такие задачи, вы узнаете на старших курсах.

Средние волны испытывают значительное поглощение в поверхности Земли, дальность распространения земной волны ограничена расстоянием 500—700 км. На большие расстояния радиоволны распространяются ионосферной волной.

¹ Подобно волнам в волноводе, о котором пойдет речь в разделе 7.

В дневные часы на пути распространения волны расположен слой D , сильно поглощающий средние волны. Поэтому днем связь на средних волнах практически возможна только земной волной. В ночное время средние волны распространяются путем отражения от слоя E ионосферы.

В диапазоне СВ более длинные волны испытывают меньшее поглощение. Ионосферные возмущения не влияют на распространение средних волн, так как свойства слоя E мало меняются во время магнитных бурь. Это делает связь более надежной и устойчивой.

В ночные часы на некотором расстоянии от передатчика возможен приход одновременно ионосферной и поверхностной волн, причем длина пути первой из них меняется с изменением концентрации электронов в ионосфере. Интерференция этих волн приводит к замираниям сигнала. Они проявляются в нерегулярных изменениях амплитуды принимаемого сигнала.

Короткие волны могут распространяться, как земные, и не зависимо от времени суток, как ионосферные. Короткие волны слабо огибают поверхность Земли. С повышением частоты сильно возрастает поглощение волн в полупроводящей поверхности Земли. Поэтому земные волны коротковолнового диапазона распространяются на расстояния, не превышающие нескольких десятков километров. Это чуть больше расстояния прямой видимости.

Ионосферной волной короткие волны могут распространяться на многие тысячи километров путем отражения от ионосферы и поверхности Земли (см. рис. 6.3). В среднем максимальное расстояние между точками отражения в зависимости от состояния ионосферы меняется от 2000 км до 4000 км.

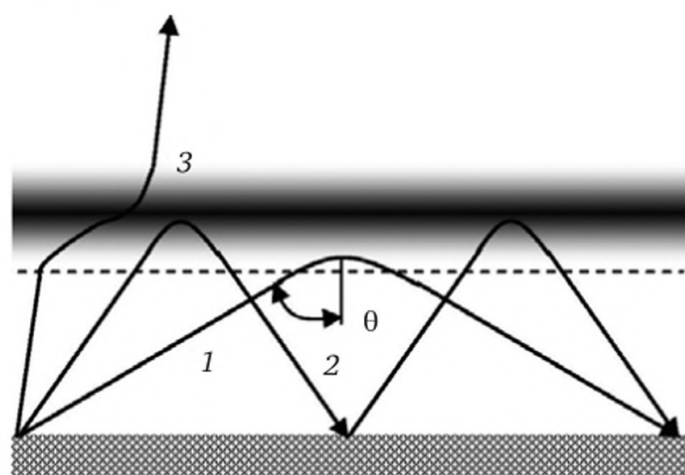


Рис. 6.3. Траектории распространения коротких волн на большие расстояния:

1 — волны, распространяющиеся за счет одного отражения от ионосферы, 2 — двух отражений от ионосферы, 3 — волна, частота которой больше f_0

Концентрация электронов в ионосфере меняется в течение суток и в течение года. Значит, изменяются условия распространения радио-

волн, что приводит к необходимости изменения рабочей длины волны. Днем работают на волнах 10—25 м, а ночью — на волнах 35—100 м. Рабочая частота для обеспечения связи между двумя точками должна быть выбрана так, чтобы луч отражался от ионосферы и попадал в точку приема. Задача осложняется тем, что ионосфера неоднородна и траектория луча имеет сложный вид (см. рис. 6.3).

Необходимость изменения длины волны усложняет аппаратуру. В каждом конкретном случае для обеспечения связи рабочая частота должна быть выбрана с учетом множества факторов, что усложняет работу операторов.

Ультракороткие волны, как правило, не отражаются от ионосферы, так как максимальная концентрация электронов в ионосфере не превосходит величины порядка 10^{12} м^{-3} . Связь на УКВ возможна только в пределах прямой видимости.

В зависимости от особенностей трассы и применяемых антенн метровые волны могут обеспечить связь на расстояния от единиц до сотен километров. Однако возможно и нерегулярное сверхдальнее распространение на расстояния свыше 1000 км.

Обычно для волн короче 10 м слой F является прозрачным. Однако в годы максимума солнечной активности электронная плотность этого слоя достигает в дневное время таких высоких значений, что часто оказывается возможной радиосвязь и на волнах длиной 6—10 м за счет отражения от ионосферы. В этих условиях в радиусе приблизительно до 2000 км возникает зона молчания, за пределами которой возможен радиоприем на расстояниях до 4000 км. Иногда прием сигналов возможен на расстоянии до 7000 км.

Кроме того, на дальность связи оказывает влияние спорадический слой E_s , имеющий электронную плотность, достаточную для отражения волн метрового диапазона. Этот слой появляется случайно. Поэтому этот вид сверхдальнего распространения радиоволн не может быть регулярным. Сверхдальнее распространение радиоволн за счет отражения от слоя E_s наблюдается чаще всего летом в дневное время в южных широтах.

Высота, на которой образуется слой E_s , составляет 100—120 км. Она определяет максимальное расстояние связи, которое равно приблизительно 2500 км. Связь осуществляется в то время, когда спорадический слой находится в средней части пути между передатчиком и приемником. Слой появляется над небольшой территорией, поэтому обычно одновременно существует связь только с одной станцией. Благодаря движению слоя через некоторое время оказывается возможной связь с другой радиостанцией. Продолжительность связи колеблется от нескольких минут до нескольких часов. Указать точно время появления отражений от слоя E_s не удастся. Поэтому попытки использования отражения от слоя E_s для регулярной связи на метровых волнах не дали положительного результата.

Распространение сантиметровых и дециметровых на большие расстояния до 200—1000 км также возможно. Это связано с рассеянием на неоднородностях тропосферы. Неоднородности — это области с коэффициентом преломления, отличающимся от коэффициента преломления окружающего пространства. Такие образования всегда присутствуют на высотах около 15 км. На рис. 6.4. показана схема такой связи.

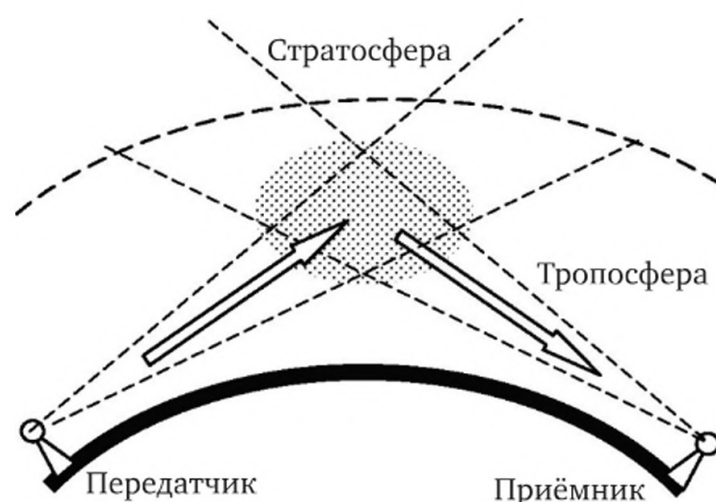


Рис. 6.4. Схема радиоканала с отражением от неоднородностей тропосферы

Схема, подобная приведенной на рис. 6.4, используется для связи за счет отражения УКВ от следов микрометеоритов, который регулярно попадают в атмосферу Земли и оставляют после себя высоко ионизированные образования на высоте около 50 км. Эти образования существуют всего несколько секунд, но этого достаточно для того, чтобы современные цифровые системы радиосвязи обеспечивали высокоскоростную передачу информации порциями.

Сантиметровые и миллиметровые радиоволны испытывают поглощение молекулами кислорода и парами воды. Зависимость погонного затухания от длины волны показана на рис. 6.5. Кроме того, значительное затухание возникает из-за поглощения энергии другими газами, при увеличении их содержания в воздухе. Это позволяет использовать миллиметровые волны для мониторинга состояния атмосферы.

При наличии осадков наряду с поглощением существенно рассеяние радиоволн. В кристаллических облаках и осадках ослабление существенно меньше, чем в капельножидких.

Использование УКВ для подвижной связи ставит новые проблемы перед радиоинженерами. В условиях городской застройки, а особенно внутри зданий, условия распространения радиоволн становятся очень сложными. Для прогнозирования существования связи и обеспечения ее надежности требуется решать задачи дифракции на многих телах, а поскольку положение приемника и передатчика произвольны, то приходится привлекать методы математической статистики.

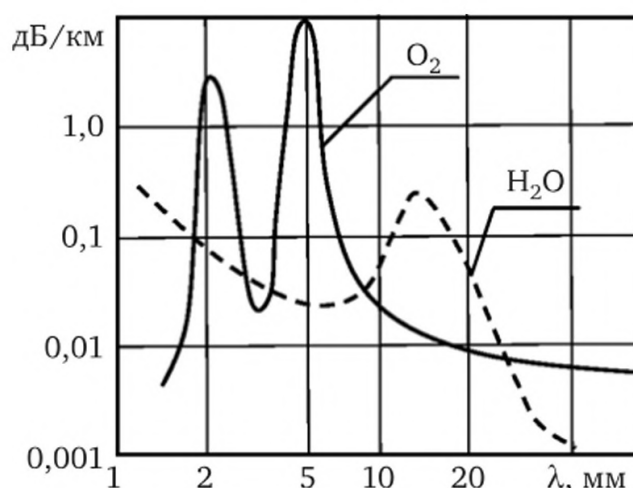


Рис. 6.5. Погонное затухание сантиметровых и миллиметровых радиоволн в атмосфере Земли

Инфракрасное и оптическое излучение возбуждается за счет энергии квантовых переходов в атомах и молекулах. Процессы излучения обратимы, поэтому молекулы и атомы способны поглощать энергию на тех же частотах. При выполнении определенных условий некогерентное излучение частиц становится когерентным. Устройства, создающие когерентное излучение за счет квантовых переходов, получили название квантовых генераторов.

В ИК диапазоне существуют полосы прозрачности: 2,0—2,5 мкм, 3,2—4,2 мкм, 4,5—5,2 мкм, 8,0—13,5 мкм. В видимой части спектра на волнах 0,75—0,4 мкм поглощение незначительное. Основное поглощающее действие оказывает водяной пар, поскольку его содержание намного превышает содержание остальных газов. Поэтому прозрачность атмосферы сильно зависит от метеорологических условий. Полосы поглощения с максимумами на длинах волн 0,93; 1,13; 1,40; 1,87; 2,74 мкм принадлежит парам воды; а 2,7 и 4,26 мкм — углекислому газу¹. На длине волны 0,76 мкм наблюдается поглощение в кислороде. Измерения показывают, что на длинах волн от 15 до 100 мкм атмосфера практически непрозрачна. На рис. 6.6 показана зависимость пропускания атмосферой излучения в диапазоне от 0,75 мкм до 14 мкм.

Оптические и ИК волны могут фокусироваться линзами и зеркалами, менять свое направление при отражении и преломлении, разлагаться в спектр призмами и дифракционными решетками. Эти волны

¹ С этими полосами поглощения связан так называемый парниковый эффект. При средней температуре около 20 °С максимум теплового излучения поверхности Земли находится на длине волны около 10 мкм. Комфортные для нас условия на Земле являются результатом существующего сейчас динамического равновесия процессов поглощения и излучения. Однако так было не всегда. Около 1 млрд. лет назад углекислого газа и геотермального тепла было так мало, что практически вся поверхность Земли была покрыта льдом. К нашему счастью приблизительно 700 млн. лет назад ситуация изменилась — вулканы взломали лед и выбросили в атмосферу значительный объем метана и углекислого газа. Тогда в атмосфере его содержалось около 6 %! Чередование ледниковых периодов (с периодом около 20 тыс. лет) — естественное геофизическое явление.

испытывают ослабление при прохождении атмосферы из-за процессов рассеяния, особенно если она насыщена водяными парами и пылью. Подобно радиоволнам, они меняют направление распространения в неоднородной атмосфере. Излучающие и отражающие тела, если они не являются источниками полезной информации, создают фон, мешающий работе оптических и ИК систем и проявляющийся как вредный шум.

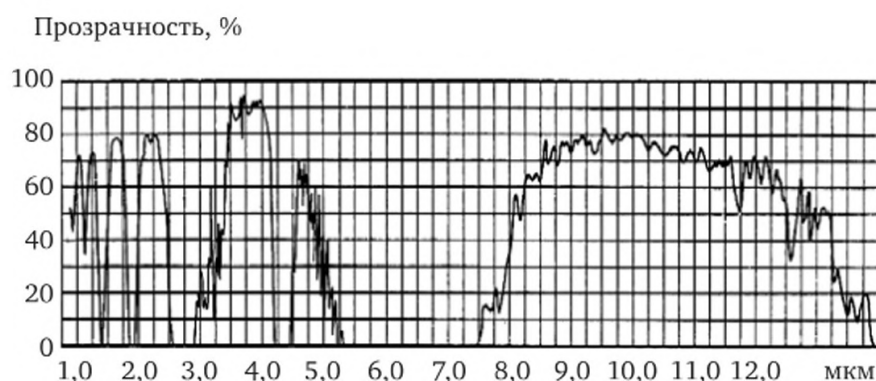


Рис. 6.6. Кривая пропускания атмосферы в области 0,6—14 мкм

Перечисленные выше особенности приводят к значительным отличиям методов анализа распространения этих волн, их регистрации и извлечения информации из сигнала. Об этих методах вы узнаете в специальных курсах.

Таким образом условия распространения электромагнитных волн весьма разнообразны. Для решения каждой конкретной практической задачи выбор рабочей частоты аппаратуры — это комплексная проблема оптимизации по совокупности технико-экономических показателей. Вы — будущие радиоинженеры должны быть готовы к ее решению.

Как видите, радиоинженер должен хорошо знать механику, строение вещества, теорию электричества и магнетизма и теорию электромагнитных волн. Для расчета трасс связи вам надо владеть методами решения задач математической физики, элементами теории электромагнитного поля, геометрической оптики и математической статистики.

Контрольные вопросы и задачи к главе 6

1. Что такое расстояние прямой видимости?
2. Найдите радиус действия Останкинского телецентра, ограниченную прямой видимостью, если высоту его антенны принять равной 500 м, а приемная антенна находится на поверхности земли.
3. Опишите строение земной атмосферы.
4. Что такое ионосфера и как она влияет на распространение радиоволн?
5. Концентрация электронов в плазме равна $n_e = 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Оцените значение граничной частоты.
6. Перечислите основные диапазоны электромагнитных волн, которые находят практическое использование в радиоэлектронике.

7. Приведите характеристики и особенности распространения длинных волн.
8. Приведите характеристики и опишите особенности распространения средних волн.
9. Приведите характеристики и опишите особенности распространения коротких волн.
10. Приведите характеристики и опишите особенности распространения ультракоротких волн.
11. Как осуществляется связь с использованием рассеяния на неоднородностях атмосферы?
12. Как осуществляется связь с использованием отражения от метеорных следов.
13. Почему миллиметровые волны можно использовать для мониторинга состояния атмосферы?
14. Полагая, что электромагнитные волны излучаются точечным источником, получите формулу, описывающую зависимость плотности потока мощности от расстояния.
15. На границе атмосферы на каждый квадратный метр поверхности падает 1,5 кВт солнечной энергии. Определите полную мощность излучения Солнца. Расстояние от Земли до Солнца примите равным 150 млн. км.
16. Расстояние от Земли до Луны в около 380 тыс. км. Используя результат задачи 9 в разделе 5, определите уровень плотности потока мощности на поверхности Луны, создаваемый радиостанцией мощностью 100 кВт.

7. Линии передачи электромагнитных волн

Линии передачи являются неотъемлемой частью канала связи. Свободно распространяющиеся радиоволны являются лишь одним из возможных ее видов радиосвязи. Такой способ имеет то преимущество, что позволяет охватить практически неограниченное число абонентов — потребителей информации. Недостатками такого способа передачи информации являются неэкономное использование мощности передатчика и мешающее действие на другие аналогичные радиосистемы.

В тех случаях, когда число абонентов ограничено и нет необходимости в широковещании, используется передача сигнала с помощью направленно излучающих антенн, а также при помощи специальных устройств, называемых линиями передачи сигнала или, короче, линиями передачи. Этот укороченный термин применяется также к линиям передачи электрической энергии, например, по магистральным высоковольтным линиям, соединяющим электростанции с городами. В нашем случае речь идет о линиях, передающих малые мощности, или, как говорили в первой половине XX века, о слаботочных информационных устройствах, имеющих свою специфику.

Линии передачи применяются как в виде магистральных линий, так и в качестве локальных (местных) линий, например для связи передатчика или приемника с антенной, а также в местных распределительных сетях. В настоящее время локальные линии связи широко используются для связи ЭВМ.

В каждом конкретном случае используется наиболее подходящий по совокупности технических качеств и экономических показателей тип линии передачи.

Рассмотрим принципы работы основных типов линий передачи сигналов, начиная с двухпроводной линии и заканчивая современной волоконно-оптической линией.

7.1. Двухпроводная линия

Двухпроводную линию начали применять еще в XIX веке, но широко используется она и сейчас для передачи телеграфных и телефонных сигналов. Эскиз двухпроводной линии приведен на рис. 7.1. Такая линия отличается от обычного соединения с помощью двух проводов тем, что ее длина L может быть больше длины волны, распространяющегося вдоль нее электромагнитного поля. Основным требованием

к конструкции линии является условие $D \ll \lambda$, где D — расстояние между проводами.

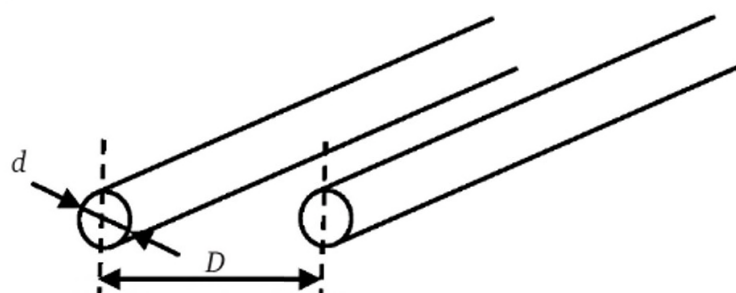


Рис. 7.1. Простейшая двухпроводная линия

Двухпроводная линия может применяться для передачи сигналов на волнах порядка десятков и более метров, что соответствует частотам в диапазоне практически от нуля до 10 МГц. Как уже говорилось, двухпроводные линии используют для передачи телеграфных и телефонных сигналов, а также для трансляции местного проводного вещания. Они также используются на антенных полях длинноволновых, средневолновых и коротковолновых радиостанций.

Основной недостаток двухпроводной линии состоит в том, что, как всякая открытая система, она допускает излучение в окружающее пространство и прием из него электромагнитных волн. Это приводит к потере мощности сигнала и воздействию внешних помех на передачу сигнала. Особенно опасны места нарушения прямолинейности линии (изломы в местах крепления проводов, изгибы из-за провисания проводов и др.). Излучение можно несколько уменьшить, перекрещивая провода (попросту скручивая их). Такая линия показана на рис. 7.2.

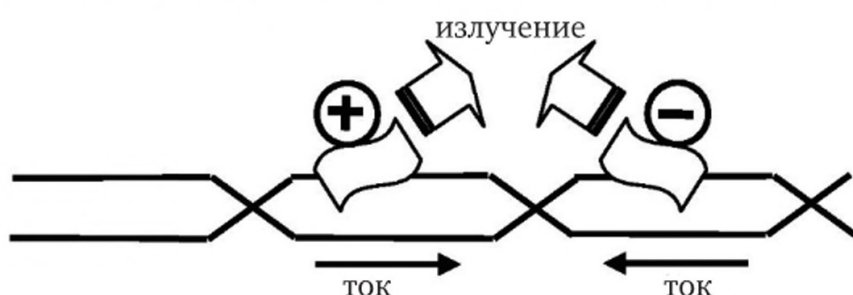


Рис. 7.2. Линия — «витая пара»

Ее соседние участки излучают электромагнитные волны в противофазе (см. раздел 5.1). Такой кабель иногда называют витой парой. Он используется, например, в локальных компьютерных сетях. Сама идея известна с 30-х годов XX века.

Перекрещивание проводов в воздушных линиях телефона и телеграфа применяется для устранения связей между соседними линиями. Еще сейчас можно увидеть двухпроводные линии связи, тянущиеся вдоль железнодорожного полотна. Если внимательно посмотреть на такую линию, то можно увидеть, как на траверсах опор меняются

местами провода. В месте смены положения провода устанавливается четыре изолятора вместо двух. Так, что витая пара была известна задолго до появления локальных линий связи ЭВМ.

7.2. Коаксиальный кабель

Электрические кабели делятся на низкочастотные и высокочастотные, одножильные и многожильные и т. д. Кабели применяются для передачи сигналов на частотах до единиц гигагерц, что соответствует длинам волн порядка 10 см. Примером высокочастотного одножильного кабеля может служить хорошо вам знакомый телевизионный кабель, соединяющий телевизионный приемник с антенной или ретрансляционным узлом. Сейчас в городах для телевизионного вещания в подавляющем числе случаев используются кабельные сети (кабельное телевидение). В таких сетях используют высокочастотный коаксиальный кабель с малыми потерями.

Электрический кабель, работающий на том же принципе, что и двухпроводная линия, но свободен от указанного выше недостатка, так как имеет замкнутую геометрию (см. рис. 7.3).

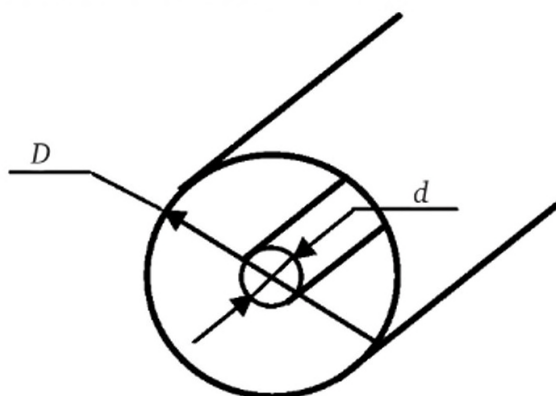


Рис. 7.3. Коаксиальный кабель

В таком кабеле один из проводов имеет цилиндрическую форму и окружает второй провод, так что поле направляемой волны оказывается закрытым внутри этого цилиндра. Центральный провод размещается коаксиально, поэтому другое название линии — коаксиальный кабель. По некоторым соображениям, о которых вы узнаете на старших курсах, D должно быть равно приблизительно $3d$.

Конструктивные требования к кабелю аналогичны требованиям, предъявляемым к двухпроводной линии. Его поперечный размер D (точнее длина средней окружности) должен быть меньше λ , в то время как на длину кабеля L никаких ограничений не накладывается.

Применению кабеля в области более коротких волн препятствуют следующие обстоятельства. С уменьшением длины волны приходится уменьшать поперечный размер кабеля и толщину центрального провода. Это связано с тем, что при $D \approx \lambda$ вдоль кабеля кроме основной

волны смогут распространяться волны, отражающиеся от проводников (паразитные волны). Такие волны двигаются «зигзагом». В приемник приходит сразу несколько сигналов на всех этих волнах с разным запаздыванием относительно друг друга. Интерференция волн искажает сигнал. Пропорциональное уменьшение поперечного сечения приводит к увеличению погонного (на единицу длины) сопротивления проводников, а, следовательно, к увеличению потерь мощности сигнала. Оказывается трудности можно преодолеть, если вообще исключить из конструкции центральный проводник.

7.3. Металлический волновод

Металлический волновод представляет собой полую металлическую трубу круглого или прямоугольного сечения (см. рис. 7.4, а). Электромагнитные волны могут распространяться по волноводу, отражаясь от его стенок. В результате интерференции отраженных под определенными углами волн образуются устойчивые направляемые волновые структуры с синусоидальным или близким к нему распределением поля в поперечном сечении. Такие волновые структуры называются типами волн или модами (от англ. *mode*). В кабеле эти моды оказались бы мешающими, паразитными. В волноводе же при отсутствии центрального провода одна из этих мод волновода может быть использована для передачи сигнала. Путь движения волны показан на рис. 7.4, б. Волна падает на узкую боковую стенку волновода под углом φ относительно нормали и зеркально отражается.

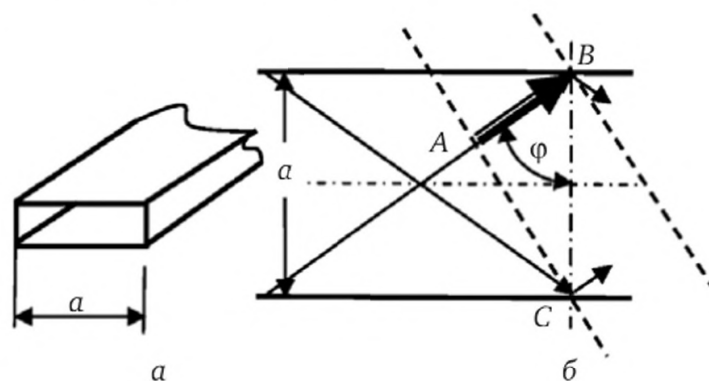


Рис. 7.4. Металлический волновод:
а — геометрия, б — траектории распространения волн

Воспользуемся принципом Гюйгенса и построим пару волновых плоскостей. На рис. 7.4, б их положение показано штриховыми линиями. В прямоугольном треугольнике ABC катет

$$AB = BC \cos(\varphi) = a \cos(\varphi).$$

Волновод симметричен относительно продольной оси. Следовательно, колебания в точках B и C также должны удовлетворять каким-то

требованиям симметрии. Таких требований всего два: электромагнитные поля в этих точках либо симметричны, либо антисимметричны относительно продольной оси волновода. Следовательно, в точках B и C поля должны иметь равные амплитуды, но могут отличаться знаком. Это означает, что на отрезке AB должно укладываться целое число полуволн, т. е.

$$a \cos(\varphi) = m \frac{\lambda}{2} \text{ или } 2a \cos(\varphi) = m\lambda.$$

Если поперечный размер волновода a задан, то, учитывая, что косинус не может быть больше 1, приходим к выводу, что длина волны электромагнитного поля, распространяющегося в волноводе, должна быть короче некоторой величины, равной

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2a}{m}.$$

Эту длину волны называют *критической длиной волны*. Существование критической длины волны и необходимость выполнения условия

$$\lambda \leq \lambda_{\text{кр}} = \frac{2a}{m}.$$

Является одним из важнейших свойств волновода. Целые значения числа m определяют тип волны или моду волновода.

Если зафиксировать значение m и увеличивать длину волны, то траектория движения будет становиться все круче и круче. Наконец, волна начнет метаться между стенками, не перенося энергии вдоль продольной оси волновода¹. Эта ситуация как раз и соответствует критической длине волны.

Волны могут отражаться и от горизонтальных стенок волновода, потому в общем случае конфигурация поля в волноводе имеет сложный вид. В специальных дисциплинах вам более подробно расскажут о типах волн в металлических волноводах.

Одна из мод имеет максимальное значение $\lambda_{\text{кр}}$. Такая мода называется *основным типом волны*. Основной тип волны может распространяться в волноводе в отсутствии других (*высших*) типов волн. Поэтому, чтобы избежать вредного влияния интерференции, в волноводных линиях передачи используют только основной тип колебаний (так называемый *одномодовый режим*).

Металлические волноводы получили широкое применение в качестве линий передачи сантиметровых и миллиметровых волн. Центры полос одномодовых режимов работы наиболее распространенных стандартных волноводов соответствуют $\lambda = 10$ см, 3 см и 8 мм. Металли-

¹ Электромагнитное поле будет присутствовать во всем пространстве волновода, однако перенос энергии отсутствует.

ческие волноводы на более короткие волны (6, 4, 3 мм) выпускаются в ограниченном количестве.

При уменьшении длины волны приходится уменьшать поперечные размеры волновода. Это усложняет технологию изготовления волноводов. Кроме того увеличиваются потери мощности волны в стенках. Поэтому для волн с длинами порядка миллиметра и короче волноводы применяются лишь на очень коротких расстояниях. О причинах увеличения потерь вы узнаете при изучении специальных дисциплин.

7.4. Радиорелейная линия связи

Радиорелейная линия связи во многом похожа на оптический телеграф (см. раздел 1.4). Вдоль линии связи в пределах прямой видимости устанавливаются ретрансляционные станции. Каждая такая станция имеет приемную и передающую антенны высокой направленности, которые устанавливаются на мачтах или башнях высотой до 100 м (высота, не подвластная инженерам XVIII в.). При такой высоте расстояние прямой видимости между станциями будет равно ≈ 50 км. Ретрансляторы принимают, усиливают сигнал, очищают его от помех и передают (ретранслируют) на следующую станцию. На рис. 7.5 показан фрагмент радиорелейной линии связи.

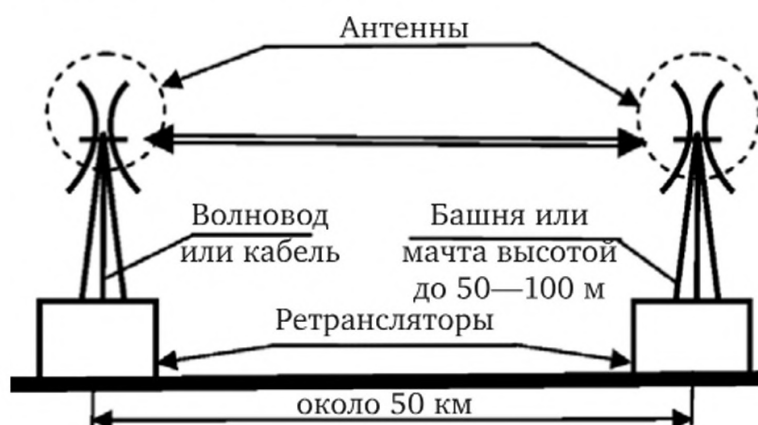


Рис. 7.5. Эскиз радиорелейной линии

Основное конструктивное требование накладывается на размер зеркала антенны. Чтобы обеспечить хорошую направленность, необходим малый угол дифракции излучения антенны $\varphi_{\text{диф}}$. Для этого размер зеркала D должен быть достаточно большим по сравнению с длиной волны (см. раздел 5.4), поскольку

$$\text{tg}(\varphi_{\text{диф}}) = \frac{\lambda}{2D}.$$

Радиорелейные линии используются в диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн, поэтому размер зеркала оказывается порядка единиц метров.

Дальнейшим развитием радиорелейных линий связи являются спутниковые системы связи и спутниковое телевидение.

Радиорелейные линии связи создавались в 60-х годах XX века, но широко используются и сейчас, несмотря на появление спутниковых ретрансляционных систем. Мачты радиорелейных линий можно увидеть вдоль магистральных автотрасс и железнодорожных линий.

7.5. Волоконно-оптическая линия связи

Волоконно-оптическая линия связи содержит волоконно-оптический кабель, главным элементом которого является волоконный световод. Волоконный световод — это стеклянное волокно из высококачественного оптического стекла. Появление и практическое использование такой линии передачи было результатом появления лазеров — когерентных источников света.

В настоящее время широко применяются волокна из кварцевого стекла, а также прозрачные для ИК излучения полимерные волокна. Надо отметить, что и стекла оказались более прозрачными в инфракрасном диапазоне. Поэтому современные ВОЛС работают на длине волны около 1 мкм.

На рис. 7.6 показана траектория движения волны внутри диэлектрической пластины.

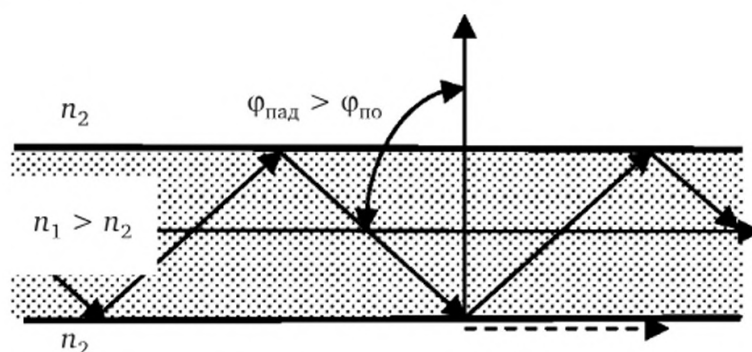


Рис. 7.6. Волоконно-оптический волновод

Если $\varphi_{\text{пад}} > \varphi_{\text{по}}$, то на границе раздела возникает явление полного внутреннего отражения (см. раздел 5.2) и волна распространяется внутри диэлектрической пластины. С точки зрения электромагнитной теории волоконный световод представляет собой диэлектрический волновод оптического или инфракрасного диапазонов волн. Примерно по тем же причинам, что и для металлического волновода, поперечные размеры оптического волокна составляют единицы микрометров. Ясно, что при таких размерах вряд ли удастся изготовить волокно, с сечением, отличающимся от круга или овала.

Конструктивно оптическое волокно — это многослойная структура, включающая сердцевину, оптическую оболочку, технологическую оболочку, слой защитного лака. Волокно помещают в защитную обо-

лочку. Роль последней — защита оптической части от механического и химического влияния внешней среды. Эта оболочка делается обычно из полимера, в особых случаях используется также металлическое покрытие. Описанная конструкция — стеклянное волокно с защитной оболочкой — называется оптическим модулем, то есть по существу это одноволоконный оптический кабель. Как и электрические, оптические кабели могут быть одножильными (одномодульными) и многожильными (многомодульными), последние снабжаются дополнительной жесткой полимерной или металлической центральной жилой и дополнительным общим защитным покрытием.

Для передачи сигнала по волоконному световоду на большое расстояние необходимо особо чистое стекло. В 1966 г. установили, что если поглощение света в стекле будет таково, что, пройдя расстояние в 1 км, мощность света уменьшится до 1 % начальной мощности, то такое волокно можно использовать в качестве волоконного световода для передачи сигнала. Соответствующий коэффициент передачи по мощности $K = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ равен 10^{-2} м^{-1} . В технике принято выражать отношения величин в логарифмических единицах (децибелах) $\Delta = 10 \lg(K)$. В этом случае говорят, что при прохождении сигнала имеют место потери мощности в 20 дБ/км. При таких потерях ретрансляторы можно ставить через несколько километров, и оптический кабель уже может конкурировать с электрическим. Однако самые чистые оптические стекла того времени могли дать потери лишь в несколько тысяч децибел на километр. Попытки очистить стекло в процессе его производства различными известными методами позволили уменьшить потери до нескольких сотен децибел на километр. Основные потери мощности приходились на содержащиеся в стекле ионы металлов, несмотря на их микроскопическое количество. Казалось, что этот предел преодолеть невозможно.

Однако в 1970 г. специалисты американской фирмы «Corning Glass» наконец получили волокно с потерями 20 дБ/км. Используя идеи получения сверхчистых материалов, применяемые в полупроводниковой технологии, они разработали метод получения сверхчистого кварцевого стекла из газовой фазы (метод парофазного осаждения), причем непосредственно в процессе изготовления волокна, точнее, заготовки для оптического волокна.

Полученная заготовка затем плавится в особой печи, и из нее вытягивается оптическое волокно нужных поперечных размеров, которое в процессе вытяжки сразу покрывается слоем защитного лака, чтобы при затвердении на поверхности стекла не образовывались микротрещины, которые существенно ухудшают механическую прочность и надежность оптического волокна.

В дальнейшем и за рубежом, и в нашей стране начали производить оптические кварцевые волокна с потерями порядка нескольких и даже одного децибела на километр на длинах волн 0,8; 1,3 и 1,5 мкм. Длины волн определялись спектрами поглощения в стекле и наличием соот-

ветствующих квантовых генераторов. Рекордное значение составило 0,2 дБ/км на длине волны 1,5 мкм, что близко к теоретическому пределу (0,18 дБ/км). Этот предел определяется уже не чистотой стекла, а его естественной атомной структурной, приводящей к рассеянию света (рэлеевское рассеяние, названное так по имени известного английского физика Рэля, впервые исследовавшего рассеяние волн в веществе).

Достигнутые значения погонных потерь дают потери в 20 дБ при длине световода в 100 км. Таким образом, если в магистральной волоконно-оптической линии и требуются ретрансляторы-усилители, то их можно ставить через ≈ 100 км. Это открыло путь широкому использованию оптических линий передачи. В соответствии с ГОСТ 26599—85 за ними закреплен термин «Волоконно-оптическая линия передачи» (ВОЛП). Однако по-прежнему в ходу устоявшийся термин «Волоконно-оптическая линия связи».

Современная волоконно-оптическая система, состоит из пассивных и активных элементов. Она предназначена для передачи информации, как правило, в ближнем инфракрасном диапазоне. Оптические линии передачи сыграли важную роль в развитии интернета. Они с успехом заменяют проводные линии массового пользования. По ВОЛС в квартиры приходит телефонная связь, Интернет и телевидение. В результате в XXI веке формируется глобальное информационное пространство. Социальную значимость этого явления трудно переоценить.

Как видите, для грамотного использования всего многообразия линий связи будущий радиоинженер должен овладеть теорией электромагнитного поля, изучить теорию антенн и освоить технику ультракоротких волн и даже волн оптического диапазона.

Контрольные вопросы и задачи к главе 7

1. Для каких целей и почему используются линии передачи?
2. Какие условия накладываются на размеры двухпроводной линии передачи?
3. Для чего производят скручивание двух проводной линии передачи?
4. Как устроен коаксиальный кабель?
5. Какие условия накладываются на размеры коаксиального кабеля?
6. Радиус оплетки коаксиального кабеля равен 5 мм. До какой частоты можно его использовать в качестве линии передачи без опасений возникновения паразитных волн?
7. Что препятствует использованию коаксиального кабеля на высоких частотах?
8. Что такое металлический волновод?
9. Как происходит распространение волн в металлическом волноводе.
10. Почему в металлическом волноводе волновод существует критическая длина волны?
11. Что такое основной тип волны в металлическом волноводе?

12. Ширина стандартного волновода равна 23 мм. Найдите критическую длину волны основного типа. Укажите диапазон рабочих длин волн такого волновода.

13. Как устроена радиорелейная линия связи?

14 Диаметр антенны радиорелейной линии связи равен 1 м. Расстояние между станциями 50 км, рабочая частота 10 ГГц. Оцените размер поперечника луча передающей станции месте расположения ретранслятора.

15. Используя результат решения задачи 12 и, полагая, что доля мощность сигнала, принятая ретранслятором пропорциональна отношению площадей антенны и пятна электромагнитного поля в месте приема, оцените коэффициент передачи одного звена линии. Выразите ответ в децибелах.

16. Опишите механизм распространения электромагнитной волны вдоль волоконной линии передачи.

17. Затухание в линии передачи равно 1 дБ/км. На входе линии мощность равна 1 мВт. Найдите мощность волны на конце линии длиной 15 м.

8. Основные элементы канала связи

Диапазон использования радиотехнических средств чрезвычайно широк. Достаточно привести лишь незначительную часть терминов, которые содержат слово «радио»: радиовещание, радиотелеграфия, радиолокация, радионавигация, радиоастрономия, радиоразведка и т. д. Нет никакой возможности в рамках этой книги описать каждое из перечисленных направлений. О некоторых из них вам подробно расскажут на старших курсах, но кое-что вы найдете в главе 9.

Однако все радиосистемы, в конце концов, могут быть сведены к некоторой общей структуре схемы, в которую входят радиоприемник, радиопередатчик и антенна. Рассмотрим эти составные элементы канала связи.

8.1. Радиоприемники

Приемник является обязательным оконечным устройством канала связи. Он преобразует сигналы естественного или искусственного происхождения в сигналы, пригодные для их дальнейшего использования. Если в качестве носителя информации используются радиоволны, то мы имеем дело с радиоприемником (радиоприемным устройством). Обычно в этом случае по традиции имеют в виду приемные устройства, работающие на длинах волн более ≈ 1 мм. Оптические приемники выделяются в отдельный класс устройств, хотя они и имеют много общего с радиоприемником.

Все многообразие радиоприемных устройств делится по следующим признакам:

- основному назначению — радиовещательные и профессиональные;
- роду работы — радиотелеграфные, радиотелефонные, телевизионные, фототелеграфные и т. д.;
- виду модуляции, применяемой в канале связи — амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ), однополосная (ОМ), импульсная (ИМ), частотная манипуляция с непрерывной фазой и т. д. (см. раздел 4.3);
- диапазону принимаемых волн — приемник, включающий все широкополосные диапазоны (ДВ, СВ, КВ, УКВ) называют всеволновым (см. раздел 6.2);
- способу построения приемного тракта — детекторные, прямого усиления, прямого преобразования, регенеративные, супергетеродинные с однократным, двукратным или многократным преобразованием частоты, цифровые и т. д.;

- способу питания — с автономным, сетевым или универсальным;
- месту установки — передвижные, стационарные, мобильные.

Датой рождения радиоприемника следует считать 7 мая 1895 года, когда А. С. Попов продемонстрировал свое устройство на заседании Русского физико-химического общества.

В начале XX в. появились электронные лампы, и получает развитие приемник прямого усиления. Однако с 30-х гг. XX в. подавляющее большинство приемников строится по супергетеродинной схеме, изобретенной Э. Армстронгом¹.

В 1960-х годах появляются транзисторные радиоприемники, а с 1980 г. получили распространение приемники на интегральных микросхемах.

В настоящее время радиоприемники развиваются по пути интеграции узлов структурной схемы в виде электронной микросхемы и широкого применения цифровой обработки сигналов, принятых на фоне помех.

Наиболее важными показателями качества приемника являются чувствительность и избирательность (селективность).

Чувствительность — это минимальный уровень сигнала, который может обнаружить приемник при заданном уровне ошибки. О том от чего зависит чувствительность, и как ее повысить вы узнаете на старших курсах.

Избирательность — это способность приемника выделять сигнал нужного канала связи и ослаблять сигналы остальных. При изучении специальных дисциплин вы узнаете, каким способом можно ее повысить.

Любой радиоприемник содержит устройство, которое преобразует высокочастотное модулированное колебание в низкочастотный сигнал (см. раздел 2.2). Это устройство принято называть *детектором* или *демодулятором*. Простейший радиоприемник состоит только из детектора и оконечного устройства. Такой радиоприемник называют *детекторным приемником*.

В первых опытах по радиосвязи в конце XIX в. детектором служил когерер, а оконечным устройством — электрический звонок. Вскоре после первых опытов было предложено использовать резонансную цепь для настройки приемника на радиоволны определенной частоты. Это повысило его чувствительность и избирательность.

Схема простейшего детекторного приемника показана на рис. 8.1. В 20—30-х гг. XX в. именно такими приемниками пользовались ваши прадедушки и прабабушки.

¹ **Эдвин Говард Армстронг** (англ. *Edwin Howard Armstrong*, 1890—1954) — американский инженер-электрик, талантливый изобретатель. Вошел в историю как изобретатель важнейших типов радиоприемников — регенеративного, сверхрегенеративного и супергетеродинного. Он первым предложил использовать частотную модуляцию в радиосвязи. Его иногда называли генератором идей.

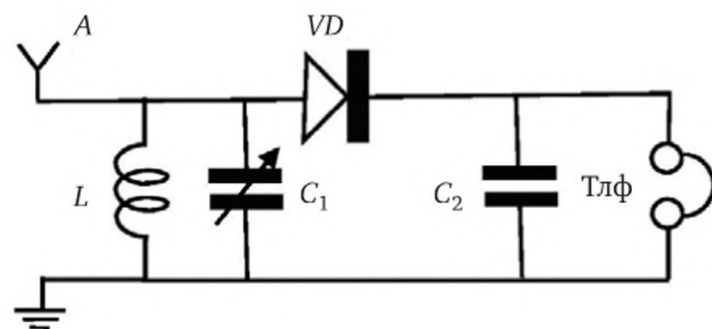


Рис. 8.1. Схема детекторного приемника

Полупроводниковой промышленности тогда не было, поэтому диоды изготавливали кустарным способом, иногда даже в домашних условиях. Металлическая, заостренная на конце пружинка упиралась в небольшой кусочек поликристаллического сернистого цинка. После нескольких попыток удавалось найти чувствительную точку такого точечного полупроводникового диода. От первых детекторных приемников берет свое начало радиолубительское движение, из недр которого вышло большое число высококлассных радиоинженеров и ученых¹.

В 20-х гг. XX в. был налажен промышленный выпуск детекторных приемников. На рис. 8.2 показаны образцы отечественных детекторных радиоприемников. Огромные просторы страны долго пор ждали проблемы с электроснабжением отдаленных мест, поэтому радиоприемник «Комсомолец» можно было встретить вплоть до конца 40-х гг XX века.



а



б

Рис. 8.2. Промышленные образцы отечественных детекторных приемников:

а — модель 1929 года, б — 40-х годов

¹ Теперь Вы легко можете самостоятельно построить такой приемник. В качестве диода подойдет любой высокочастотный диод промышленного производства (Д2А, Д310). Для воспроизведения звука подойдут высокоомные телефоны (ТА-4, ТОН-2, ТОН-2М, ТАГ-1, ТГ-1). Намотайте на диэлектрическом цилиндре диаметром $\approx 50\text{--}100$ мм и длиной $10\text{--}15$ см около 300 витков медного эмалированного провода диаметром $0,3\text{--}0,5$ мм. Если не достанете переменного конденсатора емкость $20 \div 455$ пФ, то запаситесь несколькими постоянными с номиналами, попадающими в этот диапазон. Номинал конденсатора, включенного параллельно телефонам — порядка десятка нанофард. Кусок любого провода длиной метров 10 будут антенной вашего приемника.

Детекторный радиоприемник не содержит источника питания, поэтому мощность звукового сигнала не может превосходить мощности перехваченных антенной радиоволн. Даже на малом расстоянии от радиостанции эта мощность мала. Изобретенный в 1906 г. Ли де Форестом¹ вакуумный триод позволил создать усилитель слабых электрических колебаний. В результате появилась схема радиоприемника прямого усиления. Это повысило чувствительность радиоприемника и увеличило дальность радиосвязи.

Радиоприемник прямого усиления — это детекторный приемник дополненный усилителем высокой частоты перед ним и усилителем низкой частоты — после него. Главное преимущество приемника прямого усиления — простота его конструкции, в результате чего его может собрать даже начинающий радиолюбитель. На рис. 8.3. приведена структурная схема такого приемника.

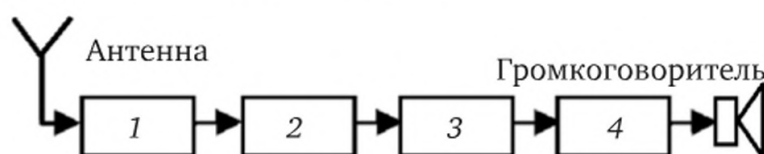


Рис. 8.3. Структурная схема приемника прямого усиления:

1 — входная цепь, 2 — усилитель высокой частоты, 3 — детектор, 4 — усилитель низкой частоты

В развитых странах продаются и ныне, наборы деталей для изготовления приемника прямого усиления на транзисторах. На рис. 8.4 показаны две модели отечественных радиоприемников прямого усиления 30-х гг. XX века.

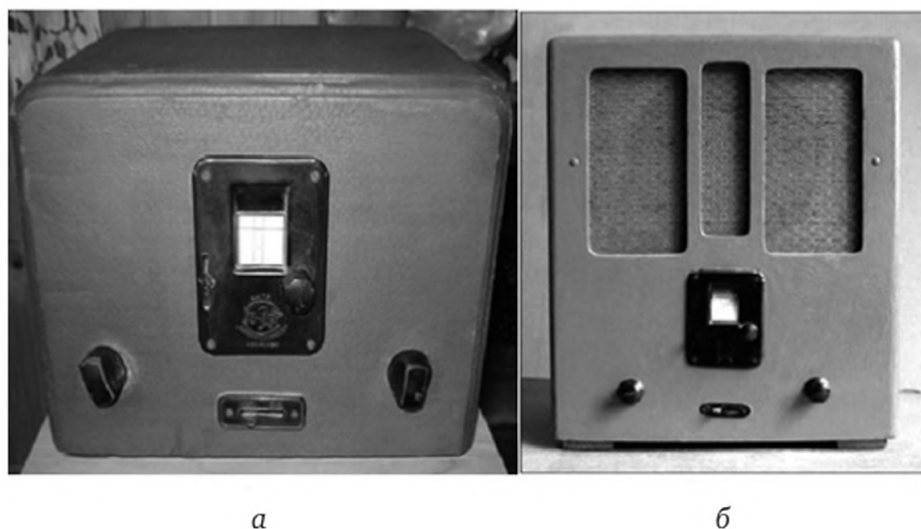


Рис. 8.4. Отечественные радиоприемники прямого усиления:

а — батарейный БИ-234 (1934), б — сетевой СИ-235 (1935)

¹ Ли де Форест (англ. Lee de Forest, 1873—1961) — американский изобретатель, имеющий на своем счету 180 патентов на изобретения. Он изобрел триод — электронную лампу, которая принимает на входе относительно слабый электрический сигнал и затем усиливает его. Является одним из отцов «века электроники».

Основной недостаток приемника прямого усиления — малая избирательность. Поэтому этот тип приемников можно использовать только для приема сигналов мощных радиостанций, работающих в длинноволновом или средневолновом диапазоне. Из-за этого недостатка приемники прямого усиления не производятся промышленностью и в основном используются ныне только в радиолюбительской практике.

По схеме прямого усиления работал и первый советский телевизионный приемник, знаменитый КВН-49 (см. раздел 9.2). Это оказалось возможным благодаря тому, что он принимал только 3 фиксированных по частоте канала в метровом диапазоне волн. Поэтому он не имел элементов плавной настройки. Кроме того, телевизионный канал имеет достаточно широкую полосу и для достижения хорошей избирательности вполне хватало схемы прямого усиления с 6-ти каскадным УВЧ.

Супергетеродинный радиоприемник (на инженерном сленге — супергетеродин) — один из типов радиоприемников, основанный на принципе преобразования принимаемого сигнала в сигнал фиксированной промежуточной несущей частоты с последующим его усилением на этой частоте.

Супергетеродинный приемник изобрел американский инженер Э. Армстронг в 1918 г. На рис. 8.5 показана одна из моделей супергетеродина, созданная Э. Армстронгом в 20-х гг. XX века.

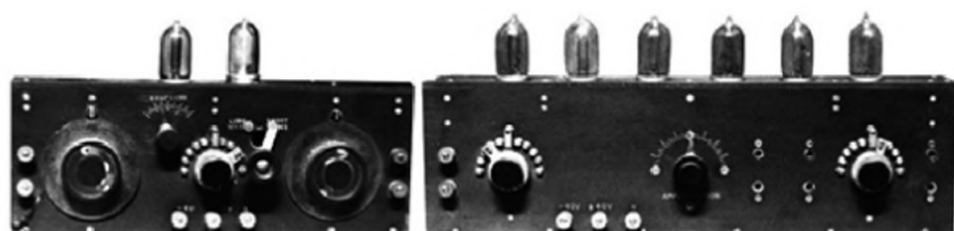


Рис. 8.5. Модель супергетеродинного приемника Э. Армстронга

Из-за низкого качества электронных ламп, супергетеродинный принцип приема тогда не мог реализовать все его преимущества. Приемники плохо работали как на высоких, так и на низких частотах.

В 1929—1930 гг. с появлением экранированных ламп и пентодов (ламп с пятью электродами) супергетеродинный приемник становится основным типом радиоприемника. Структурная схема супергетеродина показана на рис. 8.6.

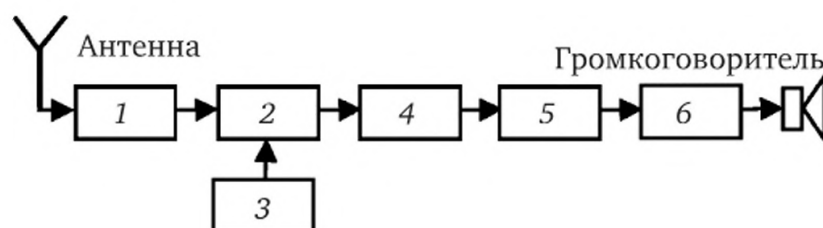


Рис. 8.6. Структурная схема супергетеродинного приемника:
1 — усилитель высокой частоты, 2 — смеситель, 3 — гетеродин, 4 — усилитель промежуточной частоты, 5 — детектор, 6 — усилитель низкой частоты

Радиосигнал с антенны подается на вход *усилителя высокой частоты* (УВЧ) (в упрощенном варианте он может и отсутствовать), а затем на вход *смесителя* — специального элемента с двумя входами, осуществляющего операцию преобразования сигнала по частоте. На второй вход смесителя подается сигнал с локального маломощного генератора высокой частоты — *гетеродина*. Вместе смеситель и гетеродин образуют *преобразователя частоты*. В смесителе эти два сигнала перемножаются. В результате, на его выходе преобразователя частоты появляются сигналы *промежуточной частоты*, равной сумме и разности частот гетеродина и сигнала. Частота гетеродина перестраивается одновременно с входными цепями смесителя (и УВЧ) обычно конденсатором переменной емкости, реже катушкой переменной индуктивности (вариометром, ферровариометром). Сейчас для перестройки используют конденсаторы, управляемые напряжением (варикапы). Перестройка частоты производится так, что частота сигнала промежуточной частоты не изменяется. Этот сигнал усиливается одним или несколькими каскадами *усилителя промежуточной частоты* (УПЧ), после чего поступает на детектор. При неизменной промежуточной частоте сигнала избирательность супергетеродинного приемника по отношению к соседнему каналу обеспечивается УПЧ.

Очевидное преимущество супергетеродинного приемника — наличие малого количества элементов настройки и возможность получения требуемого усиления на неизменной промежуточной частоте. Перенос частоты сигнала на более низкую частоту упрощает задачу получения большого коэффициента усиления. Все это позволяет получить высокую чувствительность и избирательность, а, следовательно, более высокое качество приема информации.

В бытовых приемниках длинных, средних и коротких волн промежуточная частота, как правило, равна 465 (иногда 455) кГц, в ультракоротковолновых — 6,5 или 10,7 МГц, в телевизионных — 38 (изображение) и 31,5 (звук) МГц. В профессиональных приемниках используется более обширный набор значений промежуточной частоты. Международный регламент радиосвязи устанавливает значения промежуточных частот, использование которых для других целей запрещено.

Некоторым недостатком супергетеродинного приемника является наличие так называемого зеркального канала приема — мешающего входного сигнала, который не может быть подавлен фильтрами УПЧ. Причину появления зеркального канала поясняет рис. 8.7.

Избирательность по зеркальному каналу зависит от качества входных цепей. Для улучшения избирательности надо увеличивать число резонансных цепей на входе приемника и в УВЧ. Эти цепи надо одновременно перестраивать при смене частоты сигнала. Увеличение числа элементов настройки усложняет приемник и повышает его стоимость.

Для уменьшения помех от зеркального канала часто применяют метод двойного (или даже тройного) преобразования частоты. Подобные приемники, несмотря на достаточно высокую сложность изготов-

ления, настройки и высокую стоимость, стали фактически стандартом в профессиональной и любительской радиосвязи. Однако в бытовой аппаратуре они не применяются.

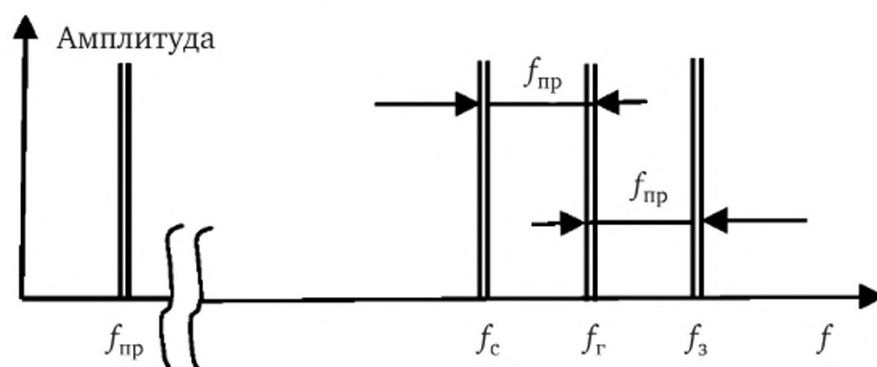


Рис. 8.7. Спектральная диаграмма, поясняющая причину появления зеркального канала

В связи с прогрессом полупроводниковой электроники в настоящее время проблема усиления высоких частот потеряла свою остроту. В некоторых специальных приемниках теперь устанавливают промежуточную частоту выше частоты сигнала. В такой схеме зеркальный канал практически отсутствует. Радиоприемники, построенные по такой схеме, называют инфрадинными. Они используются в радиосистемах панорамного обзора частотных диапазонов радиоволн и в измерительной аппаратуре. Существуют и другие способы подавления сигнала зеркального канала.

Более подробно о радиоприемниках и радиоприеме вам расскажут в специальных дисциплинах на старших курсах.

Некоторые модели бытовых радиоприемников разных лет приведены на рис. 8.8—8.10.

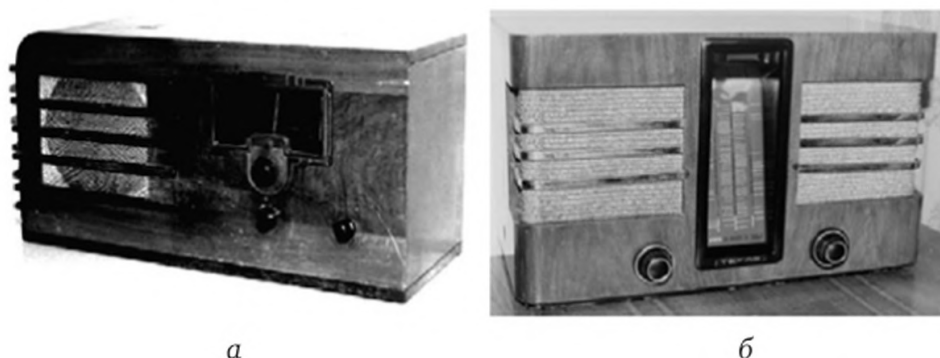


Рис. 8.8. Ламповые радиоприемники:

а — «RCA Victor 5T4» (1936), США, б — «Tefag» (1937), Германия

Создание современных радиоприемных устройств невозможно без использования положений теории информации, теории электрических цепей и сигналов. Фундаментальную основу этих дисциплин составляют математика и физика. Вы должны помнить об этом и стремиться расширять и углублять свои знания в фундаментальных дисциплинах.



Рис. 8.9. Стереорадиола «Симфония-003» — модель 1971 г. Рижского завода «Радиотехника» им. Попова



Рис. 8.10. Транзисторные приемники:

а — «Regency TR-1» США (1954), б — радиоприемник «Гаюя» Рижского радиозавода (1961)

8.2. Радиопередатчики

Передатчик переносит информацию на новый, по каким-то причинам более удобный, носитель информации. В этом смысле и микрофон в телефонной связи можно считать передатчиком, поскольку он преобразует звуковой сигнал в электрический. Однако в этом случае более уместно говорить о преобразователе сигнала. За термином передатчик все же скрыто устройство, генерирующее некоторое колебание, информация на которое переносится посредством его модуляции.

Если носителем информации в канале связи являются радиоволны, то такое устройство принято называть радиопередатчиком. Хотя теперь за верхнюю границу радиоволн и принимают длину волны 0,2 мкм (середина ультрафиолетового диапазона), однако традиционно к радиопередатчикам относят устройства, функционирующие на волнах длиннее ≈ 1 мм. Из-за существенных различий в физических принципах работы оптические передатчики выделяются в особый класс устройств. Поскольку в большинстве каналов связи используются традиционные радиопередатчики, рассмотрим их структуру более подробно.

Функционально радиопередатчик состоит из источника колебаний и модулятора.

Первые искровые радиопередатчики были очень просты по конструкции — излучателем радиоволн служил искровой разряд, а модулятором являлся телеграфный ключ¹. С помощью такого радиопередатчика информация передавалась в кодированной дискретной форме — например, азбукой Морзе или иным сводом условных сигналов. Недостатками такого радиопередатчика была относительно высокая мощность, требуемая для эффективного излучения радиоволн искровым разрядом, а также очень широкий диапазон (спектр) излучаемых им волн. В результате из-за взаимного влияния одновременная работа нескольких близко расположенных таких передатчиков была практически невозможной.

Создание в 1913 году А. Мейснером² электронного генератора³, дальнейшее совершенствование и массовое производство электронных вакуумных ламп позволили устранить недостатки первых радиопередатчиков. С момента появления первого лампового передатчика его структурная схема в общих чертах остается неизменной. Дальнейшие изобретения в области связи и радиотехники (транзисторы, кварцевые резонаторы и т. п.) сопровождались только количественными изменениями параметров радиопередатчиков — уменьшением размеров и потребляемой мощности, повышением КПД и т. д.

Общий вид передатчика и набросок принципиальной схемы А. Мейснера показаны на рис. 8.11.

Современный радиопередатчик состоит из следующих структурных частей:

- задающего генератора фиксированной или перестраиваемой частоты;
- модулирующего устройства (модулятора), изменяющего параметры излучаемой волны (амплитуду, частоту, фазу или несколько параметров одновременно) в соответствии с сигналом, который требуется передать;
- оконечного усилительного каскада (усилителя мощности), который увеличивает мощность модулированного сигнала за счет внешнего источника энергии;
- устройства согласования с антенной, задачей которого является согласование оконечного каскада с параметрами антенны во избежа-

¹ В автомобиле с бензиновым двигателем находится такой передатчик. Прерыватель замыкает цепь первичной обмотки катушки зажигания, и искра проскакивает в зазоре свечи. Взяв такую катушку, вы можете повторить опыты Герца. Или установить связь с соседом по подъезду.

² **Александр Мейснер** (нем. *Alexander Meißner*, 1883—1958) — австрийский физик. Как инженер, занимался разработкой антенн, электронных усилителей, усовершенствованием детектора.

³ Первенство создания генератора незатухающих колебаний фактически принадлежит Э. Армстронгу (1912). Его приоритет оспаривался Ли де Форестом и А. Мейснером. Л. Форест проиграл процессы в 1921 г. и 1923 г., но в 1930 г., в результате ошибки судьбы, 13-ый судебный процесс Л. Форест выиграл. Научное сообщество не признало решение суда. Его современники перестали принимать его всерьез как изобретателя, доверять ему как коллеге.

ние неэффективного излучения радиоволн или их отражения обратно в усилительный каскад.

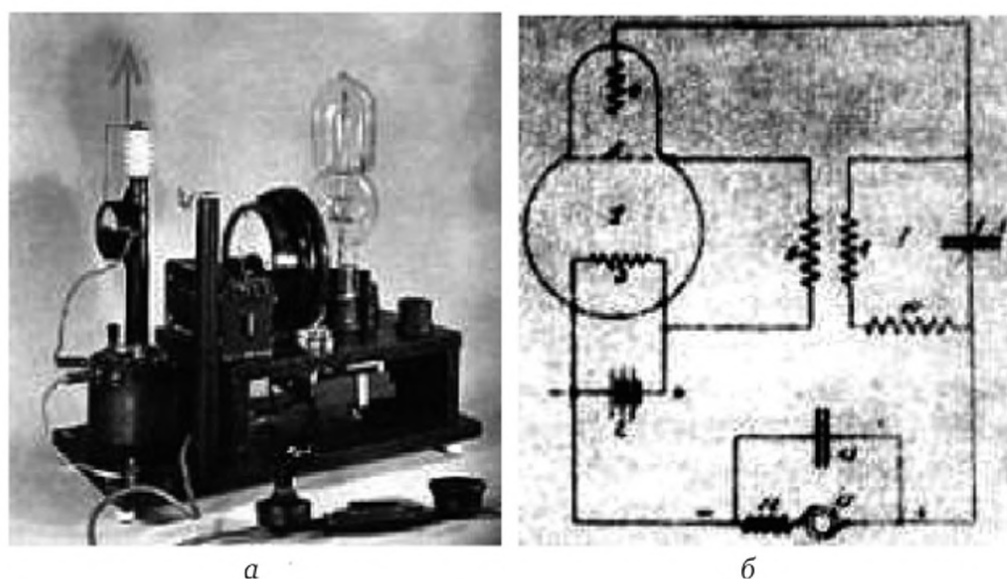


Рис. 8.11 Ламповый передатчик А. Мейснера (а) и его принципиальная схема (б)

Иногда разделить согласующую цепь и собственно антенну трудно и тогда ее также включают в состав передатчика. Структурная схема передатчика показана на рис. 8.12.

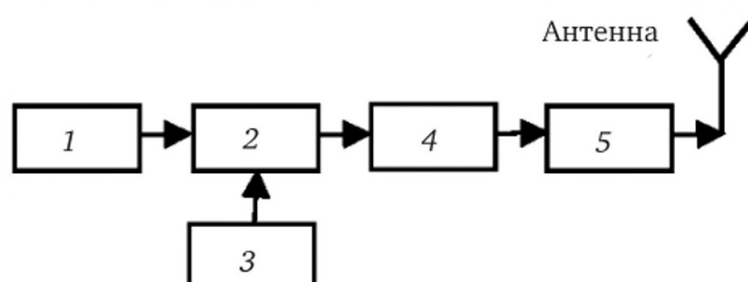


Рис. 8.12. Структурная схема радиопередатчика

1 — задающий генератор, 2 — модулятор, 3 — источник сигнала, 4 — усилитель мощности, 5 — согласующая цепь

Задающий генератор в общем случае — это сложное инженерное устройство. Первичные колебания возникают в автогенераторе — усилителе с положительной обратной связью.

В простых передатчиках некоторые блоки могут отсутствовать. Так амплитудную модуляцию можно получить в усилителе мощности, а частотную — в задающем генераторе. Простейший передатчик содержит только автогенератор, параметры колебаний которого модулируются непосредственным воздействием сигнала на его цепи. За простоту такого передатчика приходится расплачиваться ухудшением параметров его колебаний.

Наиболее важными параметрами передатчика являются уровень выходной мощности и стабильность частоты.

Рекордсменом по уровню мощности среди радиовещательных станций стала вступившая в строй в 1933 г. под Москвой радиостанция имени Коминтерна мощностью 500 кВт, разработанная группой специалистов под руководством А. Л. Минца¹.

Стабильность частоты — характеристика автогенератора, показывающая величину отклонения частоты генератора от первоначального или номинального ее значения. Она определяется отношением $\Delta f/f$, где f — первоначальное (номинальное) значение частоты. Δf — величина отклонения частоты от номинального значения. Это соотношение на сленге могут называть как относительной нестабильностью частоты, так и относительной стабильностью частоты.

Различают кратковременную нестабильность (определяемую отклонением частоты за отрезок время меньше 1 секунды) и долговременную. На практике пользуются понятиями минутной, часовой, суточной, месячной и годовой нестабильности.

Уже в 30-х годах XX в. стало ясно, что для более рационального использования доступного для радиосвязи интервала частот необходимо установить регламент их использования. Каждой радиостанции предоставлялся радиоканал на определенной частоте. Эта частота должна была воспроизводиться с заданной точностью и не выходить за установленные границы в процессе работы. В дальнейшем в специальных системах связи возникла необходимость бесперерывного вхождения абонентов в связь. Поэтому по мере развития радиосредств требования к стабильности частоты постоянно возрастали.

В первой половине XX в. высокой стабильности частоты ($\Delta f/f = 10^{-6}$) удалось достичь в автогенераторах с пьезоэлектрическим резонатором. Механические резонаторы, выполненные из монокристалла кварца, обладают высокой стабильностью собственных механических колебаний. Связь механического резонатора с электрической цепью обеспечивается пьезоэлектрическим эффектом. Первоначально кварцевые резонаторы были очень дорогими, так как для их изготовления использовали природный монокристаллический кварц (горный хрусталь). Во второй половине XX в. было освоено выращивание монокристаллического кварца (с размерами до $30 \times 30 \times 10$ см) в промышленных масштабах. Теперь автогенераторы с кварцевым резонатором можно обнаружить в электронных часах, персональных компьютерах, микропроцессорах промышленного оборудования и даже в бытовой технике.

Наивысшей стабильностью частоты ($\Delta f/f = 10^{-11}$ — 10^{-13}) обладают квантовые стандарты частоты. Это позволяет использовать их в качестве эталонов частоты и времени в системах прецизионных измерений. Высокая стабильность квантовых стандартов частоты связана с высо-

¹ Александр Львович Минц (1895—1974) — видный советский ученый, один из создателей синхрофазотрона в Дубне. Член-корр. АН СССР (1946), академик АН СССР (1958), член бюро Отделения общей физики и астрономии АН СССР (1963). Построил несколько уникальных радиостанций. Создал научные школы в области радиостроения и ускорителей элементарных частиц.

чайшей стабильностью частот квантовых переходов между энергетическими уровнями атомов и молекул. В создании таких устройств значительную роль сыграли радиоинженеры.

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени обеспечивает измерения времени в диапазоне 10^{-9} — 10^8 с или частоты — 10^{-9} — 10^8 Гц с относительной случайной погрешностью $\leq 5 \cdot 10^{-15}$. На рис. 8.13 показан аппаратная Российского национального стандарта времени и частоты, который расположен в г. Менделеево МО.



Рис. 8.13. Аппаратный зал национального стандарта времени и частоты

В настоящее время квантовые стандарты входят в состав систем навигации, например, в системы GPS и ГЛОНАСС, а также в широкую гамму измерительной аппаратуры.

Эталон можно использовать в качестве высокостабильных часов. Сигналы точного времени, которые вы получаете по радиоканалу, основаны на времени национального стандарта частоты и времени, в состав которого входит молекулярный квантовый генератор. Квантовые часы ошибутся на секунду приблизительно через 6 миллиона лет.

Радиопередатчик очень часто используется вместе с радиоприемником и питающим устройством, вместе весь этот комплекс называется радиостанцией. Самостоятельно радиопередатчики используются в тех областях, где не нужен прием информации в месте ее передачи — сигналы точного времени, разнообразные навигационные радиомаяки для определения местоположения объектов, многопозиционная радиолокация, радиовещание и т. д. и т. п.

Радиопередатчик — это сложное инженерно-техническое сооружение. На рис. 8.14 показан радиопередатчик телецентра.

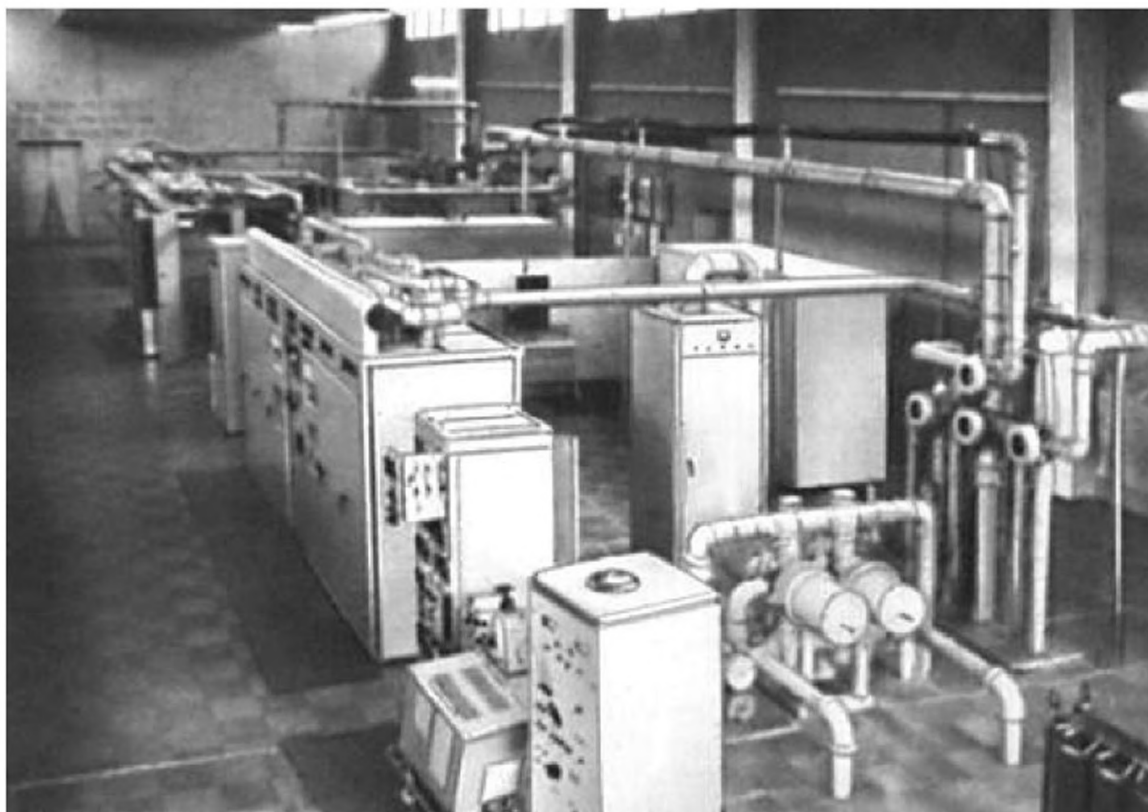


Рис. 8.14. Радиопередатчик телевизионного вещания (СССР)

Передатчик и приемник связаны между собой линией связи. Если в роли линии связи выступает свободное пространство, то связь с ним обеспечивает антенны на выходе радиопередатчика и входе радиоприемника.

8.3. Антенны и антенные комплексы

Антенна (от лат. *antenna* — мачта, рея) в традиционном понимании — это устройство, осуществляющее излучение волн, поступающих к ней от передатчика, или устройство, осуществляющее преобразование падающего излучения и передачу его ко входу приемника. В более широком смысле антенной можно назвать любой преобразователь поля одного типа (например, моду линии передачи) в поле другого типа (например, моду, излученную в окружающее пространство). Антенна является непременной составной частью любой радиотехнической системы.

Приемные и передающие антенны по принципу действия идентичны, ибо в любых линейных системах (кроме гиротропных) коэффициенты преобразования полей взаимны. Однако различия предъявляемых к ним эксплуатационных требований (предельные мощности, полоса рабочих частот, шумы и т. п.) могут приводить к существенному техническому отличию приемных и передающих антенн. Чаще всего приходится иметь дело с радиоантеннами, т. е. преобразователями

электромагнитных полей с длиной волны от 1 мм до нескольких километров.

Естественные преобразователи полей (например, органы излучения и приема звука у насекомых, животных, человека) — это, по существу, древнейшие антенны. Преобразователи оптического излучения, во многом стимулировали создание ряда типов радиоантенн — линзовых, зеркальных, перископических и т. п., а акустические — рупорных антенн. Эти преобразователи также имеют право называться антеннами, однако, в силу исторически сложившихся традиций, в большинстве своем их так не называют. С другой стороны с появлением квантовых генераторов элементы теории радиоантенн стали проникать в оптический и ИК диапазон.

Первоначально функции передатчика (приемника), линии передачи и собственно антенны были совмещены в одном узле, но в дальнейшем антенны выделились в самостоятельные устройства.

Появление радиоантенн относится к концу XIX века. В 1888 году Г. Герц, используя симметричную дипольную антенну (см. рис. 8.15, а), исследовал электромагнитные волны метрового диапазона.

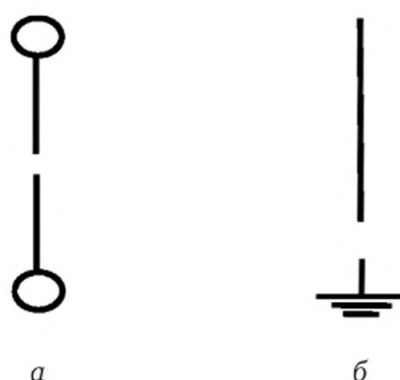


Рис. 8.15. Антенна Г Герца (а) и А. С. Попова (б)

В 1895—1896 годах А. С. Попов создал антенны, использовавшиеся для приема электромагнитных волн. Антенна А. С. Попова, в отличие от симметричного вибратора Герца, была несимметричной, вторым проводником служила земля (см. рис. 8.15, б). В патенте Г. Маркони несимметричная антенна использовалась, и в искровом передатчике, и в приемнике.

До середины 20-х гг. XX в. антенны создавались в основном для диапазонов ДВ и СВ (длина волны от 200 м до 20 км). Поэтому само латинское слово «*antenna*» в начале XX в. было использовано радиоинженерами для обозначения преобразователей электромагнитных полей диапазона длинных волн, образованных из укрепленных на мачтах проводов. Эти антенны являются развитием и модификацией несимметричной заземленной антенны А. С. Попова.

На рис. 8.16 показана антенна длинноволнового диапазона.

В конце 20-х начале 30-х гг. XX в. появляются антенны в диапазоне коротких волн для дальней связи. Развитием идеи Г. Герца для этой

цели является антенна, получившая название диполь С. И. Надененко¹. Такая антенна показана на рис. 8.17.

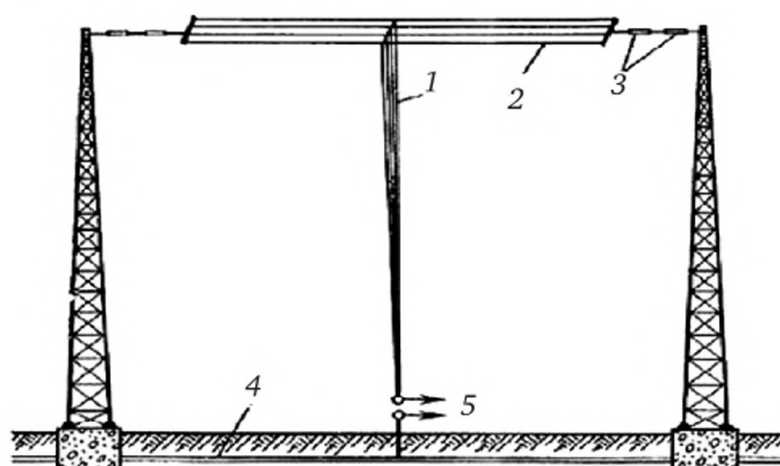


Рис. 8.16. Т-образная антенна длинных волн:

1 — снижение (излучатель), 2 — горизонтальная часть, 3 — изоляторы, 4 — система заземления, 5 — клеммы, присоединяемые к передатчику

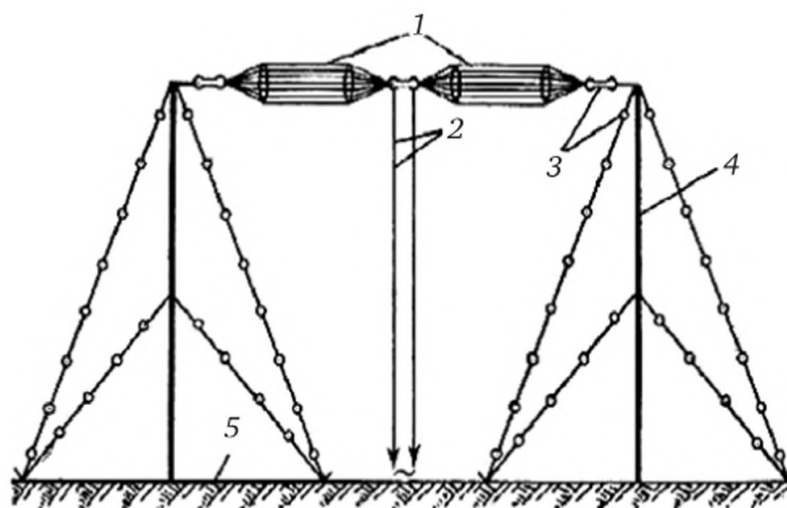


Рис. 8.17. Диполь Надененко:

1 — диполь; 2 — симметричная линия питания; 3 — изоляторы; 4 — мачта с секционированными оттяжками, 5 — поверхность земли

Проволочные и вибраторные антенны и их совокупности (антенные «поля») используются на длинных, средних и коротких волнах.

Развитие в середине XX в. теории и техники УКВ, связанное с потребностями радиовещания, телевидения, радиолокации, а затем радиоастрономии и космической связи, привело к созданию общей теории антенны. Это позволило создать множество новых типов антенн, в том числе щелевых антенн, диэлектрических антенн, антенных решеток

¹ **Сергей Иванович Надененко** (1899—1968) — крупный советский ученый, талантливый радиоинженер, научные труды и изобретения которого нашли широкое применение, как в нашей стране, так и за рубежом. С 1932 г. вел педагогическую работу в Институте инженеров связи, возглавив кафедру антенн и распространения радиоволн МЭИС (теперешнее название МТУСИ).

и зеркальных антенн, антенн переменного профиля, а также сложных антенных комплексов.

На рис. 8.18 показана антенна, состоящая из нескольких вибраторов и отражателя. Такую антенну называют *фазированной антенной решеткой* (ФАР). Структура поля ФАР зависит от взаимного расположения ее элементов, общей конфигурации системы, фазовых и амплитудных соотношений между токами в излучателях и в пассивных элементах и т. д.

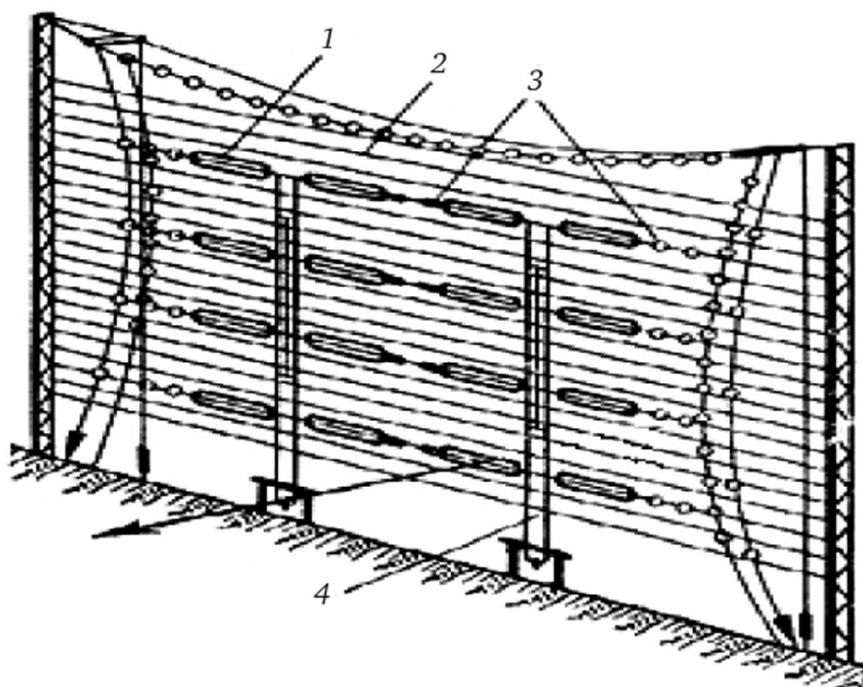


Рис. 8.18. Синфазная антенна коротких волн:

1 — излучающий элемент в виде диполя Надененко, 2 — рефлектор, 3 — изоляторы, 4 — линия питания (снижение), стрелка показывает направление максимума излучения

Управляя токами в элементах, можно изменять характеристики подобной антенной системы, например, изменять направление излучения.

При приеме сигналов с помощью ФАР ее используют для обработки сигналов (пространственно-временной, методами когерентной и некогерентной оптики и т. д.). Для этого сигнал, принятый каждым элементом, обрабатывается отдельно так, чтобы извлечь максимум информации из всего антенного комплекса в целом.

При конструировании антенн сантиметрового и миллиметрового диапазонов широко используются методы, хорошо известные в оптике. Излучение формируется в результате сложения не только полей от активных излучателей, но и полей, отраженных или рассеянных различными пассивными структурами — зеркалами, линзами, стержнями, щелями и отверстиями в металлических поверхностях и т. д. В качестве примера на рис. 8.19 показаны эскизы однозеркальной параболической антенны и антенны с диэлектрической линзой.

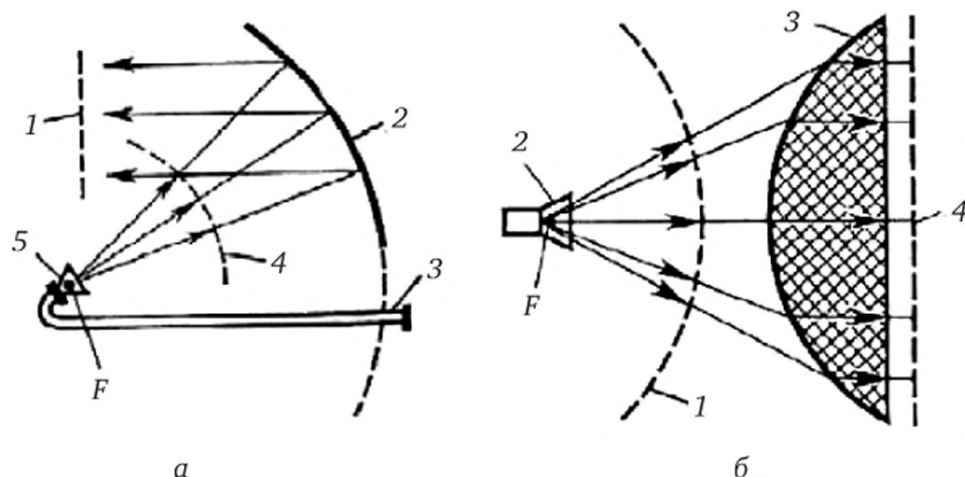


Рис. 8.19. Антенны сантиметрового и миллиметрового диапазона:
 а — параболическая антенна с облучателем: 1 — плоский фронт волны, 2 — зеркало, 3 — питающий волновод, 4 — сферический фронт волны, 5 — облучатель; б — линзовая антенна: 1 — сферический фронт волны, 2 — облучатель, 3 — линза, 4 — плоский фронт волны; F — фокус зеркала или линзы

Конструктивное выполнение антенн чрезвычайно разнообразно. Например, на летательных аппаратах требуется, чтобы антенны не выступали над его поверхностью. При конструировании космических антенн должны учитывать невесомость и глубокий вакуум, к тому же такие антенны должны автоматически разворачиваться.

На рис. 8.20 показаны вибраторные антенны, которые использовались на первом искусственном спутнике Земли. Они были разработаны под руководством Г. Т. Маркова¹.

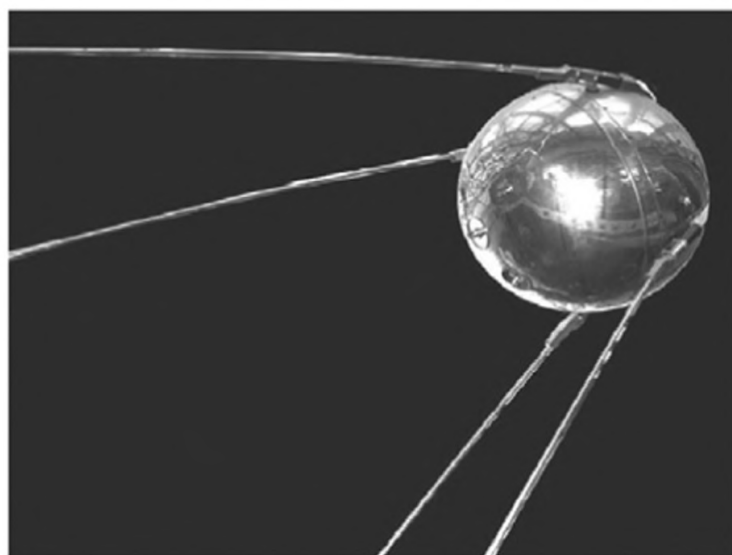


Рис. 8.20. Вибраторная антенна первого спутника Земли

¹ Григорий Тимофеевич Марков (1909—1981) — профессор РТФ МЭИ, за большой вклад в создание оригинальных антенных устройств космических аппаратов был награжден орденом «Знак Почета» и ему было присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

Две антенны располагаются крест-накрест, каждая состоит из двух плеч-штырей длиной 2,4 м и 2,9 м, угол между плечами в паре — 70° . Такая антенна на рабочих длинах волн 15 и 7,5 м обеспечивала характеристику направленности близкую к равномерной.

Ряд антенн устанавливается под радиопрозрачными укрытиями, антенны бывают полноповоротными или неподвижными, стационарными или перевозимыми и т. д.

Применение ЭВМ для обработки сигнала, принятого несколькими антеннами, позволяет получать информацию, эквивалентную той, которая доступна при использовании сплошной антенны, значительно превосходящей по площади отдельные антенны. При цифровой обработке можно осуществлять сканирование пространства узким лучом в пределах достаточно широкого конуса.

Наибольшее впечатление производят антенны радиотелескопов. Размеры этих сооружений могут быть от десятков метров до сотен или даже тысячи метров. На рис. 8.21 показана одна из антенн Серпуховского крестообразного радиотелескопа ДКР-1000.

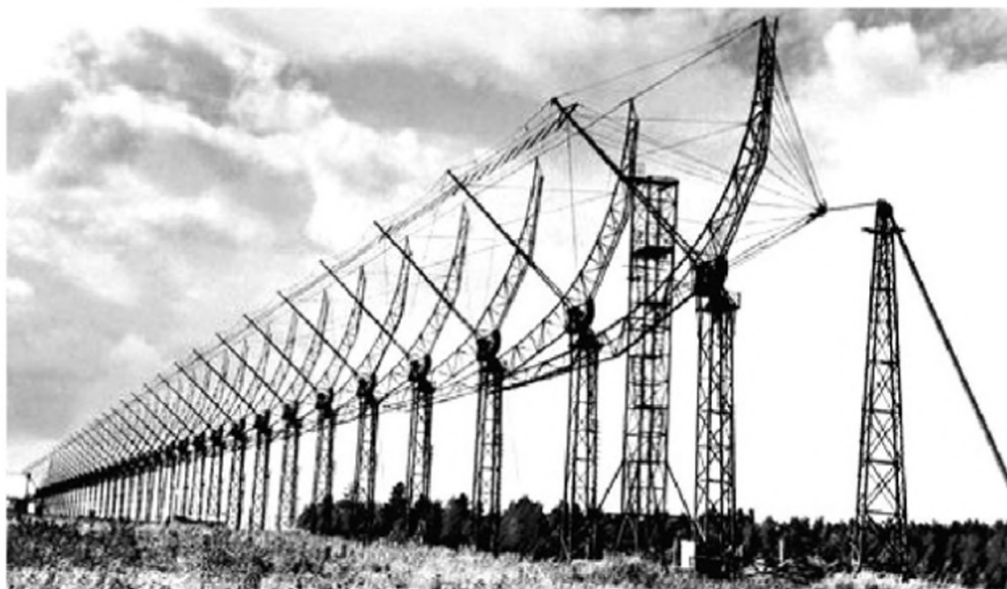


Рис. 8.21. Параболическая антенна длиной 1 км Серпуховского крестообразного радиотелескопа Физического института РАН

Пара взаимно перпендикулярных антенн длиной 1 км ориентированы с Востока на Запад и с Севера на Юг. Каждая из антенн состоит из 37 матч с 40-метровыми параболическими фермами.

Радиотелескоп был принят в эксплуатацию в 1963 году. В настоящее время антенна Восток-Запад продолжает работать, но антенне Север-Юг повезло меньше. В 90-х гг. она была разграблена на металлолом и сейчас не работает.

Антенная система радиотелескопа-интерферометра в Нью-Мексико (США) показана на рис. 8.22. Все 27 антенн, работают как единая сложная ФАР. Каждая из антенн имеет диаметр 25 метров и может перемещаться по рельсовому пути.



Рис. 8.22. Антенная система радиотелескопа-интерферометра, расположенного в Нью-Мексико, США

Как вы видите, антенны и антенные системы могут быть очень сложными инженерно-техническими сооружениями. Поэтому при их создании приходится в совокупности решать как проблемы излучения электромагнитных волн, так и чисто технические проблемы выбора подходящих материалов, разработки механических конструкций, выбора места и методов сооружения и т. п. Как правило, сложные антенны и антенные комплексы являют уникальными сооружениями, существующими в единичных экземплярах.

Примеры уникальных антенн и антенных комплексов радиотелескопов приведены в разделе 9.6.

Разработка систем, проектирование аппаратуры и организация ее производства являются венцом творчества инженера. Для того чтобы достичь вершин инженерного искусства, вы должны развивать свои творческие способности, умение ставить задачи, решать технические проблемы с использованием результатов фундаментальных научных исследований, достижений инженерной практики и современных технологий.

Поскольку любое техническое сооружение должно быть экономически целесообразным, инженер должен иметь достаточный объем экономических знаний.

Любую серьезную инженерно-техническую задачу решает коллектив исполнителей. Инженер должен уметь организовать работу тех людей, которые находятся в его непосредственном подчинении. Это означает, за время учебы вы должны овладеть азами науки управления коллективом (тем, что теперь называют модным словом — менеджмент).

Контрольные вопросы к главе 8

1. Перечислите основные типы радиоприемников.
2. Изобразите принципиальную схему детекторного радиоприемника. Опишите назначение элементов схемы.
3. Изобразите структурную схему радиоприемника прямого усиления. Опишите назначение элементов схемы.
4. Изобразите структурную схему супергетеродинного радиоприемника. Опишите назначение элементов схемы.
5. Что такое зеркальный канал супергетеродинного радиоприемника?
6. Почему в настоящее время радиоприемники строятся по супергетеродинной схеме?
7. Перечислите наиболее важные показатели качества радиоприемника.
8. Что такое чувствительность радиоприемника?
8. Что такое избирательность радиоприемника?
9. Из каких блоков состоит радиопередатчик и каково их назначение?
10. Что такое задающий генератор передатчика?
11. Для чего в состав передатчика включается модулятор?
12. Какую функцию выполняет в передатчике усилитель мощности?
13. Назовите главные показатели качества передатчика.
14. Почему требования к стабильности частоты радиопередатчиков постоянно возрастают?
15. Какие технические решения используют для повышения стабильности частоты радиопередатчиков?
16. Что такое квантовый стандарт частоты?
17. Для чего предназначены антенны?
18. Чем отличается диполь Г. Герца от антенны А. С. Попова?
19. Что такое фазированная антенная решетка?
20. Какими дополнительными свойствами обладает ФАР?
21. Как приемы оптики используются при создании антенн сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн?
22. Почему антенны радиотелескопов имеют большие размеры?

9. Радиоэлектроника — неотъемлемая часть и двигатель научно-технического прогресса

Начальный период развития радиотехники был связан с созданием простейших передающих и приемных радиостанций. Однако за свою более чем вековую историю она проникла практически во все сферы человеческой деятельности.

Радиоволны различных диапазонов (см. раздел 6.3) используются для передачи информации — в радиосвязи, радиовещании и телевидении, в радиолокации и радионавигации, при контроле и управлении машинами, механизмами и технологическими процессами, в разнообразных научных исследованиях и т. д.

Еще в середине XX века стали доступными на любых расстояниях радиосвязь при помощи обычного и быстродействующего буквопечатающего телеграфирования, радиотелефонная связь и передача изображений, чертежей, рисунков, газетных матриц и много, многое другое.

Развитие космических исследований потребовало обеспечения надежной радиосвязи с искусственными спутниками Земли (ИСЗ) и автоматическими космическими аппаратами, направленными к планетам или находящимися на их поверхности, передачи научной информации и изображений на Землю и передачи команд для управления этими аппаратами. Общеизвестно значение радиоэлектроники в обеспечении космических полетов человека. С другой стороны, ИСЗ сами входят в состав систем телекоммуникаций в качестве ретрансляционных станций для осуществления надежной связи между удаленными пунктами, для передачи телевизионных программ, сигналов точного времени, навигации и т. п.

Методы радиотехники лежат в основе действия многих систем автоматического управления, автоматического регулирования и обработки информации. Сейчас сложный радиотехнический комплекс по своей архитектуре представляют специализированную ЭВМ.

В результате развития радиотехники возникли: электроакустика, изучающая и реализующая практические способы преобразования звука в электрические колебания и обратно, различные системы звукозаписи и воспроизведения (магнитная и оптическая запись звука, включая элементы памяти ЭВМ), а также системы, использующие ультразвук в технике (гидроакустическая локация, ультразвуковая связь под водой, обработка материалов, очистка изделий), медицине и т. д. Аппаратура, применяемая в ультразвуковой технике, является, по существу, радиоаппаратурой — совокупностью генераторов, преобразователей, усилителей и т. п.

Развитие радиотехники потребовало создания мощной радиопромышленности, выпускающей радиоприемники и телевизоры массового применения, связные, радиовещательные и телевизионные станции, аппаратуру магистральных линий связи, промышленное и научное радиооборудование, радиодетали и прочие элементы.

Потребности радиотехники в большом количестве и широком разнообразии электронных компонент сыграли важную роль в зарождении и развитии электронной промышленности. Появление полупроводникового транзистора, а затем интегральных микросхем, привело сначала к сближению, а затем и к слиянию радиотехники и электроники, в единое научно-техническое направление — *радиоэлектронику*.

Достижения радиоэлектроники широко применяются в промышленности и сельском хозяйстве, биологии и медицине. Высокочастотный нагрев используется для плавки особо чистых металлов в условиях вакуума и в атмосфере инертных газов, с успехом применяется для закалки поверхностей стальных деталей, для сушки древесины, керамики и зерна, для консервирования и приготовления пищи, в медицинских целях и т. д.

На старших курсах вы не только получите сведения о различных областях применения достижений радиоэлектроники, но приобретете навыки разработки и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры и радиосистем. В рамках этой книги ограничимся кратким описанием лишь некоторых направлений современной радиоэлектроники.

9.1. Радиовещание

Радиовещание (англ. *Broadcasting* — распространение звуковых и визуальных сигналов среди большого числа получателей) — технология передачи звуковой информации в свободном пространстве, проводных сетях или в сетях с пакетной коммутацией (в компьютерных сетях, интернет-радио и т. д.).

Разновидностью радиовещания является спутниковое радиовещание — радиовещание с использованием ИСЗ.

Как правило, звук в радиовещании модулирует колебание несущей частоты радиостанции одним из способов модуляции (см. подраздел 4.3). Для высококачественного, как правило стереофонического, радиовещания в диапазоне частот 65,9—108 МГц используется ЧМ, в других диапазонах с более длинными волнами (ДВ, СВ, КВ) используется АМ и цифровое радиовещание в формате DRM (*Digital Radio Mondial* — Всемирное цифровое радио).

Датой рождения радиовещания можно считать 24 декабря 1906 г. В этот день Р. О. Фессенден¹ провел передачу короткой радиопро-

¹ Реджинальд Обри Фессенден (англ. *Reginald Aubrey Fessenden*, 1866—1932) — канадский и американский изобретатель, хорошо известный своими работами на ранних этапах развития радио. Его наследие в области радио включает три значительных достижения: первая передача звука по радио (1900), первая двухсторонняя трансатлантическая радиосвязь (1906) и первая трансляция по радио развлечений и музыки (1906).

граммы со своей радиостанции (см. рис. 9.1 и 1.21). Вторая короткая передача состоялась 31 декабря, в канун Нового года. Передача включала песню «O, Holy Night»¹ в собственном исполнении на скрипке, а его жена прочла перед микрофоном отрывок из Библии.



Рис. 9.1. Фрагмент оборудования радиостанции Р. О. Фессендена

Основной аудиторией этих передач было неизвестное количество судовых радиооператоров вдоль атлантического побережья Америки. Хотя теперь эти две радиопередачи рассматриваются как важная веха в истории радио, в то время им не придали особого значения и вскоре о них забыли. Это новшество не было по достоинству оценено бизнесом. Надо ли говорить о недалёковидности бизнесменов² — ведь Р. О. Фессенден на полтора десятка лет опередил свое время. Однако работы по массовому радиовещанию надолго были прекращены. К ним вернулись лишь в 20-х гг. XX века.

После 1920 г. широко распространившееся радиовещание стало использовать генераторы на электронных лампах, но в их основе по-прежнему лежал принцип генерация непрерывной волны с амплитудной модуляцией, изобретенный и запатентованный Р. О. Фессенденом в начале XX в. (патент США № 706 747). В 1921 г. Институт Радиоинженеров наградил Р. О. Фессендена медалью Почета. В следующем году город Филадельфия присудил ему медаль Иоанна Скотта и денежный приз в размере 800 долларов за изобретение «телеграфной и телефонной связи непрерывной волны», отдав ему дань уважения, как «Человеку, чьи труды оказали большую пользу».

¹ *O Holy Night* (рус. «О Святая ночь») — знаменитая Рождественская песня, традиционно исполняемая во время полуночной рождественской мессы в католической церкви.

² Заблуждались не только люди бизнеса. Г. Маркони очень долго был убежденным сторонником радиотелеграфа и противился переходу на передачу речи.

В первые десятилетия развития радиовещания, для обозначения характеристики несущих колебаний использовали длину волны электромагнитного излучения, соответственно, шкалы радиоприемников были проградуированы в метрах. В настоящее время частота стала главной характеристикой радиовещательной станции, и шкалы радиоприемников теперь градуируют в кГц, МГц или ГГц.

Радиопередачи ведутся из радиостудии, которая, как правило, не имеет прямого отношения к радиостанции. Радиостудия — это специально оборудованное помещение, имеющее строго заданные акустические параметры. Оно оснащено звукозаписывающей и передающей аппаратурой, предназначенной для записи на магнитную ленту и воспроизведения радиопередач, а также для ведения прямых трансляций. Существуют малые, так называемые «речевые», радиостудии, предназначенные для записи и передачи дикторских программ, концертные студии, студии для записи и трансляции музыкальных, литературно-драматических радиопередач.

На территории России услуги вещания предоставляет «Российская телевизионная и радиовещательная сеть» (РТРС) — российская государственная компания, оператор теле- и радиопередающей сети страны. В сети вещания РТРС действуют 11998 передающих устройств, в том числе 9362 телевизионных передатчика (86 % от общего числа) и 2636 радиопередатчиков, свыше 8000 антенно-мачтовых сооружений, в том числе Останкинская и Шуховская телебашни в Москве. В РТРС трудится около 20 тыс. человек. Оно внесено в перечень стратегических предприятий России.

9.2. Телевидение и телевизионное вещание

Телевидение — это область науки, техники и культуры, связанная с передачей зрительной информации (подвижных и неподвижных изображений) на расстояние радиоэлектронными средствами, а также сам способ такой передачи. Наряду с радиовещанием телевидение является одним из наиболее массовых средств распространения информации (политической, культурной, научно-познавательной, учебной и т. п.). Это одно из основных средств связи, используемое в научных, организационных, технических и других прикладных целях (например, в системах управления и контроля в промышленности и на транспорте, в космических и ядерных исследованиях, в военном деле, системах наблюдения и т. п.).

Конечным звеном телевизионной передачи служит человеческий глаз, поэтому телевизионные системы строятся с учетом особенностей зрения. Реальный мир воспринимается человеком визуально в цветах, предметы — рельефными, расположенными в объеме некоторого пространства, а события — в динамике, движении. Следовательно, идеальная телевизионная система должна обеспечивать возможность

воспроизводить эти свойства материального мира как можно в более полном объеме. В современном телевидении задачи передачи движения и цвета успешно решены и технически, и практически.

Первые опыты передачи неподвижного изображения были сделаны еще в эру электрического телеграфа. В 1856 году Дж. Казелли¹ построил и продемонстрировал прототип электромеханической системы для передачи на расстояние изображений. Это устройство он назвал «Pantelegraph», как производное от слов «pantograph» (пантограф) — основной инструмент копирования и «telegraph» — способ передачи на расстояние.

Отправитель сообщения записывал его на оловянном листе чернилами, не проводящими ток. Далее лист крепился к выгнутой металлической пластине и сканировался маятниковым пером (разрешение — три строки на мм). На приемной стороне изображение воспроизводилось специальными чернилами, которые вступали в химическую реакцию с бумагой, пропитанной железо-цианистым калием (см. рис. 9.2).



Рис. 9.2. Изображение, переданное аппаратурой Дж. Казелли

Для синхронизации передачи и воспроизведения изображения маятники управлялись высокоточными часовыми механизмами². Основным принцип преобразования двухмерного изображения в одномерный электрический сигнал не изменился до наших дней.

¹ Джованни Казелли (итал. Giovanni Caselli, 1815—1891) — итальянский физик. Он в то же время изучал теологию и в 1836 г. был возведен в сан католического священника.

² Поскольку изображение на приемном аппарате выглядело одинаково с исходным, вскоре появился термин факсимиле (лат. *fac simile* — дословно «делай подобное»).

Вскоре изобретение Д. Казелли получило широкое распространение не только во Франции, но во всем мире. Оно было запатентовано в Европе в 1861 г. (Европейский патент № 2532) и в США в 1863 г. (патент США № 37,563).

В основу изобретения Дж. Кзелли положен принцип поочередной передачи элементов изображения. Он был заново предложен в 1878 году А. Пайва¹. Этот принцип лежит в основе всех современных систем телевидения.

Однако для передачи движущихся изображений требовался более быстрый способ преобразования изображения в электрический сигнал. Принципиальная возможность реализации скоростной передачи появилась благодаря открытию внешнего и внутреннего фотоэффекта, которые можно было использовать для преобразования света в электрический ток.

В 1907 году Б. Л. Розинг² разработал систему «катодной телескопии» (при которой для воспроизведения изображений использовалась электроннолучевая трубка). В июле 1907 г. он подал заявку на «Способ электрической передачи изображений на расстояние». По этой заявке 30 октября 1910 г. ему был выдан патент № 18076. В 1908—1909 гг. открытие нового способа приема изображения в телевидении подтвердили патенты, выданные в Великобритании и Германии. В 1911 году усовершенствованное телевизионное устройство было запатентовано в России, Великобритании, Германии и США.

Б. Л. Розингу 9 мая 1911 г. удалось в своей лаборатории добиться приема сконструированным им устройством изображений простейших фигур. Это была первая в мире телевизионная передача, ознаменовавшая начало эры телевидения. Однако чтобы довести телевидение до стадии практического применения, необходимо было решить еще множество сложных проблем, поэтому электронное телевизионное вещание появилось только через четверть века.

Возможность поэлементной передачи изображений по каналу связи основывается на свойстве человеческого зрения воспринимать пульсирующий свет как непрерывный, если частота пульсаций превышает критическую, которая зависит от яркости источника и составляет несколько десятков герц. Процесс последовательного преобразования элементов изображения в электрические сигналы при передаче и обратный процесс при приеме носят название *развертки изображения*. Процессы анализа и синтеза изображения должны совершаться

¹ **Адриано де Пайва** (портг. *Adriano de Paiva*, 1847—1907) — португальский ученый, один из пионеров телевидения (тогда его называли *telectroscope*). Известен исследованиями свойства селена с целью использования его для воспроизведения изображения. Благодаря его работам было открыто явление фотопроводимости селена.

² **Борис Львович Розинг** (1869—1933) — русский физик, ученый, педагог, изобретатель электронного телевидения, автор первых опытов по телевидению, за которые Русское техническое общество присудило ему золотую медаль и премию имени К. Г. Сименса.

синхронно (одинаково по частоте) и синфазно (одинаково по фазе). Закон развертки определяется назначением телевизионной системы.

Одно из первых устройств передачи элементов изображения, основанное на применении вращающегося диска с отверстиями, предложил П. Нипков¹. В 1884 г. он получил патент на оптико-механическое устройство («электронный телескоп») для разложения изображения на элементы при передаче и приеме телевизионных сигналов. Оно применялось в ранних, еще несовершенных электромеханических системах телевидения.

Первые опыты по передаче изображения с помощью механической системы провел 2 октября 1925 года Дж. Бэрд². Публичная демонстрация состоялась 26 января 1926 года. Подвижное изображение было передано из его лаборатории со скоростью 12,5 кадров в секунду.

Первым в мире Дж. Бэрд продемонстрировал 3 июля 1928 года передачу цветного изображения. В том же году он демонстрирует стереоскопическое телевидение, а в 1932 г. первым осуществил передачу телевизионного сигнала в диапазоне УКВ.

С 1929 г. по 1937 г. компания BBC (*The British Broadcasting Corporation*) вела регулярное телевизионное вещание. К 1931 г. в США проводили телевидение уже около 25 радиостанций. Во многих странах был начат промышленный выпуск телевизионных приемников. В СССР первые серийные электромеханические телевизионные приемники были выпущены в 1934 году. Однако регулярные телепередачи механического телевидения из Москвы были начаты уже 1 октября 1931 г. Эти передачи вначале предназначались для радиолюбителей, которые самостоятельно собирали телевизионные приемники³. Их отзывы были учтены при переходе на серийное производство оптико-механических телевизоров. Малострочные телепередачи неподвижных изображений стали регулярными в Ленинграде, Одессе, Киеве, Харькове, Нижнем Новгороде, Смоленске, Томске. В 1932 г. осуществлена первая передача движущегося изображения (телекино), в 1934 г. — со звуковым сопровождением. На рис. 9.3 показан комплект электромеханического телевизионного приемника Ленинградского завода им. Козицкого.

Освоение электронных систем телевидения связано с именами многих изобретателей, прежде всего, с именем В. К. Зворыкина⁴. Значитель-

¹ **Пауль Нипков** (нем. *Paul Julius Gottlieb Nipkow*, 1860—1940) — немецкий инженер и изобретатель. Изобретенный им диск, получивший название диска Нипкова, послужил основой для появления механического телевидения в 1920-х гг. XX века.

² **Джон Лоуги Бэрд** (англ. *John Logie Baird*, 1888—1946,) — шотландский инженер, получивший известность за создание первой механической телевизионной системы. Его первые опыты — важный шаг в развитии телевидения.

³ Завод им. Козицкого наладил выпуск комплектов деталей для сборки телевизоров Б-2.

⁴ **Владимир Козьмич Зворыкин** (1888—1982) — русско-американский инженер, родившийся и получивший образование в России и впоследствии эмигрировавший в США. В 1923 году подал патентную заявку (US Patent № 2141059 от 20.12.1938) на телевидение, осуществляемое полностью на электронном принципе. Ему принадлежат более 120 патентов на различные изобретения.

ный вклад был сделан Ф. Фарнсуортом¹, В. П. Грабовский², С. И. Катаевым³, Б. Л. Розингом, П. В. Тимофеевым⁴, П. В. Шмаковым⁵, и многими другими.

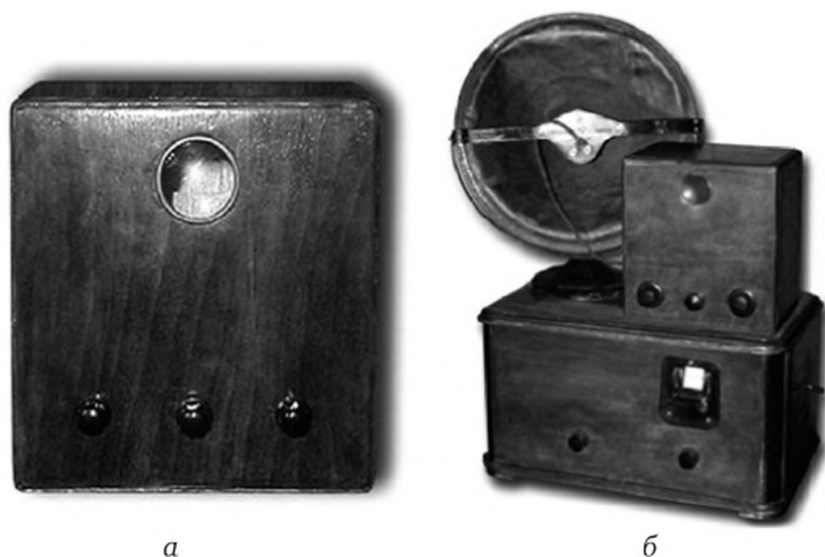


Рис. 9.3. Отечественный электромеханический телевизионный приемник: а — блок развертки Б-2, б — полный комплект на основе радиоприемника «ЭЧС-2»⁶

В современной телевизионной вещательной системе принята *линейно-строчная развертка*, при которой кадр изображения имеет горизонтально-строчную структуру. Для поддержания синхронизации разверток в конце каждой строки и кадра передаются синхронизирующие импульсы. Тем самым, телевизионная станция управляет развертками всех телевизоров в зоне своего действия. Структурная схема электронной системы телевизионного вещания показана на рис. 9.4.

¹ **Фило Тейлор Фарнсуорт** (англ. *Philo Taylor Farnsworth*, 1906—1971) — американский изобретатель. Известен изобретением диссектора — передающей электронно-лучевого прибора без накопления заряда.

² **Борис Павлович Грабовский** (1901—1966) — советский физик и изобретатель, который 26 июля 1928 г. впервые в мире передал по радио движущееся изображение с помощью полностью электронной системы телевидения.

³ **Катаев Семён Исидорович** (1904—1991), советский ученый и изобретатель в области телевидения и радиоэлектроники, заслуженный деятель науки и техники (1968). 24 сентября 1931 года, на полтора месяца раньше В. Зворыкина, подает заявку на изобретение иконоскопа и 30 апреля 1933 г. получает авторское свидетельство СССР № 29.865.

⁴ **Пётр Васильевич Тимофеев** (1902—1982) — советский ученый в области электроники и вакуумной техники. В 1933—1936 гг. изобрел несколько передающих телевизионных электронных трубок, в том числе супериконоскоп — телевизионную передающую трубку с накоплением заряда и переносом изображения с фотокатода на диэлектрическую мишень.

⁵ **Павел Васильевич Шмаков** (1885—1982) — советский ученый в области телевидения и электроники. Внес фундаментальный вклад в практику телевизионного вещания. Руководил созданием голографической ТВ-установки, создал подводную телевизионную систему.

⁶ Радиоприемник сетевой ламповый «ЭЧС-2» с 1-го квартала 1931 г. выпускал Московский электротехнический завод «Мосэлектрик».



Рис. 9.4. Структурная схема системы телевизионного вещания

Для того чтобы воспринимать изображение как непрерывный процесс, нашему зрению достаточно 25 кадров в секунду. Однако мерцания экрана все же вызывают неприятные ощущения. Поэтому для передачи изображения в телевидение используют *чересстрочную развертку*. В современном телевизионном стандарте в секунду передается 50 (60) полукадров или 25 (30) полных кадров. Принцип формирования кадра при чересстрочной развертке показан на рис. 9.5.

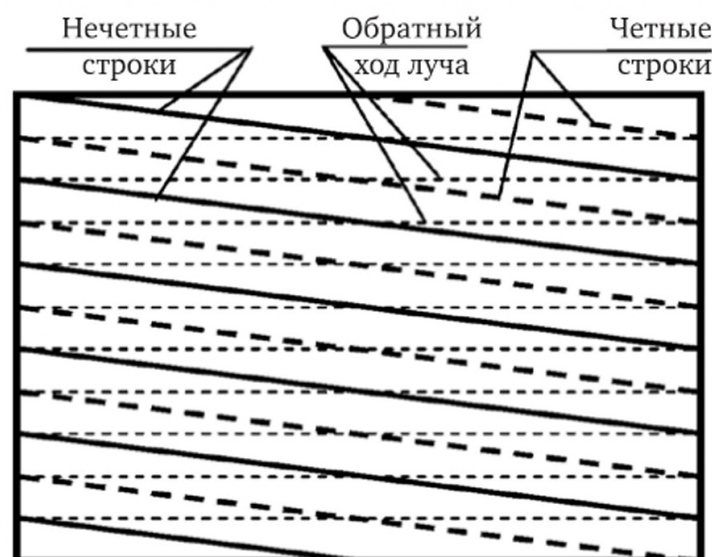


Рис. 9.5. Формирование телевизионного кадра при чересстрочной развертке

Чем выше число строк, тем качественнее, четче изображение и тем больше информации на экране. В то же время, чем выше число строк, тем шире должна быть используемая полоса частот (соответственно тем меньше можно создать телеканалов). Считается, что обычному кинокадру на 35 мм пленке соответствовало бы телевизионное изображение с 900 строками.

Первый в мире канал электронного телевидения, вещающий регулярно, был запущен в 1934 г. в Германии. В 1938 г. экспериментальные передачи электронного телевидения осуществлены телецентрами Москвы и Ленинграда.

Регулярное электронное телевидение в Москве и Ленинграде началось в 1939 году. В Москве 10 марта 1939 г. был впервые показан по телевидению кинофильм, снятый по заказу телевидения студией «Союзкинохроника».

По телевидению стали показывать концерты, театральные спектакли и телеспектакли. В 1940 г. поступили в продажу электронные телевизоры 17ТН-1/3. Работы по развитию телевидения были прерваны войной. Не смотря на это Московский телецентр 15 декабря 1945 г. первым в Европе возобновил регулярное вещание (2 раза в неделю); в 1947 г. начал работать Ленинградский телецентр. На рис. 9.6 показан рабочий момент прямой студийной передачи.



Рис. 9.6. Телевизионная студия 50-х годов XX века (СССР)

С конца 1948 г. введено в эксплуатацию внестудийное вещание. Первая внестудийная передача в СССР — трансляция футбольного матча — проведена в 1949 году. В 1954 г. на Центральной студии телевидения созданы редакции (отделы) пропаганды, промышленности, сельского хозяйства, наук и спорта.

К концу XX века в телевидении использовалось несколько стандартов. Европейские стандарты основаны на разработанном в СССР в 1944 г. стандарте с разложением на 625 строк (реально воспроизводится примерно 575). В США использовался стандарт с 525 строками (из которых воспроизводится примерно 480 — отсюда стандарт VGA). Во Франции существовала система с 819 строками, которая уже прекратила свое существование.

Массовое производство телевизоров «Москвич Т-1», «Ленинград Т-2», «КВН-49» началось с конца 40-х гг. XX века. На рис. 9.7 модели одних из первых отечественных телевизионных приемников.

Принципы цветного телевидения основаны на методах, разработанных еще в средние XV в. для цветной печати (см. раздел 1.3). В 1928 г.

Д. Бэрд продемонстрировал передачу цветного изображения электро-механической телевизионной системой. Он использовал по 3 диска Нипкова в передающей и приемной камерах. В передающей камере перед каждым диском стоял фильтр, пропускающий только один из трех основных цветов, а в телевизоре за каждым диском была установлена соответствующего цвета лампа.



а

б

Рис. 9.7. Первые модели отечественных телевизионных приемников:

а — 17ТН-1/3 (1939), б — КВН-49 (1949)

В 1938—1950 гг. в США радиовещательной компанией CBS (*The Columbia Broadcasting System*) была разработана последовательная система цветного телевидения электронного типа. С 1951 г. по 1953 г. она использовалась в США в качестве стандартной системы телевизионного вещания. Аналогичная система была разработана в СССР в 1948—1953 гг. В 1954—1956 гг. в Москве по этой системе проводилось опытное вещание. Опытную цветную передачу можно было посмотреть в Политехническом музее.

Основными недостатками последовательной системы цветного телевидения являются необходимость, во-первых, использования трех телевизионных каналов, а во-вторых, ее несовместимость со стандартным черно-белым телевидением. Проблемы удалось решить с использованием принципов уплотнения информации. Создание совместимой системы цветного телевидения стало возможным благодаря тому, что были приняты во внимание особенности зрения человека.

Регулярное цветное телевизионное вещание было начато в США в 1953 г. по системе NTSC (англ. *National Television Standards Committee* — Национальный комитет по телевизионным стандартам).

В 1958 г. в СССР была создана собственная система (кстати, самая лучшая в мире по качеству изображения), совместимая с системой черно-белого телевидения, которая использовалась с 1959 г. для опытного телевизионного вещания. Однако позднее было принято правительственное решение о разработке совместно советско-французской системы SECAM-III (от фр. *Sequentiel couleur avec memoire*, позднее *Sequentiel couleur a memoire* — последовательная передача цвета с запо-

минанием). Она была введена в эксплуатацию одновременно в СССР и Франции в октябре 1967 года. С 1967 г. началось цветное телевизионное вещание в ФРГ, Великобритании, Нидерландах и других странах Западной Европы, а также в Австралии по системе PAL (англ. *Phase Alternating Line* — построчное переключение фазы), разработанной в 1962—1966 гг. в ФРГ. Эти три системы цветного телевидения в различных модификациях существуют по сей день. Современные телевизионные приемники способны принимать изображение, переданное любой системой.

Цифровое телевидение (англ. *Digital Television* — DTV) — система передачи сигнала изображения и звука в цифровой форме с использованием сжатия для передачи данных. Основой современного цифрового телевидения является стандарт сжатия MPEG (англ. *Motion Picture Experts Group* — Экспертная группа по вопросам подвижного изображения).

Основное преимущество цифрового телевидения заключается в улучшенном качестве изображения и звука. Кроме того, цифровое телевидение предоставляет широкие возможности для получения дополнительных сервисов. На одном частотном канале, на котором раньше передавалась одна телевизионная программа, теперь можно передавать сразу несколько.

В настоящее время используются три базовых стандарта цифрового телевидения: европейский (DVB — *Digital Video Broadcasting* — цифровое видео вещание), американский (ATSC — *Advanced Television Systems Committee* — Комитет по перспективным телевизионным системам) и японский (ISDB — *Integrated Services Digital Broadcasting* — цифровое вещание единого обслуживания). Каждый из стандартов имеет несколько модификаций. В России осуществляется программа перехода на цифровое телевидение.

В настоящее время осваивается телевидение сверхвысокой четкости (англ. *Ultra High Definition Television* — UHD TV), которое включает в себя два цифровых стандарта (2160 пикселей) и (4320 пикселей), принятых Международным союзом электросвязи в августе 2012 года. Японская национальная государственная телерадиокомпания (NHK) первой реализовала на практике систему телевидения с разложением изображения по стандарту 7680 × 4320 пикселей.

Более подробно о современных телевизионных системах вам расскажут в специальных дисциплинах на старших курсах.

9.3. Радиолокация

Радиолокация — область науки и техники связанная с обнаружением и измерением координат объекта, основанная на приеме отраженных радиоволн. Она возникла в 30-х годах XX века. Ее методы позволяют определять местоположение удаленных объектов, их ско-

рость и, в некоторых случаях, опознавать его по отраженному сигналу. Уже давно успешно развивается радиолокация планет. Радиолокация является сегодня важным разделом современной радиоэлектроники.

В радиолокации, как правило, используются волны диапазона УКВ (от метровых до миллиметровых). Метровые волны применяются, главным образом, для измерения больших расстояний, миллиметровые — для точного определения малых расстояний и обнаружения небольших объектов (в радиовысотомерах, в устройствах стыковки космических кораблей и т. п.), а в последнее время и для получения радиоизображения объектов. Совместно с системами автоматики радиолокаторы используются для управления движением различных объектов.

В вопросе о приоритет создания радиолокатора не меньше путаницы, чем в вопросе об авторе изобретения телефона или радио.

Осенью 1922 года А. Тейлор¹ и Л. Янг² проводили опыты по радиосвязи с самолетом. Они обратили внимание на то, что в результате интерференции волн корабль, движущегося по реке, вызывает замирания принятого сигнала. Таким образом, можно считать, что они продемонстрировали радиообнаружитель. Часто исследования этого эффекта выдают за разработку первой в мире истинно радиолокационной системы. Однако речь об определении направления на цель и расстояния (локации) до нее тогда не велась. Известно, что еще 1897 г. во время опытов по радиосвязи в Балтийском море А. С. Попов пришел к заключению о возможности с помощью радиоволн обнаруживать металлические массы. К тому же в 1905 г. первый патент на радиолокационное устройство был выдан К. Хюльсмайеру³.

В Советском Союзе понимание потребности в средствах обнаружения самолетов, свободных от недостатков звукового и оптического наблюдения, привело к началу исследований в области радиолокации. Идея, предложенная и опубликованная в 1934 г. молодым артиллеристом П. К. Ощепковым⁴, получила одобрение высшего командования Красной Армии.

В 1932 году на базе Государственного физико-технического института был создан Ленинградский электрофизический институт (ЛЭФИ), в котором проводились исследовательские и опытно-конструкторские работы по радиолокации.

¹ **Альбер Тейлор** (англ. *Albert Hoyt Taylor*, 1879—1961) — американский радиоинженер. Внес значительный вклад в развитие радиолокации в США.

² **Лео Янг** (англ. *Leo Crawford Young*, 1891—1981) — американский радиоинженер. Был членом небольшого творческого коллектива, которому в США обычно приписывают разработку первого в мире радиолокационной системы.

³ **Кристиан Хюльсмайер** (*Christian Hulsmeyer*, 1881—1957) — немецкий физик, изобретатель и предприниматель. Его имя связывает с появлением радиолокации, хотя его устройство («телемобилескоп») обнаруживало только движение удаленного объекта.

⁴ **Павел Кондратьевич Ощепков** (1908—1992) — советский ученый, В 1931 г. окончил Московские энергетический институт. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Основатель отечественной радиолокации и интроскопии.

На начальном этапе развития радиолокации разработчики всего мира использовали в РЛС непрерывное излучение. Структура и принцип работы таких РЛС мало чем отличается от того, что обсуждалось в раздел 5.3 и изображено на рис. 5.9. В те времена такие РЛС не могли определять расстояние до цели и поэтому их называли радиоуправляемыми (на манер звукоуправливателя), радиоискателями или радиобнаружителями.

В СССР 3 января 1934 г. был проведен успешный опыт по обнаружению сигналов от гидросамолета, при его движении на расстоянии 600—700 метров от аппаратуры, приемник которой фиксировал доплеровский сдвиг частоты.

На рис. 9.8 показан прототип и опытный макет созданного в ЛЭФИ двухантенного зенитного радиоискателя «Буря».

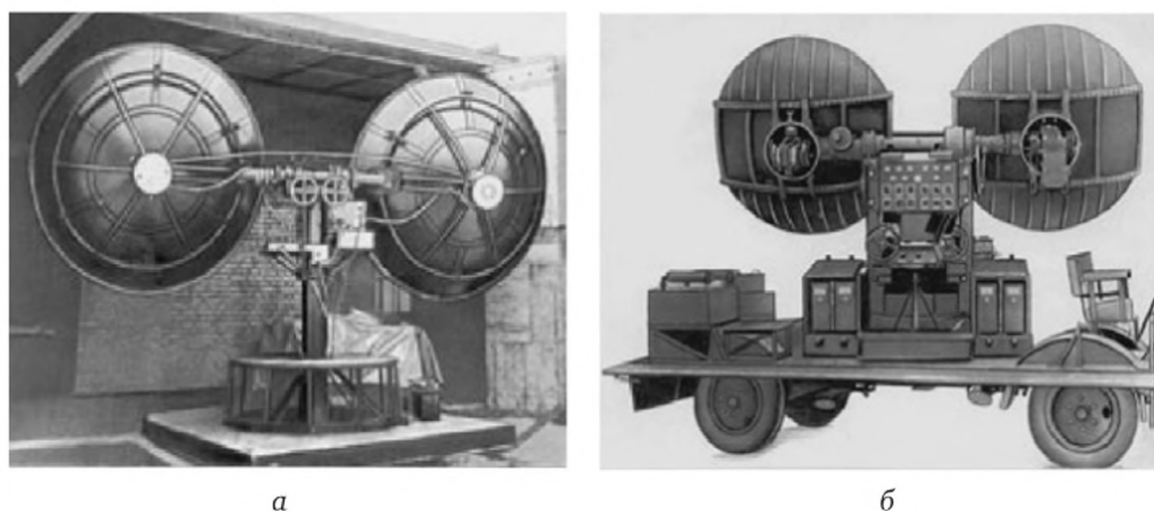


Рис. 9.8. Прототип зенитной РЛС:

а — макет антенной системы, *б* — макет станции, установленный на шасси

В 1936 г. советская сантиметровая РЛС «Буря» обнаружила самолет с расстояния 10 километров.

В 1938 г. в Московском энергетическом институте (ныне НИУ «МЭИ») был организован Радиотехнический факультет, основной целью которого была подготовка специалистов, в частности, для освоения и разработки аппаратуры и систем радиолокации.

При создании РЛС непрерывного излучения возникал ряд технических проблем, решение которых требовало высокого инженерного мастерства и усложняло аппаратуру. Некоторые из этих проблем вообще не возможно было решить в те годы. В результате технические характеристики РЛС не удовлетворяли Заказчиков. Поэтому уже в середине 30-х годов XX в. наметился переход на импульсный режим работы РЛС. Конечно, и здесь возникали технические трудности, однако, в конце концов, их удалось преодолеть. В результате РЛС стали строить почти исключительно с использованием импульсного режима. За РЛС непрерывного действия осталось обнаружение целей на малых высотах, так как наблюдать за самолетом с помощью импульсных установок

в те годы было невозможно из-за засветки электронно-лучевой трубки индикатора отражениями от местных предметов.

Передачик импульсной РЛС излучает короткие радиоимпульсы, которые достигают объекта, отражаются от него и принимаются радиоприемником. Скорость распространения радиоволн известна с высокой точностью (см. раздел. 5.1). Это позволяет вычислить дальность D по известной задержке принятого сигнала T следующим образом

$$D = c \frac{T}{2} = 3 \cdot 10^8 \frac{T}{2} = 1,5 \cdot 10^8 T.$$

Задержке сигнала на 1 мкс соответствует дальность до цели, равная 150 м. Структурная схема простейшей импульсной радиолокационной станции показана на рис. 9.9.

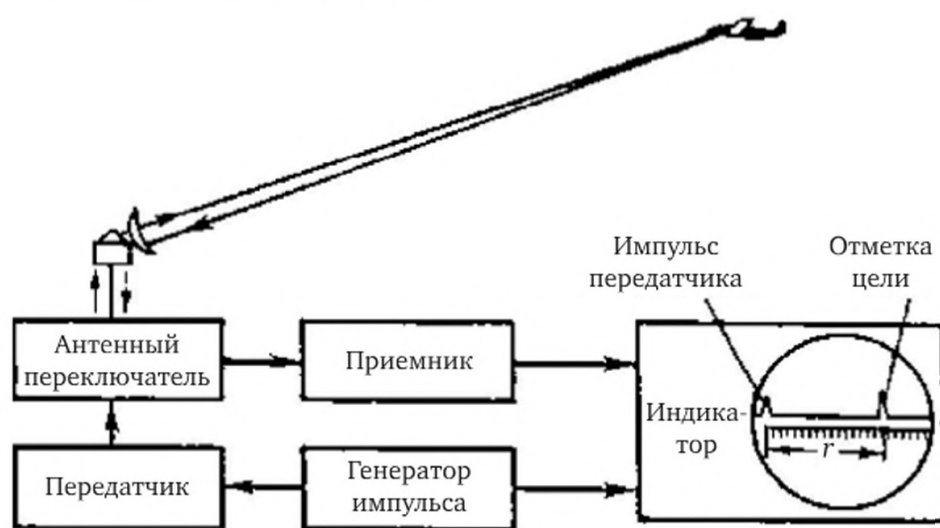


Рис. 9.9. Структурная схема простейшей радиолокационной станции для определения расстояния до объекта

Первоначально передача и прием сигналов велись на разные антенны. Однако вскоре перешли на использование единственной антенны. В структурной схеме на рис. 9.9 это становится возможным благодаря использованию антенного переключателя.

Одно из первых устройств, предназначенных для радиолокации воздушных объектов, продемонстрировал 26 февраля 1935 года Р. Уотсон-Уатт¹. Во второй половине 1930-х гг. в Великобритании первые радиолокационные станции (РЛС, радары, радиолокаторы) появились на кораблях.

В США первый контракт военных с промышленностью на разработку РЛС был заключен только в 1939 году. После появления в 1940 г. мощного импульсного магнетрона — генератора коротких радиоим-

¹ Роберт Александр Уотсон-Уатт (англ. Sir Robert Alexander Watson-Watt; 1892—1973) — шотландский физик (прямой потомок Джемса Уатта); сконструировал одно из первых устройств, предназначенных для радиолокации летящих объектов, и получил первый патент на подобную систему (1934).

пульсов сантиметрового диапазона, начиная с 1941 года, американские и британские самолеты уже оснащались РЛС.

На рис. 9.10 и 9.11 показаны образцы отечественных импульсных зенитных РЛС с отдельными антеннами. РЛС «Редут» состояла из двух подвижных станций — передающей и приемной. Ее успешные испытания прошли в 1934 году.

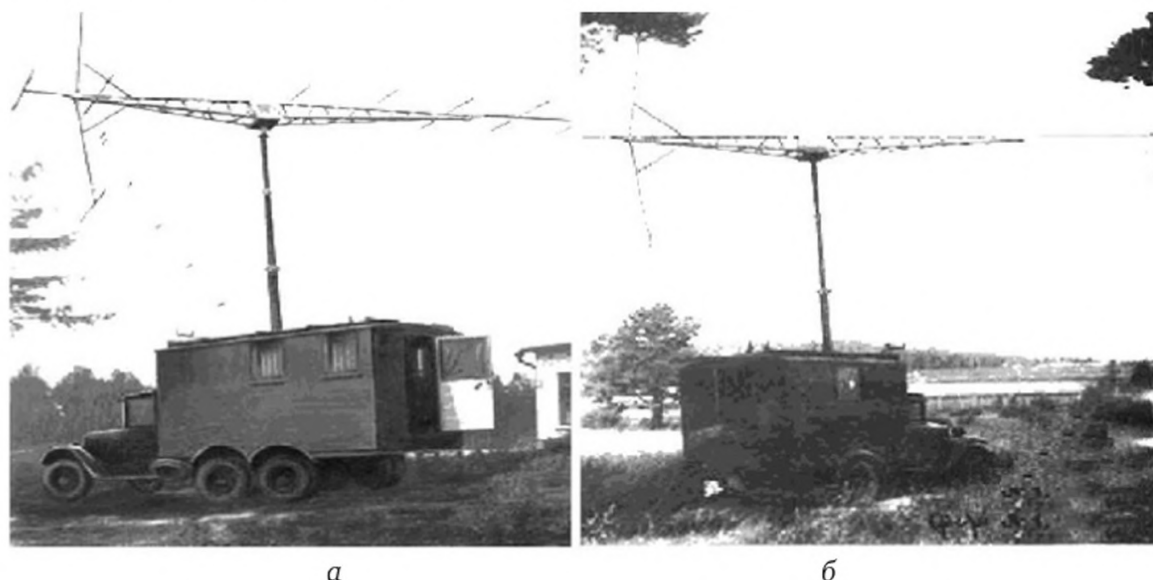


Рис. 9.10. РЛС «Редут» для обнаружения самолетов, принятая на вооружение в 1940 году:

а — передающая часть, *б* — приемная

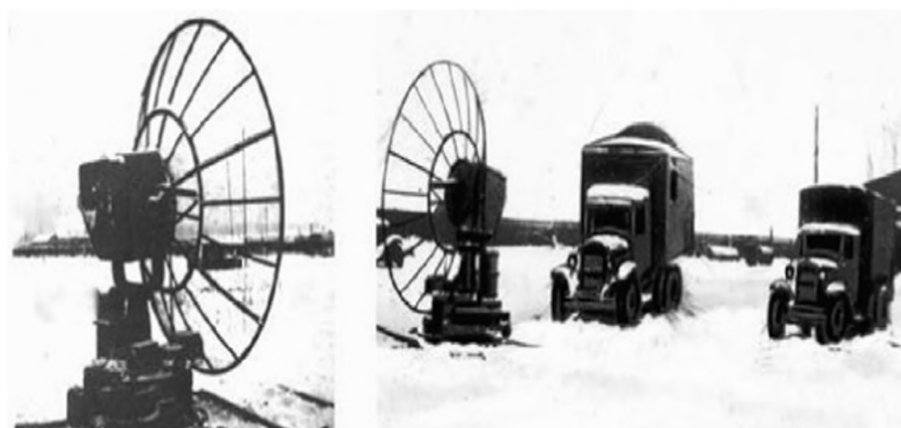


Рис. 9.11. Зенитная РЛС «Рубин» (1940)

Зенитная станция радиообнаружения «Рубин», обладавшая повышенной точностью определения координат, была разработана в 1940 году. Ее серийное производство не было начато из-за войны.

В послевоенное время радиолокация успешно развивалась. В результате РЛС стали составной частью широкого класса АСУ. На рис. 9.12 показана современная российская мобильная трехкоординатная (азимут, дальность, высота) РЛС дециметрового диапазона волн с цифровой ФАР.

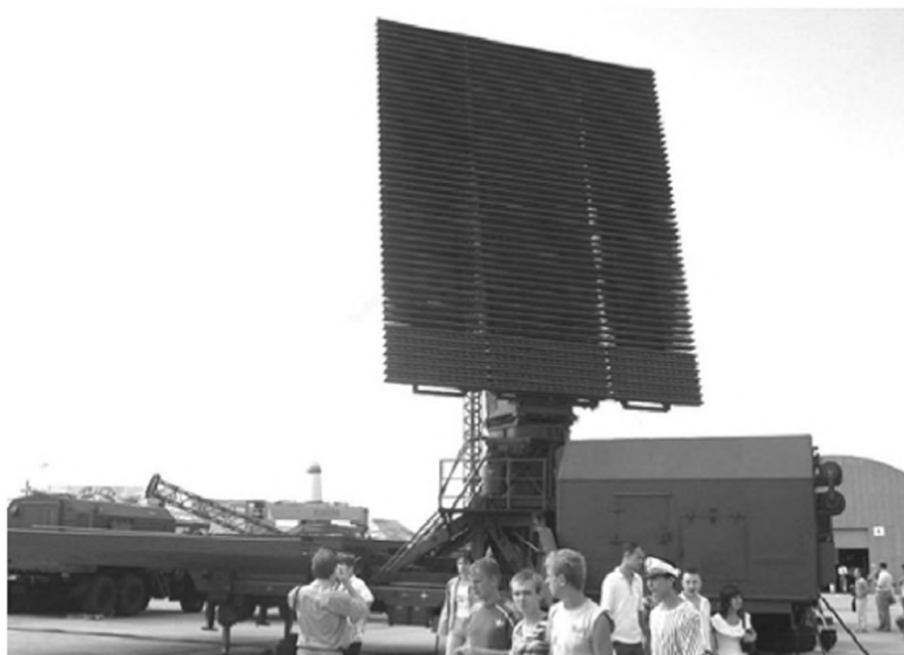


Рис. 9.12. Современная мобильная РЛС на международном салоне МАКС-2007

Интенсивность, отраженного радиосигнала зависит от свойств отражающей поверхности. Это позволяет строить растровое изображение примерно так, как это делается в телевидении (см. рис. 9.13). Подобным образом в 1983 г. под руководством В. А. Котельникова была проведена радиолокационная съемка поверхности Венеры.

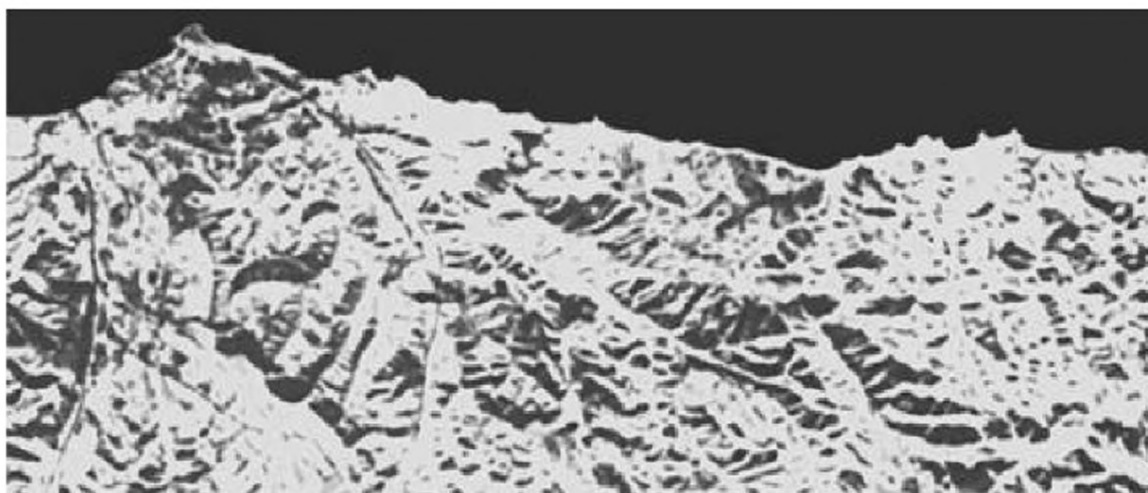


Рис. 9.13. Радиолокационное изображение горной прибрежной местности и береговой линии

Радиолокация стимулировала быстрое развитие всех элементов, необходимых для генерации, излучения и приема метровых и миллиметровых волн. Появились остронаправленные антенны, в том числе многоэлементные, снабженные специальными отражателями или представляющие собой параболоиды, достигающие в диаметре нескольких десятков метров.

Некоторые из современных РЛС поражают своей грандиозностью. На рис. 9.14 показана станция дальнего обнаружения баллистических ракет и космических объектов.



Рис. 9.14. Современная РЛС дальнего обнаружения на основе ФАР

Для РЛС были разработаны специальные радиолампы, а также электронные приборы, основанные на новых физических принципах: магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны и лампы обратной волны. Об этих приборах вы узнаете при изучении специальных дисциплин.

Создание РЛС, следящих за объектом, потребовало создания новых электромеханических узлов, а также систем автоматического управления ими. Именно для целей радиолокации в СССР создавались первые ЭВМ.

Потребности радиолокации стимулировали развитие квантовой и криогенной электроники. Появились более совершенные электронно-лучевые приборы, в том числе снабженные многоцветными экранами, что способствовало появлению цветного телевидения.

Роль радиолокации в научно-техническом и промышленном развитии мира трудно переоценить. Радиолокация, возникнув в недрах военной промышленности, теперь выполняет самые разнообразные задачи, позволяя, например, автоматически управлять движением самолетов в воздухе и кораблей в бескрайних просторах океана, обнаруживать полезные ископаемые в недрах земли и рыбу в глубинах морей, контролировать движение автотранспорта на дорогах и межпланетных кораблей на космических трассах.

9.4. Радионавигация

Радионавигация — это совокупность операций по обеспечению вождения движущихся объектов (летательных аппаратов, судов и пр.), а также по наведению управляемых объектов с помощью радиотехни-

ческих средств. Как научно-техническая дисциплина, рассматривающая принципы построения радиотехнических средств и разрабатывающая методы их использования для обеспечения движения объектов по определенной траектории и вывода их в заданную точку в заданное время.

При решении основной задачи навигации — определения местоположения объектов и элементов их движения — в радионавигации используют как специальные радиотехнические средства, так и средства, применяемые в других областях техники, например в радиолокации, радиовещании.

Действие радионавигационных средств основано на использовании распространения радиоволн над поверхностью Земли по кратчайшему (ортодромическому) расстоянию между пунктами излучения и приема с постоянной скоростью.

Радионавигация прошла длинный путь развития от первых наблюдений А. С. Попова до создания необходимых средств морской, воздушной и космической навигации, картографии и геодезической съемки. Радионавигационные методы позволяют определять положение и скорость объектов наблюдения с относительной погрешностью до 10^{-6} — 10^{-8} .

Различают пассивные методы радионавигации, когда на подвижном объекте имеются лишь устройства, принимающие сигналы опорных наземных радиостанций, и активные, использующие радиолокацию. В практику вошли преимущественно пассивные и комбинированные радионавигационные системы.

Однако, например, посадка космических аппаратов на Луну и планеты Солнечной системы обеспечивается автономными активными системами, получающими с Земли лишь исходные команды.

Простейшим устройством навигации является радиокompас. Первоначально направление определялось с его помощью вручную. Затем появился *автоматический радиокompас* — самолетный радиопеленгатор для автоматической пеленгации наземных передающих радиостанций. Он состоял из радиоприемника с двумя антеннами (направленной — рамочной и ненаправленной — штыревой) и индикаторного устройства. Автоматическая следящая система поворачивает рамку в положение минимума сигнала, совпадающее с направлением на пеленгуемую радиостанцию. Угол поворота рамки посредством электромеханической дистанционной передачи сообщается стрелочному индикатору. Для функционирования радиокompасов строились *радиомаяки* — передающие радиостанции, установленные в известном месте на земной поверхности или на движущемся объекте (например, самолете-заправщике), которые передавали специальные радиосигналы, параметры которых связаны с координатами радиомаяка.

В 30—40-х гг. XX в. радиокompасами были оснащены практически все самолеты. В фильме «Воздушный извозчик»¹, который смотрели

¹ Художественный фильм режиссера Герберта Рапопорта, снятый в эвакуации, в Алма-Ате в 1943 году.

ваши бабушки и прабабушки, самолет возвращается домой по сигналу радиостанции, транслирующей из театра оперную арию.

В 40—60-х гг. XX в. создаются фазовые и импульсно-фазовые радионавигационные системы (РНС) (см. разделы 4.1 и 5.1). Принцип определения местоположения в таких системах основан на измерении разности расстояний от радиостанций с известными координатами. Кривые, у которых разность расстояний от каждой точки до фокусов остается постоянной, в математике известны как гиперболы. Поэтому РНС такого типа называют также гиперболическими РНС.

На рис. 9.15 показана геометрия разностно-дальномерной навигационной системы. В фокусах системы гипербол расположены две радиостанции *A* и *B*. Четыре точки на рисунке соответствуют одному значению разности задержек сигнала.

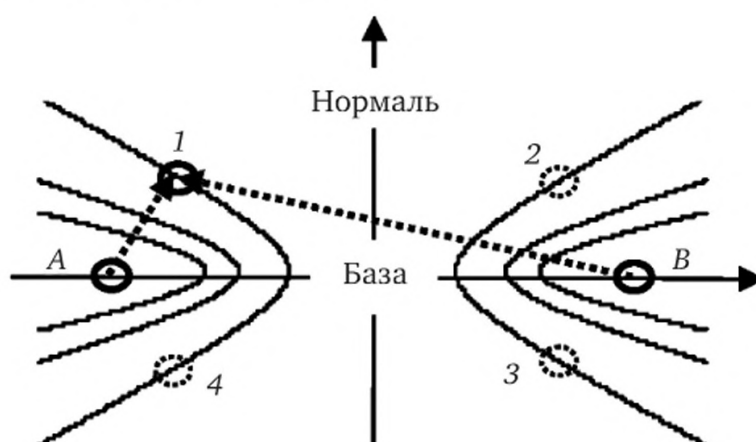


Рис. 9.15. Геометрия разностно-дальномерной РНС

Если определить знак разности, то одна пара точек (2, 3 или 3, 4 на рис. 9.15) исключается. Для окончательного устранения неоднозначности определения координат в навигационных системах используют как минимум три станции (см. рис. 9.16).

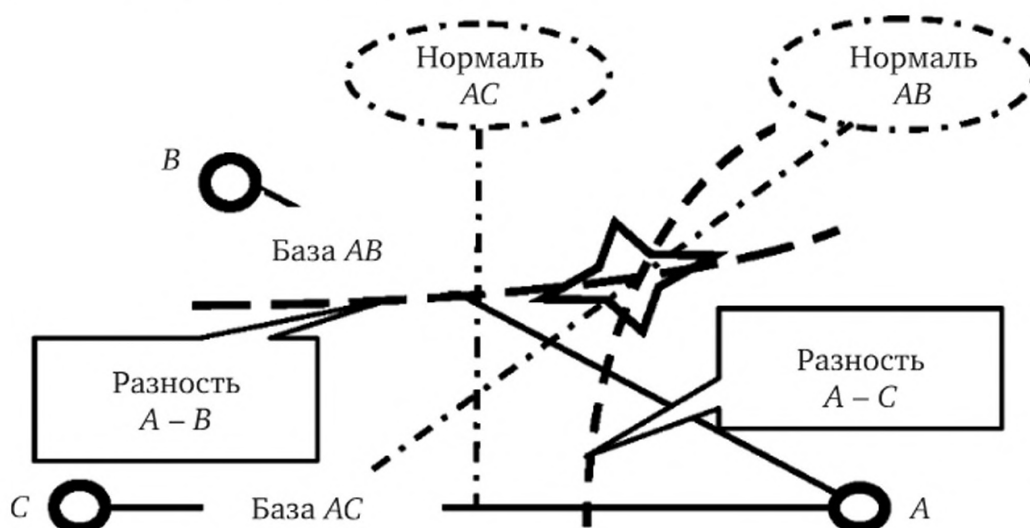


Рис. 9.16. Определение местоположения с помощью разностно-дальномерной РНС

В РНС, разбросанных на огромной территории, используются сверхмощные передатчики мощностью от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт и большие антенны от 250 до 450 метров. Измеряя разность фаз трех радиостанций (взаимное запаздывание сигналов) с точно известными координатами, можно определить местоположение с точностью до нескольких сотен метров (см. рис. 9.16).

Работа РНС требует синхронизации всех ее передатчиков. Для этого одна из станций (ведущая, например, А на рис. 9.16) оснащается квантовым стандартом частоты с относительной стабильностью частоты порядка 10^{-12} (см. раздел 8.2).

В настоящее время РНС LORAN-C (США) и «ЧАЙКА» (СССР/РФ) выступают как компоненты интегрированного радионавигационного поля. Совместное использование систем LORAN-C и «ЧАЙКА» открыло широкие возможности улучшения качества навигационного обеспечения не только в Европе и на Дальнем Востоке, но и в других регионах мира, где работают или могут быть установлены новые сети передающих станций LORAN-C/«ЧАЙКА».

Запуск первого ИСЗ в 1957 г. открыл новую страницу в развитии методов навигации. Навигационные системы постепенно из региональных превратились в глобальные.

В 70-х годах XX в. на орбиту выведены спутники международной системы «КОСПАС/SARSAT»¹ — космической системы обнаружения терпящих бедствие. Аварийный буй пеленгуется спутниками и по каналам связи информация передается в центры поисково-спасательных служб района бедствия.

В конце 70-х годов XX века в США и СССР развернулись работы по созданию спутниковых навигационных систем. По проекту 24 спутника, вращаясь на 3-х взаимно перпендикулярных орбитах в 20 тыс. км от Земли, должны обеспечивать навигацию в любой точке Земли, в любое время суток (система ГЛОНАСС — СССР и система GPS — США)².

Передатчики излучают сигналы в диапазоне единиц ГГц, что позволяет создавать миниатюрные, а, следовательно, недорогие приборы, обеспечивающих точность определения координат в единицы метров и даже доли метра. Для обеспечения такой точности на спутниках этих систем размещаются высокостабильные квантовые стандарты частоты и времени, которые корректируются с Земли по сигналам государственного эталона частоты и времени (см. раздел 8.2).

В мире существует четыре проекта глобальных радионавигационных спутниковых систем: американский GPS (24 спутника, запущены

¹ КОСПАС-SARSAT — Космическая Система Поиска Аварийных Судов — Search And Rescue Satellite-Aided Tracking.

² Принцип действия спутниковой РНС не отличается от принципа действия наземной. Различие только в том, что в любой точке Земли в любой момент времени можно наблюдать как минимум три навигационных спутника, которые образуют систему подобную показанной на рис. 9.16.

в 1989—1994 гг.), российский ГЛОНАСС (24 спутника) и два развертываемых — европейский «Galileo» (30 спутников, ввод всей группировки ожидается в 2020 г.) и китайский «Compass» (35 спутников, ввод в строй в полном объеме планируется на 2020 г.).

Первый спутник ГЛОНАСС был выведен Советским Союзом на орбиту 12 октября 1982 года. Система была официально принята в эксплуатацию с орбитальной группировкой из 12 спутников 24 сентября 1993 году. В 1995 г. в космическом сегменте системы уже было 24 спутника. Основное отличие системы ГЛОНАСС от системы GPS в том, что спутники ГЛОНАСС в своем орбитальном движении не имеют синхронности с вращением Земли, что обеспечивает им большую стабильность. Поэтому группировка спутников ГЛОНАСС не требует дополнительных корректировок в течение всего срока активного существования. В настоящее время для навигации используется объединенная система GPS/ГЛОНАСС. Элементы спутниковых навигационных систем показаны на рис. 9.17 и 9.18.

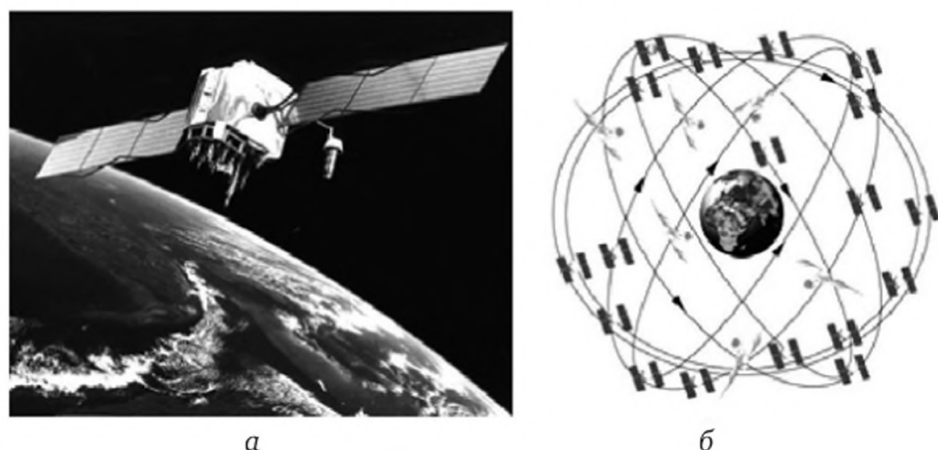


Рис. 9.17. Спутник и схема орбит системы GPS:

а — спутник системы, б — орбиты спутников

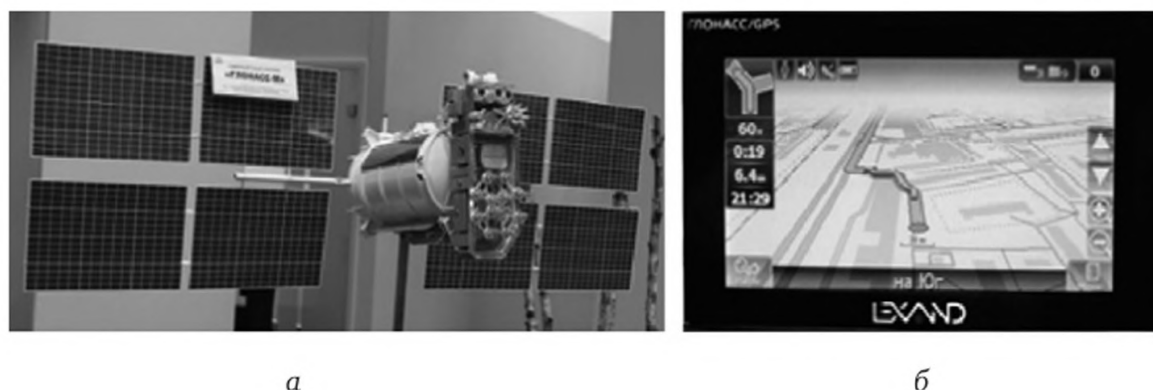


Рис. 9.18. Элементы системы «ГЛОНАСС»:

а — спутник системы, б — навигатор GPS/ГЛОНАСС

Однако ни одна из существующих систем не является универсальным навигационным средством. Каждая из систем GPS/ГЛОНАСС или LORAN-C/«ЧАЙКА» обладает определенными преимуществами и недо-

статками. Отметим лишь, что по сравнению со спутниковыми РНС наземные импульсно-фазовые системы значительно экономичнее. Расчет затрат на одного потребителя в год показывает, что для РНС GPS и LORAN-C они отличаются более чем на порядок.

Объединение различных радионавигационных устройств в единые системы в принципе позволяет обеспечить выполнение всех основных задач навигации. В наиболее сложных условиях такие системы могут использоваться совместно с нерadiотехническими средствами, например с инерциальной (гироскопической) навигационной системой.

9.5. Радиометеорология

Радиометеорология — это наука, которая изучает, с одной стороны, влияние метеорологических условий в тропосфере и стратосфере на распространение радиоволн (главным образом, УКВ), а с другой — метеорологические явления в тропосфере и стратосфере. Сведения извлекаются из характеристик принимаемых радиосигналов, в том числе собственного излучения атмосферы, как теплового, так и обусловленного электрическим разрядами.

Собственное излучение атмосферы, вызываемое грозовыми и тихими электрическими разрядами, занимают широкую полосу частот от сверхдлинных до ультракоротких волн. Они создаются не только разрядами при грозе, но и статическим электричеством в облаках, пыльных и снежных бурях, областях высокой запыленности и пр. Наблюдения за ними позволяют определять глобальное распределение грозовой активности, а также местоположение интенсивных атмосферных фронтов.

В 20-х — начале 30-х гг. XX в. было установлено преобладающее влияние метеорологических процессов на распространение УКВ (см. подраздел 6.3). Распространение волн этого диапазона в атмосфере сопровождается их преломлением, поглощением, отражением и рассеянием (см. главу 5). При распространении в атмосфере радиоволны ослабляются из-за поглощения и рассеяния молекулами кислорода и водяного пара, гидрометеорами, частицами аэрозоля и другими неоднородностями. Дождь и снег также рассеивают радиоволны (см. подраздел 6.3). Интенсивность этих явлений зависит от значения показателя преломления воздуха, являющегося функцией давления, температуры и влажности, а также наличием и свойствами капель дождя, тумана, облаков и других примесей. Поэтому радиосигналы могут содержать информацию о распределении плотности, температуры и влажности воздуха, поле скоростей ветра и его турбулентности, содержании воды в облаках, интенсивности осадков и др. В качестве примера на рис. 9.19 показано радиолокационное изображение дождя средней интенсивности.

Область радиометеорологии, занимающаяся изучением сезонных изменений коэффициента преломления, его вертикального профиля, поглощения атмосферными газами и ослабления облаками и осадками

в различных климатических районах, называется радиоклиматологией. Метеорологические условия, определяющие аномалии в распространении радиоволн могут быть предсказаны на основе синоптического анализа.

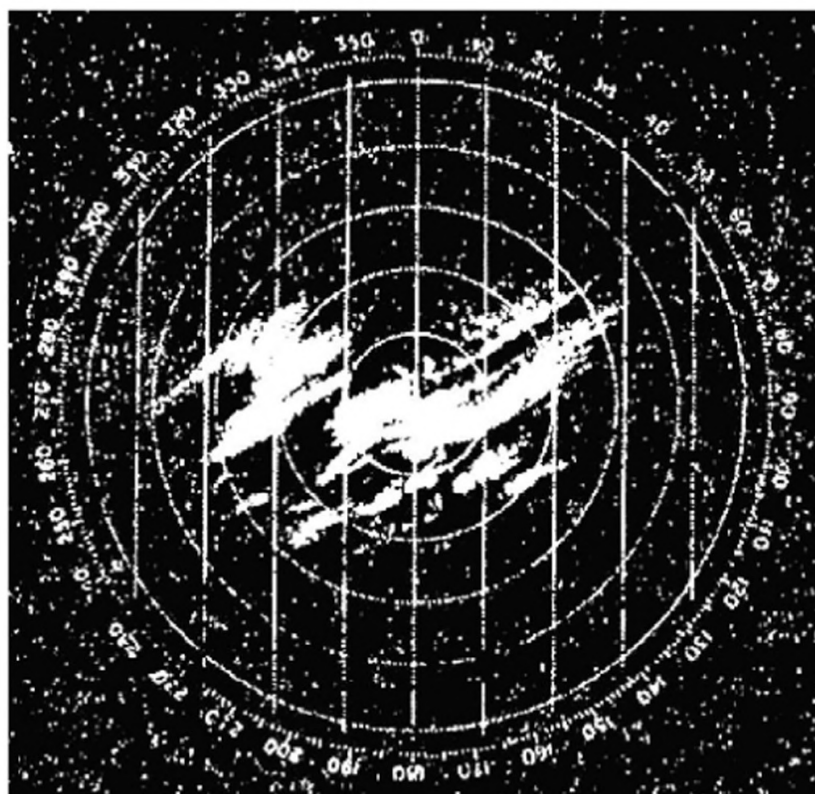


Рис. 9.19. Изображение поля осадков средней интенсивности на индикаторе обзора метеорологического радиолокатора

С появлением ИСЗ метеорологическая аппаратура стала размещаться на околоземной орбите. В апреле 1960 г. был запущен ИСЗ ТИРОС-1 (англ. «TIROS-1», *Television InfraRed Observation Satellite*) — первый в мире успешно работавший метеорологический спутник. Его вес составлял всего 122,5 кг, а диаметр около 1 м. Он предназначался для проверки возможности получения и использования фотографий облачного покрова со спутников. Спутник проработал на орбите всего 2,5 месяца. Однако передав первое в мире изображение Земли из космоса, тем самым доказал пригодность ИСЗ для наблюдения за погодой. На базе аппаратов ТИРОС в феврале 1966 г. была развернута глобальная спутниковая система.

В начале 60-х гг. XX века в СССР также проводились летно-конструкторские испытания для отработки и проверки служебных и целевых систем метеоспутников. Отрабатывались системы ориентации, стабилизации и энергоснабжения, комплексы приборов для телевизионных, оптических и инфракрасных измерений. В 1967 г. начала функционировать первая советская метеорологическая спутниковая система «Метеор».

На рис. 9.20 показаны метеорологические спутники США и СССР.

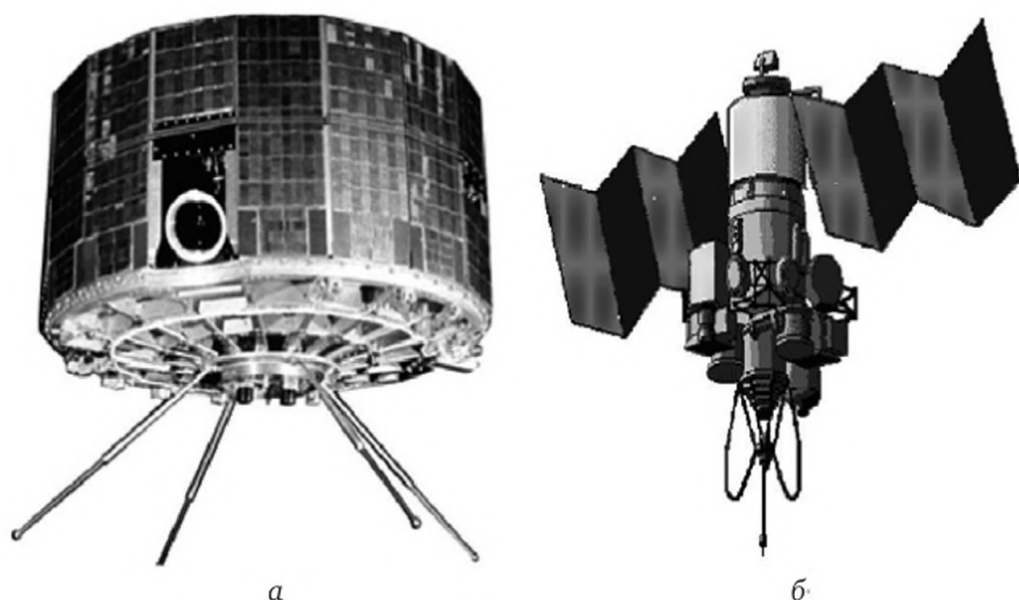


Рис. 9.20. Метеорологические спутники:
 а — метеоспутник «ТИРОС-1», США, б — спутник серии «Метеор», СССР

В 1982 году была принята в эксплуатацию Государственная метеорологическая космическая система «Метеор-2». В 90-е годы XX в. отечественная спутниковая система метеорологических наблюдений постепенно деградировала. Более 10 лет Россия пользовалась данными с американских и китайских аппаратов. Восстановление группировки началось в 2009 году.

На метеорологических спутниках применяют сканирующие радиометры (измерители естественного теплового излучения) сантиметрового и миллиметрового диапазонов для получения изображений облаков и осадков. Для мониторинга погоды необходимо иметь постоянно не менее трех спутников. Сейчас такие спутники запускаются многими странами.

9.6. Радиоастрономия

Радиоастрономия — это раздел астрономии, в котором небесные тела изучаются по приходящему от них радиоизлучению. Ее возникновение связано с исследованиями атмосферных радиопомех. В 1932 г. К. Янский¹, изучая атмосферные радиопомехи на длине волны 14 м, обнаружил постоянный шум неизвестного происхождения. Источник этого шума он в апреле 1933 г. отождествил с Млечным Путем. В июле 1935 г. К. Янский опубликовал статью, в которой указывал, что «звездный шум» имеет наибольшую интенсивность, когда антенна направлена на центральную часть Млечного Пути. Эта работа не получила отклика ни среди астрономов, ни среди радиоинженеров,

¹ **Карл Янский** (англ. *Karl Guthe Jansky*, 1905—1950) — американский физик и радиоинженер, основоположник радиоастрономии.

и в 1938 г К. Янский прекратил дальнейшие исследования в этой области. К пионерским радиоастрономическим работам К. Янского вернулись только в начале 1940-х годов.

Радиоастрономия окончательно оформилась, как одна из важнейших отраслей астрономии лишь после окончания второй мировой войны. В знак признания именем Янского назвали единицу спектральной плотности потока излучения. Его имя занесено на карту Луны.

Все тела во Вселенной в той или иной степени нагреты и частицы, из которых они состоят, находятся в постоянном тепловом движении. С этим связано электромагнитное излучение небесных тел, в том числе и радиоизлучение. Излучение такого вида называется тепловым радиоизлучением. Но это не единственный вид радиоизлучения, с которым приходится иметь дело радиоастрономам. В космических объектах часто происходят процессы, связанные с массовым выбросом заряженных частиц. Радиоизлучение, вызываемое заряженными частицами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света, в магнитных полях, называется синхротронным или нетепловым.

Радиоастрономия располагает средствами наблюдения небесных объектов на расстояниях, недоступных оптическими телескопам. Радиотелескопы сделали возможным открытие пульсаров¹, подробное исследование невидимого ядра нашей Галактики («черной дыры»), солнечной короны, поверхности Солнца и др.

Радиотелескопы — это уникальные инженерно-технические сооружения, поэтому они хорошо известны специалистам. В 1960—1965 гг. два радиотелескопа с полноповоротными параболическими антеннами диаметром 64 м были созданы в СССР. Они были разработаны под руководством А. Ф. Богомолова² в ОКБ МЭИ³ (см. рис. 9.21, а).

Эти радиотелескопы расположены на Медвежьих озерах под Москвой и вблизи города Калязин Тверской области.

В 1972 г. в Германии был построен радиотелескоп с диаметром зеркала 100 метров (дер. Эффельсберг, рядом с г. Бад-Мюнстерайфель). В течение 29 лет он был крупнейшим в мире. В 2001 г в США был вве-

¹ **Пульсар** — космический источник радио-, оптического, рентгеновского гамма-излучений, приходящих на Землю в виде периодических всплесков. Их источниками являются вращающиеся нейтронные звезды с сильным магнитным полем.

² **Алексей Фёдорович Богомолов** (1913—2009) — советский ученый-радиотехник, Герой Социалистического Труда (1957), академик АН СССР (1984). Внес большой вклад в развитие космических исследований. С 1945 г. по 1975 г. работал в МЭИ, а с 1955 по 1975 г. возглавлял кафедру радиоприборов РТФ МЭИ. С 1954 г. по 1988 г. руководил ОКБ МЭИ.

³ **ОКБ МЭИ** (Особое конструкторское бюро МЭИ) В 1947 г. распоряжением Совета Министров СССР в Московском энергетическом институте был создан Сектор специальных работ, преобразованный в ОКБ МЭИ, теперь ФГУП ОКБ МЭИ. Сотрудники ОКБ МЭИ решили ряд приоритетных государственных задач, создав впервые в СССР, а в ряде случаев, и впервые в мире, технические средства и системы, позволившие нашей стране стать космической державой, развернуть широкомасштабное телевизионное вещание, проводить исследования ближнего и дальнего космоса.

ден в строй радиотелескоп с полноповоротной антенной в виде параболического сегмента 100×100 м (Грин-Бэнк, шт. Западная Вирджиния). Создать более крупную подвижную антенну не удастся из-за проблем деформации под действием собственного веса. Поэтому крупнейшая в мире 305-метровая антенна радиотелескопа в Аресибо на острове Пуэрто-Рико неподвижно лежит в земляной чаше, имеющей в центре глубину 137 м (см. рис. 9.22).



Рис. 9.21. Радиотелескопы ОКБ МЭИ:
 а — с антенной диаметром 64 м, б — РТ-16 с антенной 16 м

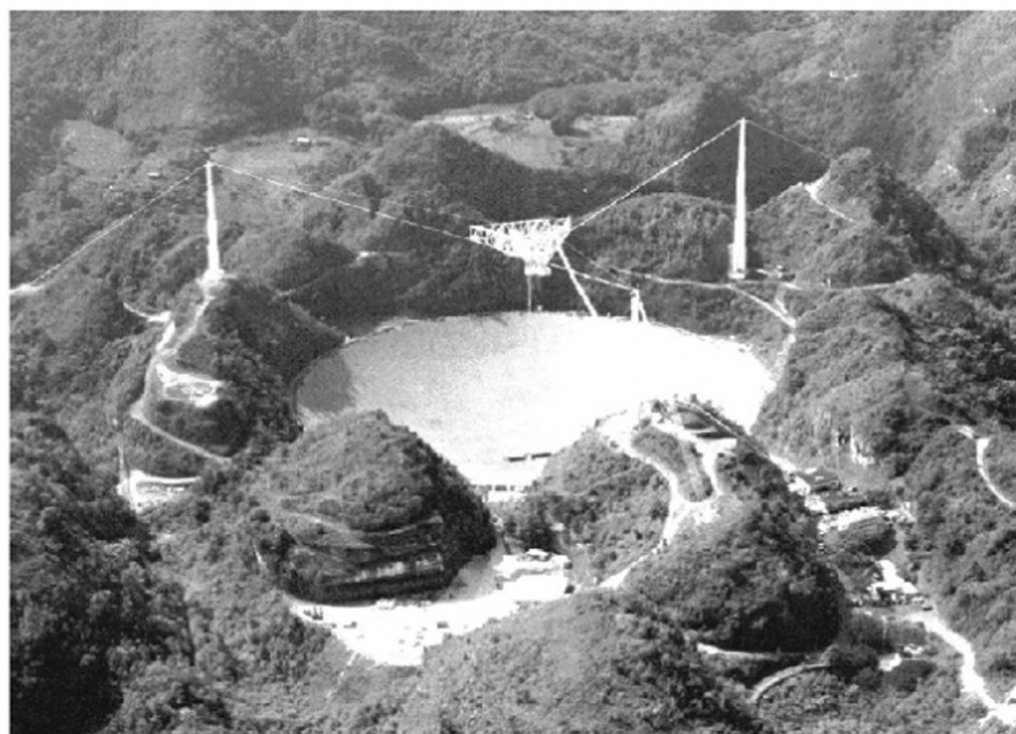


Рис. 9.22 Обсерватория **Аресибо** оснащена крупнейшим в мире радиотелескопом диаметром 305 м

Стремясь повысить разрешающую способность радиотелескопов, создают антенны сложной формы: например, в виде параболического цилиндра, вытянутого вдоль поверхности земли, или в виде кольца, представляющего собой как бы обод параболической антенны без ее средней части. Радиотелескопы с такими антеннами имеют высокое разрешение в горизонтальной плоскости и низкое — в вертикальной.

На рис. 9.23 показан общий вид радиотелескопа РАТАН-600 обсерватории АН России, расположенного вблизи станицы Зеленчукская на Северном Кавказе. Диаметр антенной системы этого радиотелескопа около 600 м. Кольцевой отражатель состоит из 895 отдельных подвижных зеркал площадью по 23 м².



Рис. 9.23. Радиотелескоп Академии наук РАТА-600

Еще более сложными являются многоапертурные радиотелескопы — «антенные решетки», — состоящие из нескольких антенн, направленных на один объект и суммирующих принятые сигналы (см. рис. 8.22).

Радиоастрономия изучает не только естественные источники космического излучения, но проводит радиолокационные исследования космических тел. Специалисты Великобритании, СССР и США почти одновременно в 1961 г. предприняли локацию Венеры для измерения расстояния до нее, а повторив эксперимент в 1964 году, довели точность измерения до нескольких километров (минимальное расстояние от Земли до Венеры 38 млн. км). С помощью современных радаров проводят также локацию Солнца, Меркурия, Марса, Юпитера и его спутников, Сатурна, его колец и спутника Титана, астероидов и ядер комет.

Вслед за радиолокацией началось активное исследование небесных тел с помощью космических зондов. Но и локация осталась очень полезным методом в астрономии. К радиолокации добавилась лазерная локация Луны с использованием доставленных на ее поверхность опти-

ческих отражателей. Этот метод позволяет регулярно измерять расстояние между Землей и Луной с точностью ≈ 1 см, что очень важно для изучения сложного относительного движения этих двух небесных тел¹.

Каждое радиоастрономическое исследование — это сложный, дорогостоящий и длительный эксперимент. Для его проведения должна быть создана уникальная аппаратура, которая должна быть отлажена и настроена. Результат такого эксперимента добывается огромным коллективом специалистов разных направлений. Не малую роль отводят и радиоинженерам.

9.7. Радиоспектроскопия

Радиоспектроскопия — это совокупность методов исследования строения вещества, а также физических и химических процессов в нем, основанных на резонансном поглощении электромагнитных колебаний в диапазоне частот от сотен килогерц до сотен гигагерц.

Радиоспектроскопия изучает вещество в твердом, газообразном и жидком состояниях. Радиоспектроскопия отличается от оптической и инфракрасной спектроскопии малыми энергиями поглощаемых квантов. Это позволяет изучать тонкие взаимодействия в веществе. Кроме того, разрешающая способность аппаратуры, применяемой в радиоспектроскопии, настолько высока, что удастся изучить взаимодействия, замаскированные обычно побочными явлениями.

Радиоспектроскопия исследует поглощение энергии, обусловленное либо вращательным движением молекул, либо тонкой структурой энергетических уровней. Резонансное поглощение обычно наблюдается в диапазоне частот 10—100 ГГц. Измерение частот вращательных спектров молекул позволяет с большой степенью точности определить структуру молекул и изучить природу химической связи. Вращательный спектр поглощения молекулы зависит от ее конфигурации. Этот спектр может быть рассчитан, если известны моменты инерции, которые зависят от конфигурации и размеров молекулы. Сравнение теоретически рассчитанных вращательных спектров молекул с экспериментально наблюдаемыми позволяет определить конфигурацию молекулы, длины связей и углы между ними. Эти данные можно использовать для синтеза новых материалов, например лекарственных препаратов.

Для исследования вращательных спектров молекул волны от генератора СВЧ пропускают через волноводную ячейку (см. рис. 9.24), заполненную исследуемым газом, откуда они попадают на детектор, сигнал которого подается на регистрирующий прибор. Сигнал детектора зависит от величины мощности, поглощенной в волноводе. Плавное изменение частоты генератора, определяют резонансную частоту и интенсивность поглощения, ширину линии поглощения.

¹ Поскольку Луна удаляется от Земли приблизительно на 4 см в год.

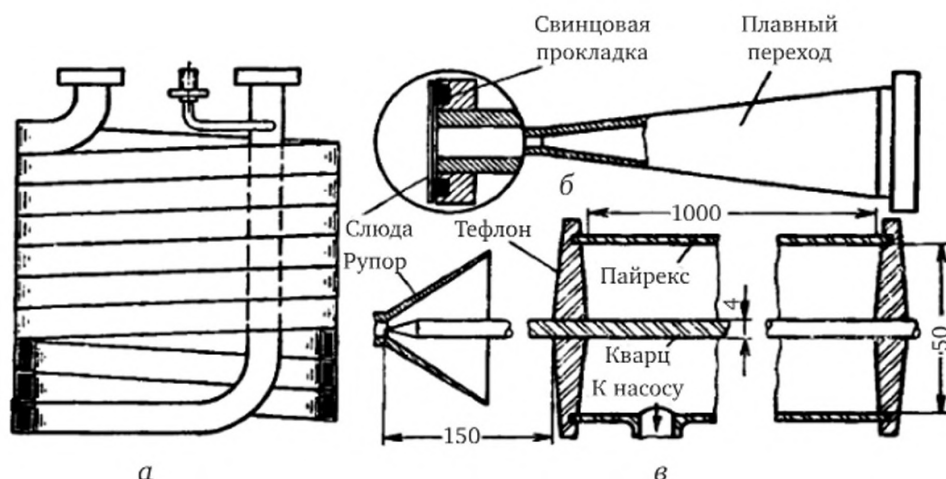


Рис. 9.24. Волноводные поглощающие ячейки радиоспектроскопов:
 а — волноводная ячейка (см. раздел 7.3), свернутая в спираль; б — плавный переход и вакуумное окно ячейки; в — ячейка с диэлектрическим волноводом (см. раздел 7.5)

Для повышения чувствительности радиоспектроскопов интенсивность поглощения модулируют с помощью электрического или магнитного полей. Модуляция происходит за счет расщепления линий в электрическом (эффект Штарка) или магнитном (эффект Зеемана) полях. Радиоспектроскопы это сложные радиоэлектронные устройства, часто сопряженные с ЭВМ.

Исследования поглощения электромагнитного поля в молекулах аммиака привело в 1954 г. к созданию советскими физиками Н. Г. Басовым¹ и А. М. Прохоровым² первого квантового генератора на молекулах аммиака — предвестника появления лазеров.

Поглощение электромагнитного поля в веществе может быть связано не только с электрическими взаимодействиями, но и с магнитными. Такое поглощение наблюдается, как правило, в присутствии постоянного магнитного поля. Оно связано с взаимодействием переменного магнитного поля с магнитным моментом атома, иона или молекулы. Поглощение носит резонансный характер и называется магнитный резонанс. В зависимости от природы магнитного момента различают:

- *ядерный магнитный резонанс (ЯМР)* — резонансное поглощение, обусловленное переходами между уровнями энергии, возникающими при взаимодействии магнитных моментов ядер с внешним магнитным полем;

¹ **Николай Геннадиевич Басов** (1922—2001) — советский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Работы Басова посвящены квантовой электронике и ее применениям. Его можно считать отцом квантового генератора.

² **Александр Михайлович Прохоров** (1916—2002) — выдающийся советский физик, один из основоположников важнейшего направления современной физики — квантовой электроники, лауреат Нобелевской премии по физике (1964), один из изобретателей лазерных технологий.

- *электронный парамагнитный резонанс (ЭПР)* — резонансное поглощение, обусловлено переходами между уровнями, возникающими при взаимодействии с внешним магнитным полем магнитных моментов неспаренных электронов атомов, ионов и свободных радикалов, а также магнитных моментов носителей тока в металлах и полупроводниках;

- *ферромагнитный резонанс (ФР)*, ферромагнитный резонанс и антиферромагнитный резонанс (АФР) — резонансное поглощение радиоволн в магнитоупорядоченных средах, связанное с коллективным движением магнитных моментов электронов.

Частота ЯМР в постоянном поле порядка 1 Тл находится в интервале частот 1—50 МГц. Линии ЯМР расщепляются и смещаются по частоте (так называемый химический сдвиг) из-за взаимодействия ядер друг с другом и с электронными оболочками атомов и молекул.

Исследования релаксационных процессов, ширины и тонкой структуры линий ЯМР дали много сведений о структуре жидкостей и твердых тел. ЯМР высокого разрешения представляет собой стандартный метод определения строения органических молекул. Тесная связь формы сигналов с внутренним движением в веществе позволяет использовать ЯМР для исследования вращений в молекулах и кристаллах, механизма и кинетики химических реакций. На ЯМР основаны приборы для прецизионного измерения и стабилизации магнитного поля.

Несколько измененный магниторезонансный радиоспектроскоп нашел применения в ЯМР-томографе. Это аппарат позволяет произвести объемную реконструкцию внутренней структуры объекта с помощью ЭВМ. Методы ЯМР широко используются не только в медицинской практике, но в медицинской науке. Ядра специально введенной примеси используются для слежения за продвижением малых доз вещества (например, лекарств) в организме. Деятельность организма изменяет характеристики ЯМР. Это используется, например, при изучении деятельности головного мозга. Все эти работы не обходятся без участия радиоинженеров.

Частота ЭПР при поле порядка 1 Тл попадает в диапазон 10—100 ГГц. Линии ЭПР расширяются и расщепляются из-за взаимодействия электронов с внутренними полями в кристаллах, с электронным окружением в свободных радикалах и с электронами проводимости в металлах и полупроводниках. Дополнительное расщепление спектральной линии ЭПР может происходить из-за взаимодействия электронов с ядрами, обладающими магнитными моментами.

Для уверенного наблюдения ЭПР, как правило, требуется охлаждение до низких температур (от 77 К — жидкий азот, до 4 К — жидкий гелий). Поэтому спектроскоп ЭПР довольно громоздкое сооружение (см. рис. 9.25).

Именно исследования ЭПР в 1956 г. привели к созданию квантового парамагнитного усилителя. Такие усилители применяются в сверхчувствительных приемниках радиотелескопов. Принцип парамагнитного

усилителя на монокристалле рубина послужил основой для создания в 1960 г. первого оптического квантового генератора — лазера.

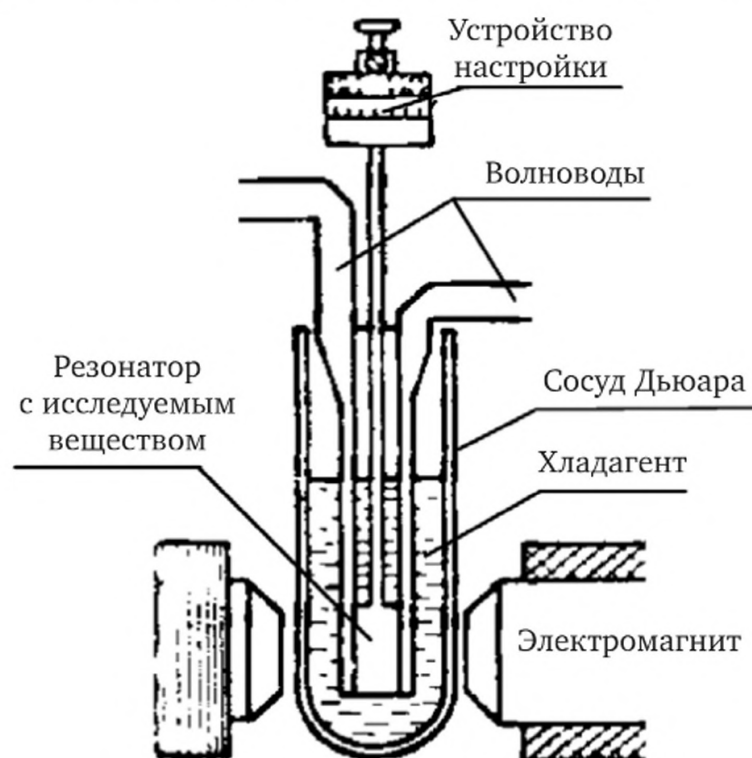


Рис. 9.25. Измерительная ячейка радиоспектроскопа ЭПР и ЦР

Диапазон резонансных частот ФР обычно лежит в области 1—300 ГГц. Спектр определяется взаимодействием электронов с внешним магнитным полем и зависит от кристаллической структуры вещества. Поскольку среда является магнитоупорядоченной, ФР легко наблюдается при комнатной температуре. Изучение ФР привело к созданию на его основе многих устройств сантиметрового и миллиметрового диапазона волн: вентиля и циркуляторов, генераторов, усилителей, параметрических преобразователей частоты и ограничителей мощности.

Ферритовые сферы из железоиттриевого граната используются для создания перестраиваемых резонаторов СВЧ диапазона. Они имеют исключительно высокую добротность (до 3000), при этом допускают перестройку по частоте в широком диапазоне за счет изменения внешнего магнитного поля. На основе таких резонаторов делают фильтры. Их также используют в генераторах СВЧ.

Несколько отдельно от описанных выше резонансных явлений находится циклотронный резонанс (ЦР), который наблюдается в металлах и полупроводниках, помещенных в постоянное магнитное поле. Это явление допускает классическое описание. Резонанс связан с движением зарядов в магнитном поле по замкнутым траекториям. Спектр ЦР в металлах определяется динамическими свойствами электронов проводимости, в полупроводниках — зонной структурой, концентрацией, подвижностью и эффективной массой электронов и дырок. Поэтому циклотронный резонанс широко применяется в физике твердого

тела при изучении свойств носителей заряда (так называемой эффективной массы). При помощи ЦР можно определить знак заряда носителей, изучить процессы их столкновений с атомами. Возможно также применение ЦР в технике сантиметровых и миллиметровых волн для генерации, усиления и регистрации электромагнитных колебаний.

В настоящее время радиоспектроскопические исследования применяются в физике, химии, биологии, медицине. В технике радиоспектроскопические методы позволяют измерять магнитные поля, температуру, давление, проводить неразрушающий контроль материалов и изделий.

9.8 Мобильная связь

Мобильная связь в широком смысле этого термина, как связь между движущимися объектами, появилась сразу же с момента открытия радио. Вначале это было телеграфная связь с морскими судами. Вскоре появилась и радиотелефонная связь.

В 1921 г. подвижной телефонной радиосвязью в США воспользовалась полиция Детройта. Это была система односторонней диспетчерской связи на частоте 2 МГц для передачи информации от центрального передатчика к приемникам, установленным на патрульных автомашинах. В 1933 г. полиция Нью-Йорка начала использовать систему двусторонней подвижной телефонной радиосвязи. Широко использовалась двухсторонняя радиосвязь в авиации, на железнодорожном транспорте.

Однако долго такой связью обеспечивались только специальные подразделения. Она была симплексной, т. е. говорить приходилось по очереди, используя знакомое всем слово «прием». Это было мало похоже на всем привычный телефон с автоматическим набором номера абонента.

Первый общедоступный подвижный радиотелефон появился в 1946 г. (Сент-Луис, США; фирма «*Bell Telephone Laboratories*»), с рабочей частотой 150 МГц. В 1955 г. начала работать 11-канальная система, Обе системы были симплексными. Автоматические дуплексные системы появились только в 1964 г.

В конце 50-х гг. XX века в СССР начинается разработка системы автомобильного радиотелефона «Алтай».

Система подвижной телефонной связи «Алтай» была введена в опытную эксплуатацию в 1963 году. Это была первая в мире система полностью автоматической мобильной связи. Аналогичная система в США, IMTS (*Improved Mobile Telephone Service* — модернизированная мобильная телефонная служба) была запущена в опытной зоне годом позже.

Первоначально система «Алтай» работала на частоте 150 МГц. В 1970 г. она уже предоставляла услуги связи в 30 городах СССР, и для нее был выделен новый диапазон 330 МГц. Это была полноценная ради-

осистема телефонной связи. В ней использовалась сеть ретрансляторов. Такой вид подвижной связи называют транкинговыми системами¹.

На рис. 9.26 показана аппаратура подвижной телефонной связи системы «Алтай» разных лет.

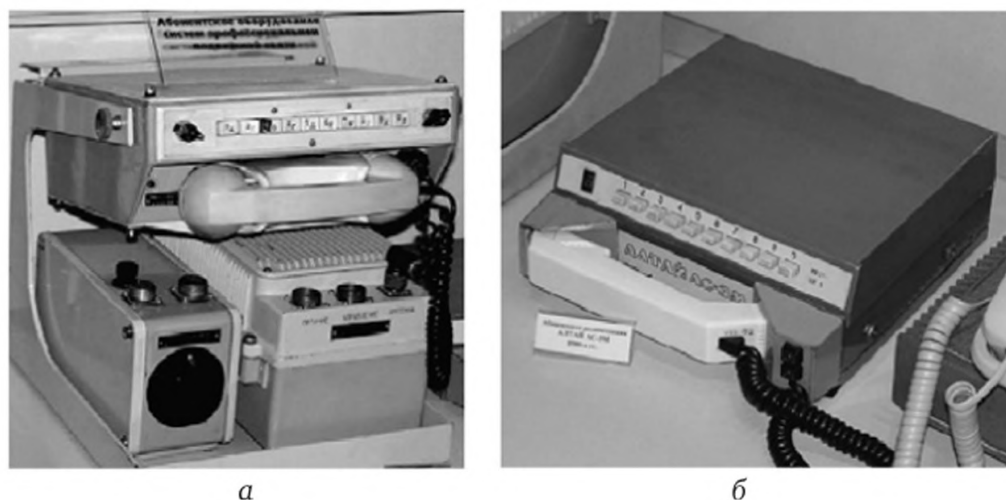


Рис. 9.26. Промышленные образцы отечественной аппаратуры подвижной телефонной связи:
а — радиотелефон «Алтай» (1960), б — «Алтай-3М» (1970)

Таким образом, к 1970 г. подвижная телефонная радиосвязь получила достаточно широкое распространение. Однако потребности быстро росли, а ограниченное число каналов в жестко определенных полосах рабочих частот препятствовало дальнейшему расширению сети. Поэтому, не смотря на имеющиеся технические возможности, внедрение радиотелефона во всех странах шло крайне медленно.

Выход, в конце концов, был найден и он состоял в использовании системы сотовой связи. Это позволило резко увеличить емкость сети за счет повторного использования частот в системе с ячеистой структурой. Сама идея была высказана еще в конце 40-х годов XX века. Однако только через три десятка лет техника достигла уровня развития, позволявшего реализовать такую систему в полном объеме.

Сети на первом гражданском стандарте сотовой связи NMT-450 (англ. *Nordic Mobile Telephony* — мобильная телефония северных стран) появились в 1981 г. в Швеции, Норвегии и Финляндии².

Ключевая особенность сотовой сети заключается в том, что общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия отдельных базовых станций (БС). Соты частично перекрываются и вместе образуют единую сеть. На идеальной (ровной и без застройки) поверхности зона покрытия одной БС представляет собой круг. Из геометрии известно, что шестиугольники плотно покрывают

¹ Система «Алтай» продолжает исправно работать в бескрайних просторах Сибири. Внешний вид современной аппаратуры мало отличается от сотового телефона.

² Однако есть сведения, что несколькими месяцами раньше она была введена в строй в Саудовской Аравии.

плоскость. Поэтому сеть имеет вид сот с шестиугольными ячейками. Английское слово «cellular» (ячейка), не учитывает реальную их форму.

Базовые станции обычно располагают на крышах зданий и вышках. Будучи включенным, сотовый телефон находит сигнал БС. После этого телефон посылает станции свой уникальный идентификационный код. Телефон и станция поддерживают постоянный радиоконтакт, периодически обмениваясь пакетами информации. Если телефон выходит из поля действия базовой станции, он налаживает связь с другой БС. На рис. 9.27 показана антенна сотовой системы связи. Ее конструкция, согласуясь с формой сот, имеет конфигурацию в виде равностороннего треугольника.



Рис. 9.27. Антенна базовой станции сотовой системы связи

Много лет ушло на разработку единого стандарта передачи информации. Связь телефона со станцией может идти по аналоговому протоколу (например, AMPS — *Advanced Mobile Phone Service* — прогрессивный мобильный телефонный сервис)¹ или по цифровому протоколу (например, GSM — *Groupe Special Mobile* — по названию группы специалистов, которая создавала стандарт²). Переход на цифровую систему существенно расширил возможности мобильной связи. По сути, после такого перехода сотовая система связи превратилась в распределенную в пространстве ЭВМ, в которой значительная часть информации и команд передается между БД и абонентами по радиоканалу.

Сотовые сети разных операторов соединены друг с другом, а также со стационарной телефонной сетью. Это позволяет абонентам одного оператора делать звонки абонентам другого оператора, с мобильных телефонов на стационарные и со стационарных на мобильные.

¹ Стандарт AMPS введен в США. Морально устарел, и в 1990 г. в США был разработан стандарт D-AMPS. В Европе и Азии нераспространен.

² Теперь этот стандарт известен как *Global System for Mobile Communications* — Глобальная Система Мобильной Связи.

Дальнейшее развитие сотовой подвижной связи осуществляется в рамках создания проектов систем третьего поколения. Они отличаются унифицированной системой радиодоступа, объединяющей существующие сотовые и прочие «бесшнуровые» системы с информационными службами XXI века, и будут иметь архитектуру единой сети. В Европе такая концепция, получившая название UMTS (англ. *Universal Mobile Telecommunications System* — универсальная система подвижной связи). Она предусматривает объединение функциональных возможностей существующих цифровых систем связи в единую систему 3-го поколения (3G от англ. *third generation*) с предоставлением абонентам стандартизированных услуг подвижной связи. Работы по созданию международной системы подвижной связи общего пользования ведутся Международным союзом электросвязи. Для нее определен диапазон частот 1—3 ГГц, в котором будут выделены полосы шириной 60 МГц для стационарных станций и 170 МГц — для подвижных станций. Начало испытаний наземных компонентов системы прошло в 2000 году, а ввод спутниковой подсистемы в полосах частот 1980—2010 и 2170—2200 МГц — в 2010 году.

Наконец теперь осваивается 4-е поколение (4G от англ. *Fourth generation*) — поколение мобильной связи с расширенными возможностями. К этому поколению принято относить перспективные технологии, позволяющие осуществлять передачу данных со скоростью, превышающей 100 Мбит/с подвижным и 1 Гбит/с — стационарным абонентам. Новые технологии мобильной связи были официально признаны Международным союзом электросвязи на конференции в Женеве в 2012 году.

Приведенные примеры показывают, как разнообразны области использования радиоэлектроники, и какую важную роль она играет в современном обществе.

Ни одна страна Мира не может считать себя независимой без собственной радиоэлектронной промышленности, без фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на ее дальнейшее развитие.

Радиоэлектроника в свою очередь способствует развитию смежных областей науки, техники и технологии. Делает человека более сильным. Позволяет ему покорять время и пространство.

Она расширяет информационное пространство человечества и способствует таким образом совершенствованию общественных отношений, а в конечном счете совершенствованию человека, как вершины эволюции жизни на Земле.

На вас, будущие инженеры, лежит святая обязанность преумножить то, что было сделано до вас.

Контрольные вопросы и задачи к главе 9

1. Что понимают под термином «радиовещание»?
2. Какую дату и почему можно принять за дату появления радиовещание?
3. В чем состоит заслуга Р. О. Фессендена?
4. Какие виды модуляции используются в радиовещании?
5. Опишите структурную схему телевизионного канала.
6. Для чего в телевизионном стандарте применяется чересстрочная развертка?
7. В чем состоит основной принцип радиолокации?
8. Опишите принцип радионавигации.
9. Как устроен простейший радиокомпас?
10. Измерения навигационной системы некоторого подвижного объекта дали значение разности задержек сигналов 0,1 мс. Известно, что объект находится на траверсе двух радиомаяков, расстояние между которыми равно 300 км. Найдите расстояние между объектом маяками.
11. Что такое система «КОСПАС-САРСАТ»?
12. Опишите состав спутниковых навигационных систем.
13. Когда, как и кем было открыто радиоизлучение объектов Вселенной?
14. Что исследует радиоастрономия?
15. Приведите примеры радиотелескопов, существующих в мире.
16. Чем занимается радиоспектроскопия?
17. Опишите конструкцию антенны радиотелескопа РАТАН-600. Учитывай ее размеры, и используя материал раздела 5.4, оцените значение угла зрения радиотелескопа РАТАН-600 на рабочей частоте 1 ГГц.
18. Используя материал раздела 5.4, оцените значение угла зрения радиотелескопа ОКБ МЭИ на рабочей частоте 30 ГГц.
19. Почему радиоспектроскопию можно считать истоком создания лазеров?
20. Что такое магнитный резонанс, и какие типы таких резонансов вам известны?
21. Что такое ЯМР, и для каких целей он используется?
22. Что такое ЭПР, и для каких целей он используется?
23. Что такое ФМР, и для каких целей он используется?
24. Что такое циклотронный резонанс?
25. Для каких целей используется ЯМР?
26. Что такое транкинговая система подвижной связи?
27. Что такое симплексная и дуплексная связь.
28. В чем состояла основная проблема, которая препятствовала массовому применению подвижной радиосвязи?
29. Опишите принцип сотовой связи.
30. Какие частоты используются в сотовых системах связи?
31. Какие проблемы возникают в подвижной связи из-за дифракции волн на окружающих сооружениях?

Заключение

Итак, мы с вами добрались до последней страницы книги. Что же в конце сказать вам — будущим инженерам? Пожалуй, следующее.

История радиотехники и радиоэлектроники представляет собой образцовый пример того способа формирования инженерно-технической теории, когда исходным пунктом развития как новой техники и отрасли промышленности, так и фундаментальной теории и научно-технической дисциплины, явилось единство фундаментальной физической теории и физического эксперимента.

Зародившись в конце XIX в. в недрах физики, радиотехника восприняла многие разделы математики, воспользовалась достижениями технологий XX века. В результате она сформировалась, как научно-техническое направление, включающее в себя большое разнообразие фундаментальных теоретических положений, методов описания и анализа разнообразных явлений, способов и приемов практической деятельности.

Прекрасной иллюстрацией к сказанному выше являются слова, принадлежащие академику В. А. Котельникову: «Началась радиотехника с телеграфа, затем появились радиовещание, телевидение, телеметрия, радионавигация, радиолокация, радиоастрономия, использование радиотехники в медицине, в приборостроении, в атомной технике, в информационных сетях и многое другое. Процесс развития радиотехнической науки и ее приложений продолжается».

Получив диплом о высшем техническом образовании, вы можете сосредоточиться на разработке конкретных электронных схем или заняться разработкой радиосистем. Если вам нравится возиться с ПК, то сможете заняться разработкой сигнальных процессоров и их программированием. Если у вас склонность к математике, то в радиоэлектронике большое число математических задач от решения дифференциальных и интегральных уравнений до математической статистики и криптографии. Если же нравится физика, то можно заняться поиском новых физических принципов, которые можно использовать для создания устройств обработки и хранения информации. Для тех, кто наделен организаторским талантом, найдется работа на строительстве уникальных радиотехнических сооружений.

Как видите, перед вами простирается обширное поле деятельности. Если вы будете упорно учиться и проявите настойчивость, то вас ждет богатый урожай.

Однако не затягивайте с посевной кампанией.

Начинайте сейчас же!

Рекомендуемая литература

Основная

1. Бренев И. В. Начало радиотехники в России. — М.: Сов. радио, 1970.
2. Ванюшин М. А. Занимательная электроника и электротехника для начинающих и не только... — М.: Наука и Техника, 2016.
3. Гуткин Л. С. Современная радиоэлектроника и ее проблемы. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1980.
4. Зиновьев А. Л. Филиппов Л. И. Введение в специальность радиоинженера: Практическое пособие для радиотехнических специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1989.
5. Лезин Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: учеб. пос. для вузов. — М.: Радио и связь, 1986.
6. Лосев А. К. Введение в специальность «Радиотехника»: учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1980.
7. Поляков В. Т. Посвящение в радиоэлектронику. — М.: Радио и связь, 1988.
8. Ревич Ю. В. Занимательная электроника. — 3-е издание. — СПб.: БХВ-Петербург, 2015.
9. Электросвязь. Введение в специальность: учеб. пособие для вузов / В. Г. Дурнев, А. Ф. Зенкевич, Б. И. Крук и др. — М.: Радио и связь, 1988.

Дополнительная

10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — 13-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
11. Зельдович Я. Б., Яглом И. М. Высшая математика для начинающих физиков и техников. — М.: Наука, 1982.
12. Яворский. Б. М., Пинский А. А. Основы физики. В 2 т. — 5-е изд., стереот. — М.: Физматлит, 2003.
13. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения с ответами и решениями к выпускам 1—9: пер. с англ. / под ред. Я. Смородинского. — 4-е изд. — М.: Эдиториал УРСС, 2004.
14. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем / под ред. Е. М. Лекина. — 2-е изд. — М.: Мир, 1985.
15. Дж. Дэвис, Дж. Карр. Карманный справочник радиоинженера: пер. с англ. / под ред. И. А. Сенникова. — М.: Додэка-XXI, 2002.
16. Изобретение радио А. С. Поповым: сборник / под ред. А. И. Берга. — М. — Л., 1945.

17. Из предыстории радио : сборник. / сост. С. М. Рытов. — М. — Л., 1948.
18. Очерки истории радиотехники, М., 1960; Изобретение радио. А. С. Попов. Документы и материалы, под ред. А. И. Берта, М., 1966.
19. Очерки развития техники в СССР, [кн. 3], М., 1970; Бренев И. В. Начало радиотехники в России, М., 1970.
20. Крыжановский Л. Н. История изобретения и исследований когерера // Успехи Физических Наук. — Т. 162. — № 4. — Апрель 1992. — С. 143—152.
21. Джон М. Мак Кинли. Радар. История изобретения. Эволюция инновации / пер. с англ. языка С. М. Смольского. — Киев: Освита, 2010. — С. 352.
22. Митин Г. П. Условные обозначения в отечественных и зарубежных электрических схемах. — М.: Изумруд, 2003.
23. Размахнин М. К. Радиолокация без формул, но с картинками — М.: Сов. радио, 1971.
24. Дригалкин В. В. Как освоить радиоэлектронику с нуля. Учимся собирать конструкции любой сложности. — М.: НТ Пресс, 2007. — 160 с.
25. Эймишен Ж.-П. Электроника?.. Нет ничего проще! — М.: Энергия, 1970. — 248 с.
26. Айсберг Е. Д. Радио?.. Это очень просто! / пер. с француз. М. В. Комаровой и Ю. Л. Смирнова. — М. — Л. Энергия, 1967.
27. Айсберг Е. Д. Телевидение?.. Это очень просто! / пер. с франц. под общ. ред. А. Я. Брейт-барта. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, Л., 1967.
28. Айсберг Е. Д. и Дури Ж.-П. Цветное телевидение?.. Это почти просто!: пер. с франц. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1975.

Новые издания по дисциплине «Радиоэлектроника» и смежным дисциплинам

1. Белов Л. А. Радиоэлектроника. Формирование стабильных частот и сигналов: учебник для бакалавриата и магистратуры. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

2. Берикашвили В. Радиотехнические системы: основы теории: учеб. пособие для академического бакалавриата. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

3. Бонч-Бруевич М. А. Основы радиотехники. Собрание трудов. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

4. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / О. А. Агеев [и др.]; под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

5. Киселев В. И., Кузнецов Э. В., Копылов А. И., Лунин В. П. Электротехника и электроника. В 3 т. Том 2. Электромагнитные устройства и электрические машины: учебник и практикум для академического бакалавриата / под общ. ред. В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

6. Лунин В. П., Кузнецов Э. В. Электротехника и электроника. В 3 т. Том 1. Электрические и магнитные цепи: учебник и практикум для академического бакалавриата / под общ. ред. В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

7. Нефедов В. И., Сигов А. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для академического бакалавриата / под ред. В. И. Нефедова. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

8. Осадченко В. Х., Волкова Я. Ю., Кандрина Ю. А. Электротехника: фильтры высоких и низких частот: учеб. пособие для вузов. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

9. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Интегральные схемы: учебник для бакалавриата и магистратуры / Ю. В. Гуляев [и др.]; под ред. Ю. В. Гуляева. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

10. Основы теории цепей. Сборник задач: учеб. пособие для академического бакалавриата / В. И. Семенцов [и др.]; под ред. В. П. Попова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

11. Радиотехнические системы: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / М. Ю. Застела [и др.]; под общ. ред. М. Ю. Застела. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

12. Романюк В. А. Основы радиосвязи: учебник для вузов. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

13. Сигов А. С., Иванов В. И., Лучников П. А., Суржиков А. П. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Ионно-плазменные технологии: учебник для бакалавриата и магистратуры / под ред. А. С. Сигова. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

14. Сигов А. С., Иванов В. И., Лучников П. А., Суржиков А. П. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств. Электронные радиационные технологии: учебник для бакалавриата и магистратуры / под ред. А. С. Сигова. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

15. Формирование колебаний и сигналов: учебник для академического бакалавриата / А. Р. Сафин [и др.]; под ред. Н. Н. Удалова, В. Н. Кулешова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

16. Шибаетов С. С., Помазанов А. В., Вольфовский Б. Н. Акустооптические процессоры. Алгоритмы и погрешности измерений: учеб. пособие для вузов. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

17. Шогенов А. Х., Стребков Д. С. Основы теории цепей: учеб. пособие для академического бакалавриата / под ред. Д. С. Стребкова. — М.: Издательство Юрайт, 2018.

Приложения

Приложение 1

Хронология событий

Около 200 тыс. лет назад — обособление эволюционной линии современных людей и начало всемирной истории, под которой условились понимать историю человечества от появления первого человека — разумного (лат. *Homo sapiens*) до настоящего времени. Начало ускоренного развития речи и сознания.

Около 4000 лет назад — создание древними финикийцами буквенно-звукового алфавита, который послужил образцом для алфавитов многих других народов.

Около 1440 — ювелир И. Гуттенберг изготовил свой первый печатный станок и издал первую книгу типографским способом.

1464 — во Франции Людовик XI учредил службу королевских курьеров. По всем его владениям была раскинута сеть станций для смены лошадей. Так родилась современная централизованная почта. Первоначально почта предназначалась исключительно для надобностей правительства.

1653 — появление первых общедоступных почтовых ящиков во Франции, которые для удобства отправителей местной корреспонденции установили в парижских кварталах.

1665 — начало регулярного почтового сообщения в России.

1791 — К. Чапп и его брат И. Чапп изобрели семафорный телеграф и построили первую линию между Парижем и Лионом.

1820 — Г. Эрстед¹ обнаружил связь между электричеством и магнетизмом — явление, которое легло в основу уравнений Максвелла.

1831 — М. Фарадей открыл электромагнитную индукцию — явление, которое легло в основу уравнений Максвелла.

1832 — спустя 106 лет в архиве было найдено письмо М. Фарадея: «Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в запечатанном конверте в архивах Королевского общества». В письме содержался совершенно определенный вывод, что на распространение электрического и магнитного взаимодействия требуется время. Он указал, что хотел бы проверить свои идеи экспериментально, но ввиду заня-

¹ Ханс Кристиан Эрстед (дат. *Hans Christian Ørsted*, 1777—1851) — датский ученый, физик, исследователь явлений электромагнетизма.

тости решил передать письмо на хранение, чтобы закрепить за собой открытие фиксированной датой.

1832 — П. Л. Шиллинг создает первый в мире пригодный для практического использования электрический телеграф.

1837 — С. Морзе запатентовал электромеханический телеграфный аппарат и создал телеграфную азбуку.

1851 — на Специальной Конференции Европейских наций код Морзе принят в качестве единого телеграфного кода. Известный как «Международный код Морзе» или «Континентальный код», в отличие от «оригинального», использует черточки одной длины.

1855 — Д. Хьюз запатентовал буквопечатающий телеграф, получивший широкое распространение. В устройстве использовалась клавиатура, каждая клавиша которой обеспечивала печать соответствующего символа на удаленном печатном аппарате.

1866 — М. Лумис¹ использовал радиоволны для передачи сигналов между двумя холмами в штате Западная Вирджиния на расстоянии 14 миль (22,5 км), с использованием антенн, подвешенных к воздушным змеям.

1872 — М. Лумис 30 июля получил первый в мире патент на беспроводную связь (патент США № 129 971). В 1873 он основал фирму «Loomis Aerial Telegraph Co.» Недостаток средств не позволил М. Лумису продолжить эксперименты.

1873 — Дж. Максвелл опубликовал двухтомный «Трактат об электричестве и магнетизме», в котором изложил, созданную им теорию электромагнитного поля.

1876 — А. Бэлл патентует телефон.

1879 — Д. Хьюз при работе с индукционной катушкой обнаружил эффект распространения электромагнитных волн. Однако позднее коллеги убедили его, что речь идет всего лишь об индукции.

1881 — Ш. Бидвелл² изобрел прибор для передачи изображений — «сканирующий фототелеграф» — прообраз технологии передачи неподвижных изображений по телефонной линии (факсимильной связи).

1887 — Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн. С помощью устройства, которое он назвал вибратором, осуществил успешные опыты по передаче и приему электромагнитных волн на расстояние без проводов.

1890 — Э. Бранли изобретен прибор для регистрации электромагнитных волн, названный им радиокондуктор (позднее — когерер).

1891 — Н. Тесла в ходе лекций публично описал принципы передачи электромагнитных волн на большие расстояния.

¹ Махоил Лумис (англ. *Mahlon Loomis*, 1826—1886) — американский врач-стоматолог, известен своим предложением беспроводной связи, основанной на идее заряда слоя атмосферного воздуха.

² Шелфорд Бидвелл (англ. *Shelford Bidwell*, 1848—1909) — английский физик и изобретатель, известен также исследованиями селеновых фотоэлементов.

1893 — Н. Тесла патентует радиопередатчик и изобретает мачтовую антенну.

1894 — Г. Маркони под влиянием идей профессора А. Риги начинает эксперименты по радиотелеграфии. Однако нет никаких письменных свидетельств того времени, которые могли бы подтвердить опыты, проведенные им в 1894 году.

1894 — 14 августа первая публичная демонстрация опытов по беспроводной телеграфии О. Лоджем на лекции в Музее естественной истории Оксфордского университета.

1895 — 7 мая на заседании РФХО в Петербурге А. С. Попов демонстрирует опыты с «прибором для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» — первый радиоприемник, используя в качестве источника электромагнитного излучения вибратор Герца, а в качестве регистрирующего устройства усовершенствованную схему когерера О. Лоджа.

1895 — Н. Тесла патентует радиоприемник.

1895 — в сентябре по некоторым утверждениям А. С. Попов присоединил к своему приемнику телеграфный аппарат и получил запись радиосигналов принимаемых от грозовых разрядов.

1896 — 24 марта А. С. Попов на заседании РФХО, используя вибратор Герца и приемник собственной конструкции, передает на расстояние 250 м радиограмму: «Генрих Герц».

1896 — 2 июня Г. Маркони подает заявку на патент Великобритании.

1896 — 2 сентября Г. Маркони демонстрирует свое изобретение на равнине Солсбери (Англия), передав радиограммы на расстоянии 3 км.

1897 — О. Лодж изобрел и запатентовал (16 августа 1898 г. патент № 609154) принцип настройки колебательной системы на резонансную частоту с помощью изменения индуктивности и емкости (впоследствии он продал патент Г. Маркони).

1897 — Э. Дюкрете¹ строит экспериментальный приемник беспроводной телеграфии по чертежам, предоставленным ему А. С. Поповым.

1897 — изучая результаты опытов на Балтике по прерыванию связи между кораблями «Европа» и «Африка» в моменты прохождения между ними крейсера «Лейтенант Ильин», А. С. Попов пришел к заключению о возможности с помощью радиоволн обнаруживать металлические массы. Во время приведения этих опытов Он также предложил способ определения направления на работающий передатчик — принцип современной радиолокации и радионавигации.

1897 — 2 июля Г. Маркони получил патент Великобритании № 12039 на усовершенствование передачи импульсов, сигналов и аппаратуры беспроводного телеграфа.

¹ Эжен Дюкрете (фр. *Eugene Adrien Ducretet*, 1844—1915) — французский предприниматель, производитель научных инструментов и приборов. Один из первых во Франции продемонстрировал эксперименты по радиотелеграфии.

1897 — 6 июля Г. Маркони передает фразу «Viva l'Italia» из-за линии горизонта на расстояние 18 км.

1897 — в ноябре Г. Маркони начинает строительство первой постоянной радиостанции на острове Уайт¹.

1898 — в январе Г. Маркони передает сообщения журналистов из Уэльса. Это было первое практическое применение радио.

1898 — в мае Г. Маркони впервые применяет на практике систему частотной настройки передатчика и приемника.

1898 — Г. Маркони открывает первый в Великобритании «завод беспроволочного телеграфа».

1898 — Э. Дюкретэ приступает в Париже к мелкосерийному выпуску приемников системы А. С. Попова.

1898 — присуждение А. С. Попову премии Русского Технического Общества «за изобретение приемника электромагнитных колебаний и приборов для телеграфирования без проводов».

1899 — К. Браун² предложил разделить антенну и искровой разрядник. При этом разрядник помещался в колебательном контуре, а антенна связывалась с этим контуром индуктивно.

Схема К. Брауна позволяла излучать в пространство существенно большую часть энергии электрической искры.

1899 — в мае помощники А. С. Попова П. Н. Рыбкин и Д. С. Троицкий обнаружили детекторный эффект когерера. Это позволило А. С. Попову модернизировать свой приемник для приема сигналов на головные телефоны оператором и запатентовать изобретение как «телефонный приемник депеш».

1900 — радиосвязь впервые в России была успешно использована в морской спасательной операции. По инструкциям А. С. Попова была построена радиостанция на острове Готланд³, возле которого находился севший на мель броненосец береговой обороны «Генерал-адмирал Апраксин». Радиотелеграфные сообщения на радиостанцию острова приходили с находящейся в 25 милях передающей радиостанции Российской ВоенноМорской базы в Котке⁴.

1900 — 26 апреля Г. Маркони получает патент Великобритании № 7777 на систему настройки частоты «*Oscillating Sintonic Circuit with Inductance and Capacity*».

1900 — работы А. С. Попова отмечены Большой золотой медалью и Дипломом на международной электротехнической выставке в Париже.

¹ **Остров Уайт** (англ. *Isle of Wight*) — самый большой остров у побережья Англии, расположен в проливе Ла-Манш на расстоянии 5—8 км от побережья.

² **Карл Фердинанд Браун** (нем. *Karl Ferdinand Braun*; 1850—1918) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1909). Изобретатель кинескопа (катодно-лучевой трубки — Трубки Брауна).

³ **Готланд** — остров в Финском заливе, в 180 км к западу от Петербурга и в 40 км от финского города Котка.

⁴ **Котка** (фин. *Kotka*) — город на юге Финляндии, на берегу Финского залива.

1900 — радиостанции начинают использовать довольно активно в первую очередь для связи между морскими кораблями и берегом. Основными производителями радиостанций стали британская фирма «Marconi», французская «Ducretet», американская «De Forest», а также немецкие компании, которые в 1903 г. создали общую фирму для выпуска радиотехники «Telefunken».

1901 — 12 декабря Г. Маркони провел первый сеанс трансатлантической радиосвязи между Англией и Ньюфаундлендом на расстояние 3200 км.

1901 — Я. Ч. Бозе¹ продемонстрировал точечный кристаллический детектор электромагнитных волн. В том же году он запатентовал его в США.

1902 — О. Хевисайд², и А. Кеннелли³ независимо предсказали существование на высоте примерно 100 миль (185 км) слоя ионизированных газов (ионосферы), отражающего радиоволны. Этот слой позволил увеличить дальность распространения радиоволн на расстояния, превышающие прямую видимость.

1904 — Дж. Флеминг⁴ изобрел вакуумный диод (двухэлектродную лампу) и применил его в качестве детектора в радиотелеграфных приемниках.

1904 — К. Хюльсмайер в своей авторской заявке (патент № 165546 от 30 апреля 1904 г.) четко сформулировал идею обнаружения корабля по отраженным от него радиоволнам и привел также подробное описание устройства для ее реализации. В том же году, им был получен и второй патент (№ 169154) на усовершенствование этого устройства.

1905 — Г. Маркони берет патент на направленную передачу сигналов.

1906 — Ли де Форест создал трехэлектродную вакуумную лампу — триод (аудион Фореста), которую можно было использовать не только в качестве детектора, но и для усиления слабых электрических колебаний. 15 января 1907 г. он получил патент США на «Устройство для уси-

¹ **Ягадиш Чандра Бозе** (англ. *Sir Jagadish Chandra Bose*, 1858—1937) — профессор физики Президентского колледжа Калькутты, эрудит (физик, биолог, биофизик, археолог и др.), известен также как писатель-фантаст. Считается одним из пионеров радио.

² **Оливер Хевисайд** (англ. *Oliver Heaviside*; 1850—1925) — английский ученый-самоучка, инженер, математик и физик. Впервые применил комплексные числа для изучения электрических цепей, разработал операторный метод решения дифференциальных уравнений, переформулировал уравнения Максвелла в терминах трехмерных векторов. Его работы изменили облик математики и физики. Несмотря на это он большую часть жизни был не в ладах с научным обществом.

³ **Артур Эдвин Кеннелли** (англ. *Arthur Edwin Kennelly*, 1861—1939) — ирландско-американский инженер-электрик. Исследовал электрические свойства ионосферы, которые привели к появлению понятия слоя Кеннелли-Хевисайда.

⁴ **Джон Амброс Флеминг** (англ. *Sir John Ambrose Fleming*, 1849—1945) — английский ученый в области радиотехники и электротехники, член Лондонского королевского общества (1892). Предложил мнемоническое правило правой руки, используемое в математике и физике.

ления слабых электрических токов» («*Device for Amplifying Feeble Electric Currents*»).

1906 — Р. О. Фессенден и Ли де Форест впервые используют амплитудную модуляцию для передачи человеческой речи.

1906 — Г. Данвуди¹ запатентовал кристаллический детектор на основе карборунда (патент США № 837,616).

1906 — 24 декабря О. Р. Фессенден осуществил первую ширококонтинентальную передачу голоса и музыки.

1907 — Эдуард Белин² осуществил первую передачу фотоизображений между Парижем, Лионом и Бордо.

1907 — Б. Л. Рознит теоретически обосновал, а затем практически показал возможность получения изображения посредством электронно-лучевой трубки.

1909 — присуждение Г. Маркони и К. Ф. Брауну Нобелевской премии по физике «в знак признания их заслуг в развитии беспроволочной телеграфии».

1910 — концерт итальянского тенора Энрике Карузо транслировался по радио из нью-йоркского театра «Metropolitan Opera House». В то время только некоторые приемники имели возможность принимать голосовые передачи: на кораблях в Нью-Йоркской гавани, в некоторых крупных гостиницах на «Times Square» и в радиолaborатории Ли Фореста.

1911 — Н. Д. Папалекси³ заложил основы теории преобразовательных схем в электронике. Он сыграл значительную роль в разработке приемно-усилительных и генераторных ламп.

1911 — В. Кулидж⁴ предложил применять в ламповой промышленности вольфрамовую проволоку, покрытую окисью тория. Это существенно улучшило характеристики радиоламп.

1912 — В. П. Вологдин⁵ построил первый российский высокочастотный генератор мощностью 2 кВт с частотой 60 кГц со скоростью вращения 20000 об/мин.

1912 — Э. Армстронг, будучи еще студентом, предложил регенеративную схему с обратной связью. Это был высокочувствительный приемник и первый немеханический генератор непрерывных синусои-

¹ Генри Данвуди (англ. *Henry Harrison Chase Dunwoody*, 1842—1933) — генерал войск связи США.

² Эдуард Белин (швед. *Edouard Belin*, 1876—1963) — шведский фотограф и изобретатель. В 1907 г. изобрел фототелеграф.

³ Николай Дмитриевич Папалекси (1880—1947) — советский физик, академик АН СССР. Признанный основоположник советской радиоастрономии. Является автором научного открытия — «Явление радиоизлучения солнечной короны»

⁴ Бильман Давид Кулидж (англ. *William David Coolidge*, 1873—1975) — американский физик и инженер, сделавший важный вклад в развитие рентгеновской аппаратуры.

⁵ Вологдин Валентин Петрович (1881—1953) — советский ученый в области высокочастотной техники, член-корреспондент АН СССР. Один из основателей Нижегородской радиолaborатории.

дальних колебаний. Регенеративная схема Э. Армстронга была быстро принята промышленностью.

1913 — А. Мейсснер построил первый ламповый радиопередатчик.

В 1914—1916. — Н. Д. Папалекси руководит разработкой первых образцов отечественных радиоламп.

1914 — Дж Хаммонд¹ разработал систему дистанционного управления по радио.

1915 — Между Нью-Йорком и Сан-Франциско была установлена трансконтинентальная телефонная связь с применением регенеративных ретрансляторов. В том же году с их помощью был успешно осуществлен эксперимент по передаче сигналов из США во Францию.

1916 — И. Лэнгмюр изобрел ртутный высоковакуумный насос. С его помощью удалось создать низкое давление, необходимое для изготовления вакуумных электронных ламп, которые применяются в радиотехнике.

1916 — при активном участии М. А. Бонч-Бруевича² в России было налажено собственное производство электронных ламп.

1918 — Э. Армстронг изобрел супергетеродинный приемник. Низкое качество электронных ламп не позволяло воспользоваться всеми преимуществами супергетеродинного принципа приема.

1918 — создана Нижегородская радиолaborатория — первый российский научно-исследовательский центр в области радиотехники. Ведущими учеными и организаторами были М. А. Бонч-Бруевич, В. П. Вологдин, А. Ф. Шорин³.

1920 — впервые в мире в Нижегородской радиолaborатории были изготовлены лампы, предложенные М. А. Бонч-Бруевичем. Нигде в мире не было в то время ламп такой мощности; их конструкция явилась классическим прототипом для всего последующего развития техники генераторных ламп и до настоящего времени составляет основу этой техники.

1921 — создание в Москве Государственного экспериментального электротехнического института (в настоящее время — Всероссийский электротехнический институт «ВЭН»), в котором проводились исследования также в области радиотехники и электросвязи.

¹ Джон Хейс Хаммонд (англ. *John Hays Hammond, Jr.*, 1888—1965) — американский изобретатель, которого считают отцом радиоуправления. В общей сложности ему принадлежит более 400 изобретений (более 800 патентов) в основном в области радиоуправления.

² Михаил Александрович Бонч-Бруевич (1888—1940) — советский радиотехник, основатель отечественной радиоламповой промышленности. Член-корреспондент АН СССР (1931). Работал в области конструирования радиоламп, радиовещания и дальних связей на коротких волнах.

³ Александр Фёдорович Шорин (1890—1941) — советский изобретатель в области техники связи, звуковой кинематографии и телемеханики. Занимался радиотехникой, телеграфией и звукозаписью. Автор буквопечатающего телеграфного аппарата, системы фотографической звукозаписи для звукового кино и др.

1921 — А. Халл¹ опубликовал результаты исследования вакуумного диода, помещенного в магнитное поле. Он назвал это устройство магнетроном. Эти эксперименты сыграли важную роль в развитии радиолокации.

1922 — начало радиовещания в СССР, Великобритании, Франции.

1922 — установление двусторонней радиолучительской связи между Францией и Америкой.

1922 — О. В. Лосев² открыл свойство точечного полупроводникового диода генерировать колебания и создал детектор-усилитель, названный впоследствии кристадином. Изобретение стало основой современных полупроводниковых приборов.

1922 — А. Тейлор и Л. Янг сообщили об обнаружении интерференции сигнала радиостанции с сигналом, отраженным от движущегося корабля, и предложили использовать несколько разнесенных в пространстве приемников и передатчиков для локации препятствий («детектор препятствий»). Однако эта работа продолжения не имела.

1923 — М. А. Бонч-Бруевич довел мощность генераторных ламп с водяным охлаждением до 80 кВт. Отечественная наука и техника и по сей день не уступает первенства в мире по производству мощных ламп.

1924 — Х. Найквист формулирует теорему о скорости передачи дискретного сигнала по непрерывному каналу связи.

1924 — Э. Эпплтон³ провел на декаметровых волнах измерения высоты одного из слоев ионосферы, фиксируя отраженные радиосигналы.

1924 — постановление СНК СССР «О частных приемных радиостанциях», открывшее простор для радиолучительского движения, до этого развивавшегося стихийно.

1925 — Г. Брейт⁴ и М. Тув⁵ опубликовали результаты работ по определению высоты ионосферы измерением времени запаздывания импульс-

¹ Альберт Уоллес Халл (Albert Wallace Hull, 1880—1966) — американский физик-радиотехник, изобретатель, технолог. Разработал технологию надежных спаев металла и стекла, подготовил выпуск первых серийных тетродов. Он изобрел вакуумный грозозащитный разрядник, динактрон, магнетрон, тиратрон. Дав своим изобретениям греческие имена, он заложил традицию развития языка радиотехники.

² Олег Владимирович Лосев (1903—1942) — советский физик и изобретатель (15 авторских свидетельств). Автор первых научных трудов, описывающих процессы, происходящие в поверхностных слоях полупроводника.

³ Эдуард Виктор Эпплтон (англ. Sir Edward Victor Appleton; 1892—1965) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1947) «за исследования физики верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие так называемого слоя Эпплтона».

⁴ Грегори Брейт (англ. Gregory Breit, рус. Григорий Альфредович Брейт-Шнайдер, 1899—1981) — американский физик, член Национальной академии наук США (1939). Научные труды посвящены ядерной физике, квантовой механике, физике высоких энергий и вопросам теории ускорителей.

⁵ Мерли Энтони Тув (англ. Merle Anthony Tuve, 1901—1982) — американский геофизик, пионер практического использования импульсных генераторов электромагнитных полей, что открыло путь развития радиолокации, ускорителей частиц и ядерной энергетики.

ного сигнала, отраженного от слоя, относительно сигнала, пришедшего вдоль поверхности Земли;

1925 — Дж. Бэрду удалось впервые добиться передачи распознаваемых человеческих лиц. Несколько позже, им же была разработана и первая электромеханическая телевизионная система, способная передавать движущиеся изображения.

1925 — создание в СССР (из-за нехватки радиоприемников) трансляционных узлов, от которых широкоэмитательные программы передавались по проводам в квартиры слушателей.

1926 — Л. С. Термен¹ создает установку оптико-механического телевидения с проекцией изображения на экран площадью 1 кв. м и разрешением 64 строки.

1928 — первые опытные передачи цветного изображения с последовательной передачей цветов электромеханической системой телевидения (Дж. Бэрд).

1930 — в июне Л. Э. Хайленд², проводя эксперименты по определению направления с помощью декаметровых волн, обнаружил, что когда над передающей антенной пролетает самолет, радиосигнал заметно меняет свою интенсивность. В результате этих наблюдений он предложил использовать декаметровые волны для предупреждения о приближении вражеских самолетов.

1931 — в СССР начаты работы в области электронного телевидения.

1931 — 1 октября в СССР началось телевизионное вещание (30 строк, 1200 элементов, 12,5 кадров в секунду) через радиостанцию на длине волны 379 м и через опытный передатчик — 720 м.

1933 — В. А. Котельников, будучи аспирантом, первым сформулировал и доказал теорему, в которой речь идет о передаче непрерывного сигнала с помощью его отсчетов.

1933 — начала работу радиостанция имени Коминтерна мощностью 500 кВт, опередившая по мощности на 1—2 года американскую и европейскую радиопромышленность. Это замечательное сооружение было выполнено по системе высокочастотных блоков, предложенной А. Л. Минцем и под его руководством.

1933 — В. К. Зворыкин продемонстрировал в США иконоскоп — передающую электронную трубку.

1933 — создание электронной системы телевидения в СССР (П. В. Шмаков, П. В. Тимофеев и др.).

1933 — советский военный инженер М. М. Лобанов³ начинает работы по радиолокационному обнаружению самолетов.

¹ Лев Сергеевич Термен (1896—1993) — советский изобретатель, создатель оригинального музыкального инструмента — терменвокса (1920).

² Лоренс Э. Хайленд (англ. Lawrence A. «Pat» Hyland, 1897—1989) — американский инженер, один из тех, кто внес определяющий вклад в создание радиолокатора.

³ Михаил Михайлович Лобанов (1901—1984) — советский военный инженер, одна из ключевых фигур в становлении и развитии радиолокации в СССР.

1933 — разработаны первые советские радиолокационные станции непрерывного излучения (Б. К. Шембель¹).

1934 — 3 января проведены первые успешные испытания по обнаружению самолета. Эту дату следует считать началом отечественной радиолокации.

1934 — в СССР в конце года начались регулярные телевизионные передачи.

1935 — в СССР Ленинградский завод им. Козицкого выпустил первую партию телевизионных приемников марки «Б-2».

1935 — независимо друг от друга, работы по импульсной радиолокации проводят: П. К. Ощепков в СССР, а также Р. Ватсон-Уатт в Великобритании и Альберт Тайлор, Лео Янг, В. Блэр² в США.

1935 — Э. Армстронг предлагает частотную модуляцию.

1935 — радиолокация получила первое коммерческое применение: во Франции фирма «*Societe Francaise Radioelectrique*» установила на лайнере «Нормандия» так называемый детектор препятствий.

1936 — в порту Гавра для обнаружения судов, входящих в гавань и покидающих ее, был установлен так называемый радиопрожектор.

1937 — в ЛЭФИ под руководством Ю. Б. Кобзарева³ был разработан импульсный метод радиолокации.

1938 — появилась первая серийная РЛС (РУС-1). Эти РЛС были применены во время финской военной кампании 1939–1940 годов.

1938 — начало вещания Московским телевизионным центром.

1938 — организация радиотехнического факультета МЭИ.

1939 — И. С. Брук на одном из заседаний Президиума АН СССР делает доклад о механическом интеграторе, позволяющем решать дифференциальные уравнения до шестого порядка.

1939 — в Москве введен в эксплуатацию трансляционный узел кабельного телевидения.

1940 — Дж. Рендолл⁴ и Г. Бут⁵ успешно получили устойчивую генерацию в многорезонаторном магнетроне и добились увеличения мощности на два порядка. Это достижение привело к стремительному развитию радиолокации.

¹ Борис Константинович Шембель (1900—1987) — советский ученый-радиотехник, Соавтор более 30 изобретений. С 1930 г. широко известна так называемая «схема Шембеля» — двухконтурный электронный генератор.

² Уильям Ричардс Блэр (англ. *William Richards Blair*, 1874—1962) — американский ученый, офицер армии США, которого часто называют «Отцом армейского радара».

³ Юрий Борисович Кобзарев (1905—1992) — советский ученый в области радиотехники и радиофизики, один из основоположников радиолокации в СССР. Академик АН СССР (1970). С 1943 по 1955 г. руководил кафедрой радиотехнических приборов РТФ МЭИ.

⁴ Джон Рендолл (англ. *Sir John Turton Randall*, 1905—1984) — британский физик и биолог, создатель не только магнетрона, но и СВЧ печи, известен также работами по расшифровке молекулы ДНК. За эти работы ему была присуждена Нобелевская премия по медицине (1962).

⁵ Генри Бут (англ. *Henry Albert Howard (Harry) Boot*, 1917—1983), — британский физик, известен работами по созданию мощных СВЧ генераторов. С 1943 г. работает в атомной физике, участвует в создании циклотрона — ускорителя частиц.

1940 — под руководством Н. Д. Девяткова¹ создан отражательный клистрон.

1940 — начато серийное производство первой импульсной радиолокационной станции дальнего обнаружения самолетов РУС-2 («Редут»).

1941 — организация в СССР первой вычислительной лаборатории, прообраза будущих вычислительных центров.

1942 — под Куйбышевым (ныне Самара) по проекту А. Л. Минца строится сверхмощная (1,2 МВт) радиовещательная станция.

1943 — 4 июля вышло Постановление Государственного Комитета Обороны об учреждении при нем Совета по радиолокации. Практическое руководство деятельностью Совета осуществлял А. И. Берг².

В 1944 — советские специалисты разработали проект телевизионного стандарта с разложением изображения на 625 строк. Это на 100 строк больше самого высокого в те годы американского стандарта.

1945 — в СССР декретом И. В. Сталина установлен ежегодный праздник «День радио» (7 мая) с формулировкой «За выдающуюся роль радио в победе в Великой Отечественной войне», учреждены Золотая медаль им. А. С. Попова и значок «Почетный радист».

1946 — в США закончены работы по созданию первой большой универсальной ЭВМ.

1947 — В. А. Котельников впервые сформулировал задачу оптимального статистического синтеза приемных устройств и проанализировал с новых позиций различные системы связи, установив потенциальные ограничения на возможные виды кодирования и модуляции.

1947 — Н. И. Кабанов³ открыл явления дальнего рассеянного отражения от Земли дециметровых волн с их возвратом после отражения от ионосферы к источнику излучения.

1948 — первые публикации результатов работ К. Шеннона, которые легли в основу современной теории информации.

1948 — С. А. Лебедев независимо от Дж. Неймана обосновал принципы построения ЭВМ с хранимой в памяти программой.

1948 — регистрация первого в СССР свидетельства об изобретении цифровой ЭВМ (И. С. Брук, Б. И. Рамеев.).

¹ Николай Дмитриевич Девятков (1907—2001) — советский и российский ученый, и организатор науки в области электроники. Академик РАН (1968). Основные труды в области разработки газоразрядных и сверхвысокочастотных приборов. Автор более 250 научных трудов и изобретений.

² Аксель Иванович Берг — одним из крупнейших ученых-радиоспециалистов. Один из первых создал инженерные методы расчета основных радиотехнических систем. Инициатор создания конструкторского бюро кибернетики на кафедре автоматики МЭИ.

³ Николай Иванович Кабанов (1912—1984) — доктор технических наук, профессор НЭТИ (НГТУ). «Эффект Кабанова» явился основой разработки радиолокационных станций раннего и дальнего обнаружения запусков баллистических ракет и ракет-носителей космических аппаратов.

1948 — Дж Бардин, У. Браттайн, У. Шокли создали первый полупроводниковый транзистор.

1948 — начало в СССР телевизионного вещания в стандарте 625 строк 25 кадров в секунду. Эти параметры впоследствии были приняты большинством стран с частотой электрической сети 50 Гц, и стали основой хорошо известных систем PAL и SECAM.

1949 — выпуск в СССР массового телевизора КВН-49 (производство продолжалось до 1960 г.).

1950 — первый пробный пуск в СССР макета малой электронной счетной машины МЭСМ (С. А. Лебедев).

1951 — Дж Мочли и Дж. Эккерт закончили работы по созданию первого коммерчески доступного компьютера.

1951 — запуск в регулярную эксплуатацию первой в СССР и континентальной Европе ЭВМ (С. А. Лебедев).

1952 — завершение отладки и запуск в эксплуатацию первой в Российской Федерации ЭВМ М-1 (И. С. Брук, Н. Я. Матюхин¹).

1952 — разработка первого внестудийного суперортикона. История создания суперортиконов неразрывно связана с именем Г. В. Брауде², который изобрел в 1938 г. главный узел этого прибора — двустороннюю полупроводниковую мишень.

1953 — создание под руководством С. А. Лебедева самых высокопроизводительных в Европе электронных вычислительных машин серии БЭСМ.

1953 — декабрь первые опыты по цветному телевизионному вещанию с применением системы NTSC (*National Television Standards Committee*).

1954 — Н. Г. Басов и А. М. Прохоров создали первый квантовый генератор на молекулах аммиака.

1954 — начался серийный промышленный выпуск аппаратуры для контроля траектории полета ракет и радиотелеметрической системы «Трал». По существу это была первая в мире космическая радиотелеметрическая система. Она была создана в ОКБ МЭИ под руководством академика А. Ф. Богомолова.

1956 — С. А. Лебедев выдвинул идею многопроцессорной ЭВМ.

1957 — в СССР введена в строй радиоаппаратура службы единого времени для синхронизации измерительных и управляющих средств, использовавшихся при запуске первого спутника Земли (точность синхронизации шкал времени 3—5 мс).

¹ Николай Яковлевич Матюхин (1927—1984) — выдающийся ученый в области вычислительной техники и конструктор специализированных ЭВМ для систем противовоздушной обороны. Член-корреспондент АН СССР (1979). С отличием окончил в 1950 г. РТФ МЭИ

² Брауде Гирш Вульфович (1906,—1992) — специалист в обл. телевизионной техники. Занимался системами опознавания самолетов Предложил метод определения оптимальных параметров телесистемы («метод Брауде»), В 1946—1958 гг. работал на РТФ МЭИ.

1957 — коллектив, руководимый М. А. Карцевым¹, начал разработку электронной управляющей машины М-4. Эта работа была начата по заданию Радиотехнического института АН СССР (дир. акад. А. Л. Минц). Испытания на действующем макете технического комплекса РЛС были проведены в 1962 году.

1957 — 4 октября в 19:28 по Гринвичу с космодрома Байконур осуществлен пуск ракеты, которая вывела на околоземную орбиту первый ИСЗ. Этот запуск был бы не возможен без достижений радиоэлектроники.

1958 — 12 сентября Дж. Килби² представил первый рабочий образец интегральной схемы (микросхемы).

1958 — в СССР под руководством В. М. Глушкова начата разработка первых машин для инженерных расчетов «Проминь» и «МИР» — предвестников будущих персональных ЭВМ.

1959 — в октябре советские ученые и инженеры впервые в мире осуществили съемку и передачу на Землю изображения обратной стороны Луны.

1959 — Л. Эсаки³ создал туннельный диод.

1959 — в СССР под руководством С. А. Лебедева созданы опытные образцы ЭВМ М-40, М-50 для систем ПРО.

1959 — в США получены первые эхо-сигналы от солнечной короны.

1959 — в СССР была введена в эксплуатацию первая ламповая специализированная стационарная ЭВМ «СПЕКТР-4» предназначенная для наведения истребителей-перехватчиков.

1959 — Н. Г. Басов выдвинул идею применения полупроводников в квантовых генераторах оптического диапазона и развил методы создания различных типов полупроводниковых лазеров.

1960 — Т. Майман⁴ создал первый импульсный лазер на рубине с рабочей длиной волны 0,6943 мкм.

1960—1965 — были сооружены разработанные в ОКБ МЭИ антенны с диаметром зеркала 32 метра, а затем с диаметром 64 м. для обеспечения связи с межпланетными исследовательскими аппаратами.

¹ Михаил Александрович Карцев (1923—1983) — одним из самых ярких разработчиков вычислительных машин, комплексов и систем. Окончил РТФ МЭИ.

² Джек Сент-Клэр Килби (англ. Jack St. Clair Kilby, 1923—2005) — американский ученый, лауреат Нобелевской премии по физике за создание интегральной схемы (2000). Изобретатель карманного калькулятора.

³ Лео Эсаки (яп. 江崎玲於奈, 1925) — японский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за экспериментальные открытия туннельных явлений в полупроводниках и сверхпроводниках (1973). Известен также как изобретатель диода Эсаки (туннельного диода), использующего эффект туннелирования электрона через потенциальный барьер.

⁴ Теодор Майман (англ. Theodore Harold Maiman, 1927—2007) — американский физик, победивший в соревновании по созданию лазера. Был членом Национальной академии наук и Национальной академии инженерных наук США, включен в Национальный зал славы изобретателей.

1961 — А Джаван¹ и В. Беннетт² демонстрируют первый лазер непрерывного излучения на смеси гелия и неона.

1961 — получены эхо-сигналы от Венеры (Великобритания, СССР и США).

1961 — разработка В. М. Глушковым теории цифровых автоматов.

1961 — создание Н. Я. Матюхиным первой в СССР (и, возможно, единственной в мире) ЭВМ «Тетива» с использованием только прямых кодов операндов. Более 30 лет (бессменно) комплекс работал в системах ПВО страны.

1961—1963 — В СССР радиолокацию Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера выполнил коллектив ученых во главе с В. А. Котельниковым.

1962 — осуществлена двухсторонняя радиосвязь между космическими кораблями «Восток-3» и «Восток-4» и телевизионный репортаж из космоса, транслировавшийся по вещательному стандарту непосредственно в телевизионную сеть СССР и «Интервидения».

1962 — Р. Холл³ впервые получил генерацию когерентного света на $p-n$ -переходе.

1962 — разработка в СССР систем подвижных радиотелефонных станций «Алтай».

1963 — 26 июля в США выведен на орбиту экспериментальный спутник связи «Syncom-2». На спутнике проводились исследования по использованию космических технологий в целях связи. Первый спутник, запущенный на геостационарную орбиту.

1964 — 22 августа в СССР выведен на орбиту экспериментальный спутник связи типа «Молния-1».

1965 — 6 апреля в США выведен на орбиту спутник связи будущей системы «Intelsat» Обеспечивал 240 телефонных каналов или один двухсторонний телевизионный канал между США и Европой. Через спутник была осуществлена первая прямая телевизионная трансляция из Европы в США (репортаж с состязаний по легкой атлетике между СССР и США).

1965 — 23 апреля в СССР выведен на орбиту спутник связи «Молния-1-01». Дальнейшее развитие космической программы привело к созданию системы национальной сети телевизионного вещания и связи «Орбита».

¹ Али Джаван (англ. *Ali Javan*, род. 1926) — американский физик, член Национальной Академии Наук США (1974). Признанное светило в области лазеров и квантовой электроники, автор многочисленных исследований в области лазерной теле- и радиосвязи.

² Вильям Ралф Беннетт (англ. *William Ralph Bennett Jr.*, 1930—2008) — американский физик. Проводил исследования по физике газовых лазеров и атомной физике.

³ Роберт Холл (англ. *Robert N. Hall*, род. 1919) — американский физик и инженер. Усовершенствовал магнетрон, внес заметный вклад в разработку силовых выпрямителей переменного тока.

1966 — на Землю переданы телевизионные изображения панорамы лунной поверхности с борта межпланетного космического аппарата «Луна-9», совершившего мягкую посадку на Луну.

1966 — завершается разработка проекта большой ЭВМ «Украина», предвосхитившего многие идеи американских больших ЭВМ 70-х гг. XX века.

1966 — создание в СССР впервые в мире системы черно-белого стереотелевидения для сближения и стыковки космических кораблей.

1966 — создается Институт проблем передачи информации АН СССР. С 1966 по 1989 его директором был В. И. Сифоров¹.

1967 — начало в СССР и Франции регулярных цветных телевизионных передач по системе SECAM.

1967 — 5 ноября в СССР была принята в эксплуатацию первая очередь строительства Останкинской телебашни. Началась трансляция четырех телевизионных и трех радиовещательных программ.

1967 — осуществлена разработка и поставка аппаратуры бортового синхронизирующего устройства с соответствующей контрольно-измерительной и управляющей аппаратурой для космических метеорологических спутников Земли серии «Метеор».

1969 — 20 июля советскими учеными и инженерами осуществлена первая телевизионная передача с поверхности Луны.

1969 — введена в эксплуатацию Европейская цепь импульсно-фазовой радионавигационной системы длинноволнового диапазона «ЧАЙКА», предназначенная для определения координат самолетов и кораблей с погрешностью 50—100 м (аналог американской системы «ЛОРАН-С»).

1970 — осуществлено дистанционное телевизионное управление с Земли самоходным аппаратом «Луноход-1», доставленным на Луну космическим аппаратом «Луна-17».

1970 — впервые в мире М. Л. Карцевым предложена и реализована концепция полностью параллельной вычислительной системы с распараллеливанием на всех четырех уровнях: программ, команд, данных и слов.

1970 — Ж. И. Алферов² впервые получил генерацию света на p — n -переходе при комнатной температуре.

1971 — небольшой американской компанией «Intel» создан первый микроконтроллер серии 4004 для применения в карманных калькуляторах. Чип стоил \$200 и содержал 2250 элементов.

¹ Владимир Иванович Сифоров (1904—1993) — советский ученый в области радиотехники и электроники, крупнейший специалист в области радиоприемной техники, вещания и теории связи, член-корреспондент АН СССР (1953). С 1957 по 1987 гг. был заведующим кафедрой Радиоприемных устройств МЭИ.

² Жорес Иванович Алфёров (белор. *Жарэс Іванавіч Алфёраў*, род. 1930) — советский и российский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (2000). Вице-президент РАН с 1991 года.

1971 — в ноябре создана международная организация космической связи «Интерспутник» («*Intersputnik*»). По данным 2000 г. членами организации являются 24 страны и свыше 100 государственных и частных компаний. Использовала российский космический сегмент, состоящий из спутников типа «Горизонт», «Экспресс» и «Галс».

1971 — американская компания «*Bell Laboratories*» представила в Федеральную Комиссию Связи (FCC) описание архитектуры системы радиотелефонной связи, получившей название «сотовая» (*cellular*).

1973 — начало выпуска высокопроизводительной ЭВМ с многоформатной векторной RISC-архитектурой (англ. *restricted (reduced) instruction set computer* — компьютер с сокращенным набором команд) для систем предупреждения о ракетном нападении и общего наблюдения за космическим пространством (М. А. Карцев).

1973 — 12 сентября создан международный консорциум спутниковой связи «INTELSAT». На начало 2000 г. консорциум объединял 143 страны. «INTELSAT» — система спутниковой связи, основу космического сегмента которой составляют геостационарные спутники последних четырех поколений. Пропускная способность одного спутника составляет 12—35 тыс. телефонных каналов. Через 19 спутников (начало 2001 г.) системы передается примерно 2/3 международного трафика: телефония — 42 %, Интернет — 14 %, ведомственные сети связи — 25 %, вещание — 19 %. Услугами «INTELSAT» пользуются более чем в 200 странах.

1974 — В. М. Глушковым предложены принципы построения рекурсивной (не неймановской) ЭВМ.

1974 — практическая реализация в СССР первой в мире ЭВМ векторной структуры (М. Л. Карцев).

1975 — в декабре американская компания «*MITS*» (*Micro Instrumentation Telemetry Systems*) представлен первый персональный компьютер «*MITS Altai-8800*». Цена компьютера составляла \$375

1977 — в Чикаго началась эксплуатация первой коммерческой системы волоконно-оптической связи. Практическое использование ВОЛС было начато в Великобритании 1973 г.

1977 — создание первого многопроцессорного вычислительного комплекса «Эльбрус-1» на микросхемах средней интеграции со средствами аппаратной поддержки, развитой структуризации программ и данных.

1977 — в СССР построен крупнейший радиотелескоп РАТАН-600 с кольцевым антенным рефлектором диаметром 600 м.

1978 — запущены первые спутники навигационной системы GPS. Первые 10 спутников составляли так называемый «Блок I». 24 спутника следующей версии системы (Блок II) были запущены в период с 1989 года по 1994 год.

1979 — на Всемирной конференции в Женеве принят регламент радиосвязи, охватывающий распределение частотного спектра от 3 кГц до 3 ТГц.

1979 — создана международная организация подвижной спутниковой связи «Inmarsat» (*International Maritime Satellite Organization*). В 1999 г. в состав организации входило 79 государств.

1979 — в декабре в Токио начала работу первая сотовая сеть связи из 88 базовых станций. Через 5 лет сеть была расширена до масштабов всей страны.

1980 — создание первой в СССР пейджинговой сети (в период летних Олимпийских игр в Москве).

1981 — компания «IBM» анонсировала первый персональный компьютер с процессором Intel-8088 и операционной системой MS DOS.

1981 — ввод в эксплуатацию сетей на первом гражданском стандарте сотовой связи NMT-450 в Швеции, Норвегии и Финляндии.

1983 — межпланетные космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» начали радиолокационную съемку поверхности Венеры и передачу информации на Землю. Руководитель работ В. А. Котельников.

1983 — начало выпуска в Загорске (ныне — Сергиев Посад) многопроцессорной векторной ЭВМ М-13. Руководитель разработки М. А. Карцев.

1983 — компания «Texas Instruments» (США) представила однокристалльный цифровой процессор сигналов (DSP — *Digital signal processor*) производительностью более 5 млн. операций в секунду. Современные процессоры DSP выполняют более 35 млн. операций в секунду.

1988 — компанией «Bell Labs» (США) введен в эксплуатацию трансатлантический волоконно-оптический кабель, связавший Северную Америку с Европой. Кабель длиной около 5000 км мог пропускать одновременно до 40000 телефонных звонков.

1990 — ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) опубликовал спецификацию первой фазы стандарта GSM.

1991 — в Москве компанией «Московская сотовая связь» открыта первая сеть сотовой телефонной связи стандарта NMT-450.

1992 — в штате Огайо состоялись первые испытания системы цифрового радиовещания «USA Digital Radio».

1993 — завершено создание космической группировки навигационной системы ГЛОНАСС. Гарантированная точность определения координат до 50 м в стандартном режиме и не хуже 1 м в дифференциальном.

1993 — в России начался выпуск персональных компьютеров.

1994 — ЭВМ «Эльбрус-3» (быстродействие в два раза выше, чем у CRAY-YMP) была изготовлена, но в серию, к сожалению, запущена не была.

1994 — запуском последнего 24-го спутника, завершилось формирование системы спутниковой навигации GPS.

1995 — Ж. И. Алферов впервые демонстрирует инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре. В 2000 г. за это открытие он был удостоен Нобелевской премии.

1996 — завершено изготовление опытного образца ЭВМ «Эльбрус-90 Микро». В производство, к сожалению, передан не был.

1997 — в октябре компании «Nortel» и «Norweb Communications» объявили о создании новой технологии, которая позволяет передавать данные по линиям электропередачи со скоростью до 1 Мб в секунду. Через два месяца в Манчестере была проведена первая публичная демонстрация технологии.

1999 — по данным Ассоциации производителей полупроводников (SIA), мировые продажи полупроводников в ноябре 1999 г. достигли значения 14.2 млрд. долларов, вследствие постоянно растущего спроса со стороны производителей ПК и мобильных средств связи.

2000 — в феврале состоялся 11-суточный полет космического корабля «Шаттл». На корабле был установлен радиолокационный комплекс SIR-C/X—SAR, созданный совместными усилиями космических агентств США, Италии и Германии. Один из наиболее совершенных комплексов в мире был способен вести съемку с максимальным разрешением 5—10 м. Система из двух разнесенных на 60 м антенн позволила впервые в мировой практике осуществить съемку 80 % поверхности суши для разработки цифрового рельефа местности с дискретностью 30×30 м и точностью определения высоты 16 м.

2000 — по данным корпорации «Strategis Group» первое место в мире по числу мобильных телефонов на душу населения занимает Финляндия. Далее следуют: Норвегия, Швеция, Гонконг, Исландия, Израиль, Южная Корея, Дания, Австрия и Италия. Япония в этом списке занимает 15 место, а США — лишь 24

2001 — на конец октября сети стандарта GSM развернуты в 171 стране, а общее число абонентов перевалило за 600 млн. Стандарт является доминирующим в мире. В России GSM-сети работают в 65 регионах. По официальным данным на начало октября, число абонентов данного стандарта в России превысило 5 млн.

2003 — во всем мире в диапазоне коротких волн уже действует около 30 передатчиков цифрового радиовещания.

2004 — группой ученых России и Великобритании разработана новая углеродная наноструктура — графен, двумерный материал (одноатомной толщины). С практической точки зрения графен крайне привлекателен для приборов СВЧ и КВЧ электроники.

2005 — американские физики из университета Иллинойса Милтон Фенг (англ. *Milton Feng*) и Валид Хейфз (англ. *Walid Hafez*) создали самый быстрый в мире биполярный транзистор, способный работать на частоте 0,6 ТГц (длина волны 0,5 мм). Размеры нового транзистора сопоставимы с размерами элементов, применяемых в современных микросхемах. Для создания базы, эмиттера и коллектора авторы проекта использовали смесь двух различных полупроводников — фосфида индия и арсенида галлия-индия.

2005 — исследователи из Калифорнийского университета в Беркли создали первый в мире «наножидкостный транзистор» — устройство,

управляющее с помощью электрического напряжения перемещением ионов через каналы субмикронного диаметра, заполненные водой. В перспективе группа наножидкостных транзисторов может образовывать целые вычислительные устройства, сходные с нынешними кремниевыми процессорами, что в сочетании с легким управлением ионами сулит новые возможности для биологических исследований и медицины.

2005 — английские исследователи предложили для создания компьютеров нового поколения использовать нанопроволоку. Принцип работы логических элементов таких компьютеров основан на подвижности магнитных доменных стенок в магнито-мягких материалах.

2006 — 27 января компания «Western Union» объявила о прекращении оказания услуг по передаче текстовых сообщений. Длившаяся 145 лет эра телеграфной связи завершилась. Первое текстовое сообщение было передано 24 мая 1844 г. С. Морзе.

2006 — 1 февраля конгресс США принял постановление, по которому американские телевизионные каналы обязаны прекратить вещание в аналоговом режиме к 2009 г. и перейти на цифровой формат. Этим постановлением в США фактически положен конец аналоговому телевещанию.

2007 — исследовательской группе из Делавэрского университета (США) удалось передать спин-электронный ток на марафонскую по меркам микроэлектроники дистанцию в 350 мкм сквозь беспримесную кремниевую подложку. Эта пионерская работа обозначила путь к разработке более дешевых, более быстрых и экономичных устройств обработки и хранения информации.

2008 — американские физики создали осциллограф, способный визуализировать во времени световые колебания длительностью более 100 пикосекунд с разрешением в 0,22 пс. Это устройство может найти применение в телекоммуникационных технологиях для получения «изображений» сигналов, а также поможет изучать быстропротекающие физические процессы.

2009 — Институт общей физики РАН обнародовал результаты создания нелинейных оптических элементов на основе углеродных нанотрубок для волоконно-оптических линий связей.

2010 — А. К. Гейм¹ и К. С. Новосёлов² были удостоены Нобелевской премии по физике за получение и исследование свойств графена.

¹ **Андрей Константинович Гейм** (нидерл. *Andre Geim*; род. 1958) — советский, нидерландский и британский физик, член Лондонского королевского общества (2007). 31 декабря 2011 г. указом королевы Елизаветы II за заслуги перед наукой ему присвоено звание рыцаря-бакалавра с официальным правом прибавлять к своему имени титул «сэр».

² **Константин Сергеевич Новосёлов** (род. 1974) — российский и британский физик, член Лондонского королевского общества (2011). 31 декабря 2011 г. указом королевы Елизаветы II за заслуги перед наукой ему присвоено звание рыцаря-бакалавра. По состоянию на октябрь 2015 г. имеет более 92000 цитирований своих работ. Индекс Хирша — 80. Входит в лидеры рейтинга влиятельнейших ученых 2014 г. по версии *Thomson Reuters*.

Потенциально графен способен заменить кремний как основу твердотельной электроники и привести к повышению быстродействия электронных устройств на порядок.

2010 — американским ученым удалось синтезировать живую клетку. Исследователи «построили» генетическую программу бактерии и ввели ее в клетку, исполнившую роль матки. Специалисты надеются, что со временем они смогут создавать бактериальные клетки, которые будут вырабатывать медикаменты и топливо и даже, возможно, абсорбировать парниковые газы.

2012 — в США разработан способ производства растворимой электроники — устройств, которые через некоторое время после имплантации самостоятельно распадаются и выводятся из организма. Это открывает пути создания новых технологий в биологии и медицине.

2013 — достоверно установлено, что космический аппарат «Вояджер-1» (англ. «Voyager-1») стал первым объектом, созданным человеком, достигшим межзвездного пространства. Аппарат был запущен в 1977 году. Сигнал доходит до зонда за 18 ч. 36 мин. В тяжелейших условиях космоса высокочувствительное радиоэлектронное оборудование исправно работает уже почти 40 лет!

2014 — высадка спускаемого аппарата «*Philae*» на поверхность кометы Чурюмова-Герасименко¹. Благодаря успехам радиоэлектроники удалось, управляя зондом с Земли через аппарат «*Rosetta*», провести все запланированные замеры.

2015 — ученые из Швеции произвели из полимеров первый в мире искусственный нейрон, который способен полностью имитировать функции мозговой клетки человека и, в частности, трансформировать химические сигналы в электрические импульсы для последующей их передачи другим типам клеток.

2016 — в феврале физики МГУ, которые входят в международный проект, сообщили об обнаружении гравитационных волн — возмущений пространства-времени, предсказанных создателем общей теории относительности А. Эйнштейном.

2016 — Российский разработчик микропроцессоров «Байкал Электронике» представит восьми ядерный микрочип «Baikal-M» с 28-нм техпроцессом, 64-битной архитектурой и ядром ARM (англ. *Advanced RISC Machine* — усовершенствованная RISC-машина), который будет использоваться в настольных компьютерах и встраиваемых системах.

2016 — новые органические полупроводниковые кристаллы с рекордно высокой светоизлучательной способностью вырастили на физическом факультете МГУ с использованием уникального метода синтеза. Их можно использовать для создания гибкой и прозрачной электроники.

¹ Была открыта 23.10 1969 советским астрономом К. И. Чурюмовым в Киеве на фотопластинках другой кометы, снятых С. И. Герасименко в сентябре в Алма-атинской обсерватории.

Диапазоны электромагнитных волн

Таблица П.1

Длины волн	Название диапазона	Полоса частот	Название полосы	Применение
100—10 Мм	Декаметровые	3—30 Гц	Крайне низкие (КНЧ; ELF)	Подземная и подводная связь, навигация, ультразвуковая техника
10—1 Мм	Метровые	30—300 Гц	Сверхнизкие (СНЧ; SLF)	
1000—100 км	Гектокилометровые	0,3—3 кГц	Инфранизкие (ИНЧ; ULF)	
100—10 км	Мириаметровые	3—30 кГц	Очень низкие (ОНЧ; VLF)	
10—1 км	Длинные волны, километровые	30—300 кГц	Низкие (НЧ; LF)	Радиовещание, радиосвязь, телеграфия, навигация
1000—100 м	Средние волны, гектометровые	300—3000 кГц	Средние (СЧ; MF)	
100—10 м	Короткие волны, декаметровые	3—30 МГц	Высокие (ВЧ; HF)	Радиовещание, радиосвязь
10—1 м	Ультракороткие волны, метровые	30—300 МГц	Очень высокие (ОВЧ; VHF)	Радиовещание, радиосвязь, телевидение, радиолокация, навигация
10—1 дм	Дециметровые	300—3000 МГц	Ультравысокие (УВЧ; UHF)	Мобильная радиосвязь, телевидение, радиолокация.
10—1 см	Сантиметровые	3—30 ГГц	Сверхвысокие (СВЧ; SHF)	Радиолокация, спутниковое телевидение, навигация
10—1 мм	Миллиметровые	30—300 ГГц	Крайне высокие (КВЧ; EHF)	Радиолокация, радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь, метеорологические радиолокаторы

Длины волн	Название диапазона	Полоса частот	Название полосы	Применение
1—0,1 мм	Децимиметровые	300—3000 ГГц	Гипервысокие частоты	Научные исследования. Радиолокация сверхвысокого разрешения, радиооптика
100—0,75 мкм	Инфракрасные	3—400 ТГц	Инфракрасные	Квантовая электроника, пассивная и активная когерентная оптика
0,7—0,4 мкм	Видимые	400—750 ТГц	Видимые	
0,4—0,01 мкм	Ультрафиолетовые	750 — $3 \cdot 10^4$ ТГц	Ультрафиолетовые	
10— 510^{-3} нм	Жесткие лучи:		Пока не стандартизовано	Квантовая электроника, научные исследования
	Рентгеновские	30—60 ПГц		
менее 510^{-3} нм	Гамма	> 60 ПГц		

Диапазоны частот для радиовещания, принятые в России

Таблица П.2

Общее название	Диапазон частот, МГц	Обозначение		Модуляция
		рус.	англ.	
Длинные волны	0,148—9,408	ДВ	LW	AM, DRM
Средние волны	0,535—0,1605 или 0,522—1,720	СВ	MW	AM, DRM
Короткие волны	2,5—3,3	КВ тропический (120—90 м)	SW (120—90 m)	AM, DRM
	3,95—4,85	КВ-1 (75 м)	SW (75 m)	AM, DRM
	4,85—5,90	КВ-2 (60 м)	SW (60 m)	AM, DRM
	5,95—6,20	КВ-3 (49 м)	SW (49 m)	AM, DRM
	7,10—7,30	КВ-4 (41 м)	SW (41 m)	AM, DRM
	9,50—9,90	КВ-5 (31 м)	SW (31 m)	AM, DRM
	11,65—12,05	КВ-6 (25 м)	SW (25 m)	AM, DRM
	13,60—13,80	КВ-7 (22 м)	SW (22 m)	AM, DRM
	15,10—15,60	КВ-8 (19 м)	SW (19 m)	AM, DRM
	17,55—17,90	КВ-9 (16 м)	SW (16 m)	AM, DRM
	21,45—21,85	КВ-10 (13 м)	SW (13 m)	AM, DRM
	25,6—26,10	КВ-11 (11 м)	SW (11 m)	AM, DRM
Ультра-короткие волны	65,9—74	УКВ, УКВ-1	OIRT	ЧМ (девиация 50 кГц)
	76—90	УКВ-2	FM, VHF	ЧМ (девиация 75 кГц)
	87,5—108	УКВ-3	FM, VHF	ЧМ (девиация 75 кГц)

Латинский и греческий алфавиты

Таблица П.3

Латинский алфавит			
A, a	а	N, n	эн
B, b	бэ	O, o	о
C, c	це	P, p	пэ
D, d	дэ	Q, q	ку
E, e	е, э	R, r	эр
F, f	эф	S, s	эс
G, g	гэ, же	T, t	тэ
H, h	ха, аш	U, u	у
I, i	и	V, v	вэ
J, j	йот, жи	W, w	дубль-вэ
K, k	ка	X, x	икс
L, l	эль	Y, y	игрек, ипсилон
M, m	эм	Z, z	зет, зета

Таблица П.4

Греческий алфавит			
A, α	alpha, альфа	N, ν	ну, ню
B, β	beta, бета	Ξ, ξ	хи, кси
Γ, γ	gamma, гамма	Ο, ο	omicron, омикрон
Δ, δ	delta, дельта	Π, π	pi, пи
Ε, ε	epsilon, ипсилон	Ρ, ρ	rho, ро
Z, ζ	zeta, зета	Σ, σ	sigma, сигма
Η, η	eta, эта	Τ, τ	tau, тау
Θ, θ	theta, тета	, υ	upsilon, ипсилон
I, ι	iota, йота	Φ, φ	phi, фи
Κ, κ	kappa, каппа	Χ, χ	chi, хи
Λ, λ	lambda, ламбада	Ψ, ψ	psi, пси
μ, μ	mu, мю	Ω, ω	Omega, омега

Десятичные приставки

Таблица П.5

Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	Множитель
Увеличивающие			
дека	да	da	10^1
гекто	г	h	10^2
кило	к	k	10^3
мега	М	M	10^6
гига	Г	G	10^9
тера	Т	T	10^{12}
пета	П	P	10^{15}
экса	Э	E	10^{18}
Уменьшающие			
деци	д	d	10^{-1}
санتي	с	c	10^{-2}
милли	м	m	10^{-3}
микро	мк	μ	10^{-6}
нано	н	n	10^{-9}
пикто	п	p	10^{-12}
фемто	ф	f	10^{-15}
атто	а	a	10^{-18}

Фундаментальные константы

Таблица П.6

Наименование	Обозначение, формула	Численное значение*	Размерность
Скорость света	c	$2,9979 \cdot 10^8$	м/с
Заряд электрона	e	$1,6022 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	кг
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,6606 \cdot 10^{-27}$	кг
Масса покоя протона	M_p	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	кг

Наименование	Обозначение, формула	Численное значение*	Размерность
Масса покоя нейтрона	M_n	$1,6750 \cdot 10^{-27}$	кг
Постоянная Планка	h	$6,6262 \cdot 10^{-34}$	Дж · с
	$\hbar = h/2\pi$	$1,0546 \cdot 10^{-34}$	
Боровский радиус	$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{e^2m_e}$	$5,2918 \cdot 10^{-11}$	м
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$9,2741 \cdot 10^{-4}$	Дж/Тл
Ядерный магнетон	$\mu_n = \frac{e\hbar}{2M_p}$	$5,0508 \cdot 10^{-27}$	Дж/Тл
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	$1,7588 \cdot 10^{11}$	Кл/кг
Постоянная Больцмана	k_B	$1,3807 \cdot 10^{-23}$	Дж/К

* Приведены численные значения, округленные до четвертого знака после запятой.

Приложение 7

Соотношения между значениями физических величин

Таблица П.7

Наименование величины	Системы единиц			
	МКСА (СИ)	СГСЭ	СГСМ	СГС
Основные единицы				
Длина	1 м	10^2 см	10^2 см	10^2 см
Масса	1 кг	10^3 гр	10^3 гр	10^3 гр
Время	1 с	1 с	1 с	1 с
Ток	1 А	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Механические единицы				
Скорость	1 м/с	10^2 см/с	10^2 см/с	10^2 см/с
Ускорение	1 м/с ²	10^2 см/с ²	10^2 см/с ²	10^2 см/с ²
Энергия и работа	1 Дж	10^7 эрг	10^7 эрг	10^7 эрг
Мощность	1 Вт	10^7 эрг/с	10^7 эрг/с	10^7 эрг/с
Сила	1 Н	10^5 дин	10^5 дин	10^5 дин
Давление	1 Па	0,1 дин/см ²	0,1 дин/см ²	0,1 дин/см ²

Наименование величины	Системы единиц			
	МКСА (СИ)	СГСЭ	СГСМ	СГС
Электрические единицы				
Количество заряда	1 Кл	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Разность потенциалов	1 В	1/300	10^8	1/300
Электрическая емкость	1 Ф	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	$9 \cdot 10^{11}$
Электрическое сопротивление	1 Ом	$1/9 \cdot 10^{-11}$	10^{-9}	$1/9 \cdot 10^{-11}$
Диэлектрическая проницаемость	1 Ф/м	$36\pi \cdot 10^9$	$4\pi \cdot 10^{-11}$	$36\pi \cdot 10^9$
Напряженность электрического поля	1 В/м	$1/3 \cdot 10^{-4}$	10^6	$1/3 \cdot 10^{-4}$
Электрическая индукция	1 Кл/м ²	$12\pi \cdot 10^5$	$4\pi \cdot 10^{-4}$	$12\pi \cdot 10^5$
Магнитные единицы				
Напряженность магнитного поля	1 А/м	$12\pi \cdot 10^7$	$4\pi \cdot 10^{-3}$ э	$4\pi \cdot 10^{-3}$ э
Магнитная индукция	1 Т	$1/3 \cdot 10^{-6}$	10^4 Гс	10^4 Гс
Магнитный поток	1 Вб	1/300	10^8 мкс*	10^8 мкс
Магнитный момент	1 А/м ²	$3 \cdot 10^{13}$	10^3	10^3
Индуктивность	1 Гн	$1/9 \cdot 10^{-11}$	10^9 см	10^9 см
Магнитная проницаемость	1 Гн/м	$1/36\pi \cdot 10^{-13}$	$1/4\pi \cdot 10^7$	$1/4\pi \cdot 10^7$

* Единица потока «мкс» — 1 Максвелл.

Полезные соотношения:

1 год = $3,1557 \cdot 10^7$ с,

1 кг-силы = $9,81 \cdot 10^5$ Н,

1 атм. = $1,0133 \cdot 10^5$ Па,

1 мм рт. ст. = $1,333 \cdot 10^2$ Па,

1 эВ = $1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж,

1 кг-м = 9,81 Дж,

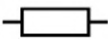
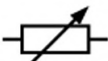
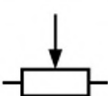
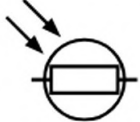





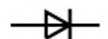

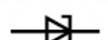
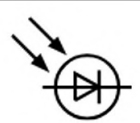

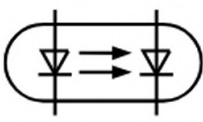
1 калория = 4,1868 Дж,



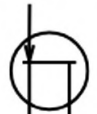


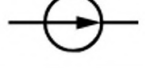

1 л.с. = 735,5 Вт.

Энергии в один электрон-вольт соответствует: длина волны кванта 1,24 мкм, частота кванта $2,42 \cdot 10^{14}$ Гц, скорость электрона $5,93 \cdot 10^5$ м/с, температура $11,6 \cdot 10^3$ К.

Условные обозначения элементов на схемах

Таблица П.8

Элемент		Условное обозначение	Буквенное обозначение
Резистор	постоянный		R
	переменный		
	переменный, реостат		
	фоторезистор		
Конденсатор	постоянный		C
	электролитический		
	переменный		
	подстрочный		
Катушка индуктивности	постоянная		L
Диод	выпрямительный		VD
	стабилитрон		
	туннельный		
	фотодиод		
	светоизлучающий		
	оптрон		

Элемент		Условное обозначение	Буквенное обозначение
Транзистор	Биполярный $n-p-n$		VT
	биполярный $p-p-p$		
	полевой с $p-n$ переходом и n -каналом		
	полевой с $p-n$ переходом и p -каналом		
Источник	Постоянной ЭДС		E
	напряжения		E, e
	тока		I, i

Приложение 9

Система маркировки компонентов цепей

Маркировка резисторов

При указании номинала вместо десятичной точки пишут букву, соответствующую единицам измерения (К — для кило, М — для мегом, Е или R — Ом). Любой номинал отображается максимум тремя символами. Например, 4K7 обозначает резистор, сопротивлением 4,7 кОм, 1R0 — 1 Ом, M12 — 0,12 МОм = 120 кОм и т. д. Однако в таком виде наносить номиналы на резисторы дорого, поэтому применяют маркировку цветными полосами.

Для резисторов с точностью 20 % используют маркировку с тремя полосками, для резисторов с точностью 10 % и 5 % — маркировку с четырьмя полосками, для более точных резисторов с пятью или шестью полосками. Первые две полосы всегда означают первые два знака номинала. Если полосок 3 или 4, третья полоска означает десятичный множитель, то есть степень десятки, на которую умножается число, состоящее из двух цифр, указанное первыми двумя полосками.

Если полосок 4, последняя указывает точность резистора. Если полосок 5, третья означает третий знак сопротивления, четвертая — десятичный множитель, пятая — точность. Шестая полоска, если она есть, указывает температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Если эта полоска в 1,5 раза шире остальных, то она указывает надежность резистора (% отказов на 1000 часов работы). Соответствие цветов и величин приведены в табл. П. 9.

Таблица П.9

Цвет	Значение			
	число	множитель	точность, %	ТКС, ppm/°C
серебристый	—	10^{-2}	10	—
золотой	—	10^{-1}	5	—
черный	0	10^0	—	—
коричневый	1	10^1	1	100
красный	2	10^2	2	50
оранжевый	3	10^3	—	15
желтый	4	10^4	—	25
зеленый	5	10^5	0,5	—
синий	6	10^6	0,25	10
фиолетовый	7	10^7	0,1	5
серый	8	10^8	—	—
белый	9	10^9	—	1
отсутствует	—	—	20 %	—

Следует отметить, что иногда встречаются резисторы с 5 полосами, но стандартной (5 или 10 %) точностью. В этом случае первые две полосы задают первые знаки номинала, третья — множитель, четвертая — точность, а пятая — температурный коэффициент.

Маркировка конденсаторов

Ассортимент конденсаторов значительно шире, чем резистор. Поэтому система их маркировки более разнообразная.

1. Маркировка тремя цифрами.

Первые две цифры указывают на значение емкости в пикофарадах, последняя — количество нулей. Когда конденсатор имеет емкость менее 10 пФ, то последняя цифра может быть «9». При емкостях меньше 1.0 пФ первая цифра «0». Буква R используется в качестве десятичной запятой. Например, код 010 равен 1,0 пФ, код 0R5 — 0,5 пФ. Система обозначений иллюстрируется табл. П. 10.

Таблица П.10

Код	пФ, pF	нФ, nF	Код	пФ, pF	нФ, nF	мкФ, uF
109	1,0		152	1500	1,5	
159	1,5		222	2200	2,2	
229	2,2		332	3300	3,3	
339	3,3		472	4700	4,7	
479	4,7		682	6800	6,8	
689	6,8		103	10000	10	0,01
100	10	0,01	153	15000	15	0,015
150	15	0,015	223	22000	22	0,022
220	22	0,022	333	33000	33	0,033
330	33	0,033	473	47000	47	0,047
470	47	0,047	683	68000	68	0,068
680	68	0,068	104	10000	100	0,1
101	100	0,1	154	15000	150	0,15
151	150	0,15	224	22000	220	0,22
221	220 пФ	0,22 нФ	334	33000	330	0,33
331	330	0,33 нФ	474	47000	470	0,47
471	470	0,47	684	680000	680	0,68
681	680	0,68	105	1000000	1000	1
102	1000	1	106	10000000	10000	10

2. Маркировка четырьмя цифрами.

Маркировка аналогична описанной выше, но в этом случае первые три цифры определяют число, а последняя — показатель степени по основанию 10, для получения емкости в пикофарадах. Например:

$$1622 = 162 \cdot 10^2 \text{ пФ} = 16200 \text{ пФ} = 16,2 \text{ нФ}.$$

3. Буквенно-цифровая маркировка.

При такой маркировке буква указывает на десятичную запятую и обозначение (мкФ, нФ, пФ), а цифры — на значение емкости:

$$\begin{aligned} 15\text{п} &= 15 \text{ пФ}, 22\text{р} = 22 \text{ пФ}, 2\text{н}2 = 2,2 \text{ нФ}, \\ 4\text{н}7 &= 4,7 \text{ нФ}, \text{u}33 = 0,33 \text{ мкФ}. \end{aligned}$$

Очень часто бывает трудно отличить русскую букву «п» от латинской — «n».

Иногда для обозначения десятичной точки используется буква «R». Обычно так маркируют емкости в микрофарадах, но если перед буквой R стоит ноль, то это пикофарады, например:

$$0\text{R}5 = 0,5 \text{ пФ}, \text{R}47 = 0,47 \text{ мкФ}, 6\text{R}8 = 6,8 \text{ мкФ}.$$

Некоторые математические константы

Таблица. П.11

Величина	Значение	Величина	Значение
π	3,141593	$1/\pi$	0,318310
2π	6,283185	$1/2\pi$	0,159155
$\pi/2$	1,570796	$1/\pi^2$	0,101321
$\pi/3$	1,047198	$180/\pi = 1$ рад	57,295780
$\pi/4$	0,785398	e	2,718282
$\pi/6$	0,523599	\sqrt{e}	1,648721
$\pi/8$	0,392699	$1/e$	0,367879
$\pi/180 = 1^\circ$	0,017453	$1/\sqrt{e}$	0,606531
π^2	9,869604	e^2	7,389057
$\sqrt{\pi}$	1,772454	$1/e^2$	0,135335
$\sqrt{2\pi}$	2,506628	$\lg(e)$	0,434294
$\sqrt{\pi/2}$	1,253314	$\ln(10)$	2,302585

Таблица. П.12

n	n^2	n	n^2	n	n^2	n	n^2
1	1	11	121	21	441	31	961
2	4	12	144	22	484	32	1024
3	9	13	169	23	529	33	961
4	16	14	196	24	576	34	1849
5	25	15	225	25	625	35	1225
6	36	16	256	26	676	36	1296
7	49	17	289	27	729	37	1369
8	64	18	324	28	784	38	1444
9	81	19	361	29	841	39	1521
10	100	20	400	30	900	40	1600

Таблица. П. 13

n	2^n	n	2^n	n	2^n	n	2^n
1	2	9	512	17	131072	25	33554432
2	4	10	1024	18	262144	26	67108864
3	8	11	2048	19	524288	27	134217728
4	16	12	4096	20	1048576	28	134217728
5	32	13	8192	21	2097152	28	536870912
6	64	14	16384	22	4194304	30	1073741824
7	128	15	32768	23	8388608	31	2147483648
8	256	16	65536	24	16777216	32	4294967296

Приложение 11

Элементарные приближенные вычисления

Таблица. П.14

Формулы	Относительная погрешность не более		
	0,1 %	1 %	10 %
	Интервал		
$\sin(x) \approx x$	$\pm 0,077$	$\pm 0,245$	$\pm 0,786$
$\sin(x) \approx x - x^3/6$	$\pm 0,580$	$\pm 1,005$	$\pm 1,632$
$\cos(x) \approx 1$	$\pm 0,045$	$\pm 0,141$	$\pm 0,451$
$\cos(x) \approx 1 - x^2/2$	$\pm 0,386$	$\pm 0,662$	$\pm 1,338$
$\operatorname{tg}(x) \approx x$	$\pm 0,054$	$\pm 0,172$	$\pm 0,517$
$\operatorname{tg}(x) \approx x + x^3/3$	$\pm 0,293$	$\pm 0,519$	$\pm 0,895$
$\arcsin(x) \approx x$	$\pm 0,077$	$\pm 0,245$	$\pm 0,786$
$\arcsin(x) \approx x + x^3/6$	$\pm 0,588$	$\pm 1,046$	$\pm 1,861$
$\arccos(x) \approx \pi/2$	$\pm 0,001$	$\pm 0,015$	$\pm 0,157$
$\arccos(x) \approx \pi/2 - x$	$\pm 0,211$	$\pm 0,455$	$\pm 0,980$
$\operatorname{arctg}(x) \approx x$	$\pm 0,054$	$\pm 0,172$	$\pm 0,517$
$\operatorname{arctg}(x) \approx x^3/3$	$\pm 0,265$	$\pm 0,472$	$\pm 0,640$
$1/(1+x) \approx 1-x$	$\pm 0,031$	$\pm 0,099$	$\pm 0,301$

Формулы	Относительная погрешность не более		
	0,1 %	1 %	10 %
$\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$	$\pm 0,085$	$\pm 0,247$	$\pm 0,607$
$e^x \approx 1+x$	$\pm 0,045$	$\pm 0,134$	$\pm 0,375$
$e^x \approx 1+x+x^2/2$	$\pm 0,182$	$\pm 0,390$	$\pm 0,843$
$\ln(1+x) \approx x$	$\pm 0,002$	$\pm 0,020$	$\pm 0,176$
$(1+x)^m \approx 1+mx$	$\pm \frac{0,044}{\sqrt{ m(m-1) }}$	$\pm \frac{0,141}{\sqrt{ m(m-1) }}$	$\pm \frac{0,447}{\sqrt{ m(m-1) }}$

Примеры

1. Вычислить $\sqrt{47}$.

Используем приближенное выражение для извлечения корня

$$\sqrt{47} = \sqrt{49-2} = 7\sqrt{1-\frac{2}{49}} \approx 7\left(1-\frac{1}{49}\right).$$

Это еще неокончательный ответ. Можно произвести вычисление приближенного выражения точно, но поскольку оно уже содержит ошибку, то нет смысла это делать. Поступить можно несколькими способами.

Например, $\frac{1}{49} \approx 2\%$. Уменьшаем значение 7 на 2 % (0,14) и получаем 6,86. Ответ на калькуляторе 6,855655. Ошибка $\approx 0,06\%$.

2. Вычислить $8,4^2$.

Поступаем следующим образом

$$8,4^2 = (8 + 0,4)^2 = 64(1 + 0,05)^2 \approx 64(1 + 0,1) = 70,4.$$

Калькулятор дает результат 70,56. Ошибка $\approx 0,2\%$.

3. Вычислить $\sin(70^\circ)$.

Вначале заменим синус косинусом дополнительного угла

$$\sin(70^\circ) = \cos(20^\circ).$$

Используем приближенное выражение для косинуса

$$\cos(x) \approx 1 - \frac{x^2}{2}.$$

Тогда

$$\sin(70^\circ) \approx 1 - 0,5\left(\frac{20}{180}\pi\right)^2 = 1 - 0,5\left(\frac{\pi}{9}\right)^2 = 1 - \frac{0,5}{81}\pi^2 \approx 1 - \frac{1}{16} = 0,9375.$$

Калькулятор дает результат 0,939693. Ошибка $\approx 0,2\%$.

Более точный результат можно получить, если использовать формулу синуса суммы углов.

Все числовые значения округляем до трех знаков после запятой.

$$\begin{aligned}\sin(70^\circ) &= \sin(60^\circ + 10^\circ) = \sin(60^\circ)\cos(10^\circ) + \sin(10^\circ)\cos(60^\circ) = \\ &= 0,866\cos(10^\circ) + \sin(10^\circ)0,5 \approx 0,866(1 - 0,174^2/2) + 0,5 \cdot 0,174.\end{aligned}$$

При возведении числа 0,174 квадрат вспоминаем (см. таблицу П. 13), что $17^2 = 289$, поэтому $0,174 \approx 0,030$. Можно конечно уточнить, как в примере 1, но в этом нет необходимости.

Далее

$$\sin(70^\circ) \approx 0,866(1 - 0,015) + 0,087 \approx 0,853 + 0,087 \approx 0,940.$$

Калькулятор дает результат 0,939693. Ошибка $\approx 0,1\%$. Ошибка теперь вдвое меньше. Разумность этой более громоздкой процедуры определятся требованием к точности расчетов. Для инженерной практики и $0,2\%$ вполне достаточно.

4. Вычислить $\operatorname{arctg}(100)$.

В дисциплинах, связанных с электрическими токами и напряжениями, для определения фазовых соотношений часто приходится вычислять значения $\operatorname{arctg}(x)$. Для малых значений аргумента можно использовать приведенные выше формулы. Если же $x \gg 1$, то ситуация несколько хуже¹. Покажем, как в этом случае можно поступить.

Решаем обратную задачу

$$\operatorname{tg}(\varphi) = 100$$

Переходим от тангенса к котангенсу

$$\operatorname{ctg}(\varphi) = 0,01$$

Далее

$$\operatorname{ctg}(\varphi) = \operatorname{tg}(0,5\pi - \varphi) = 0,01.$$

Используем приближенную формулу для тангенса

$$0,5\pi - \varphi = 0,01$$

и получаем

$$\varphi = 0,5\pi - 0,01.$$

¹ Существуют приближенные формулы для обратных тригонометрических функций и для больших значений аргумента. Их можно найти в математических справочниках. На лекциях по математике вам изложат общий метод разложения функций в степенные ряды (ряд Тейлора).

Один радиан равен $\approx 57,3^\circ \approx 60^\circ$, следовательно,

$$\varphi = 90^\circ - 0,6^\circ = 89,4^\circ.$$

Калькулятор дает результат 89,427061. Ошибка всего $\approx 0,03\%$.

5. Вычислить $e^{2,5}$.

При решении некоторых задач требуется вычислять степени трансцендентного числа $e \approx 2,718281\dots$ ¹. Покажем, как можно проводить вычислительные операции с этим числом

$$e^{2,5} = e^{2,3+0,2} = e^{2,3}e^{0,2} \approx 10e^{0,2} \approx 10(1 + 0,2) \approx 12,0.$$

Калькулятор дает результат 12,182496. Ошибка $\approx 1,5\%$. Как уже говорилось это приемлемая точность. Ее можно при необходимости повысить, если использовать более точные приближения:

$$e^{2,5} = e^{2,303+0,197} \approx 10e^{0,197} = 10(1 + 0,197 + 0,197^2/2).$$

Ясно, что $0,197^2 \approx 0,2^2 = 0,04$, поэтому

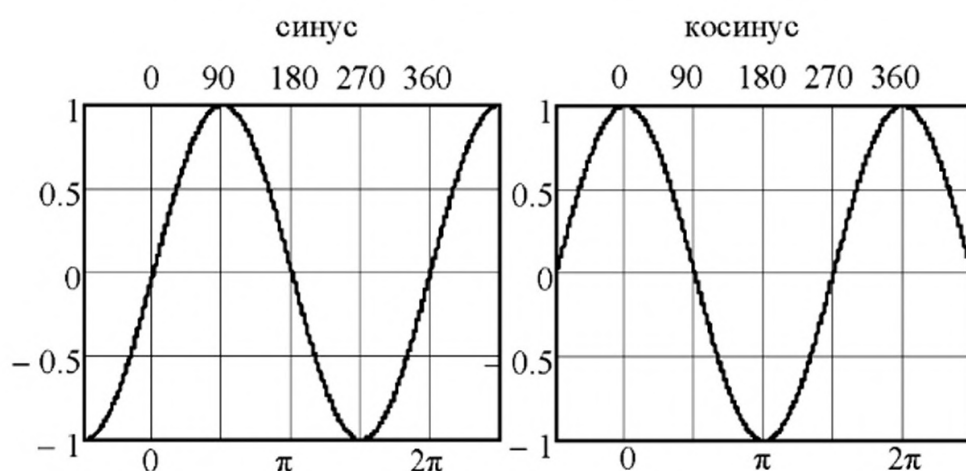
$$e^{2,5} \approx 10(1 + 0,197 + 0,02) = 12,17.$$

Теперь ошибка не более $0,1\%$!

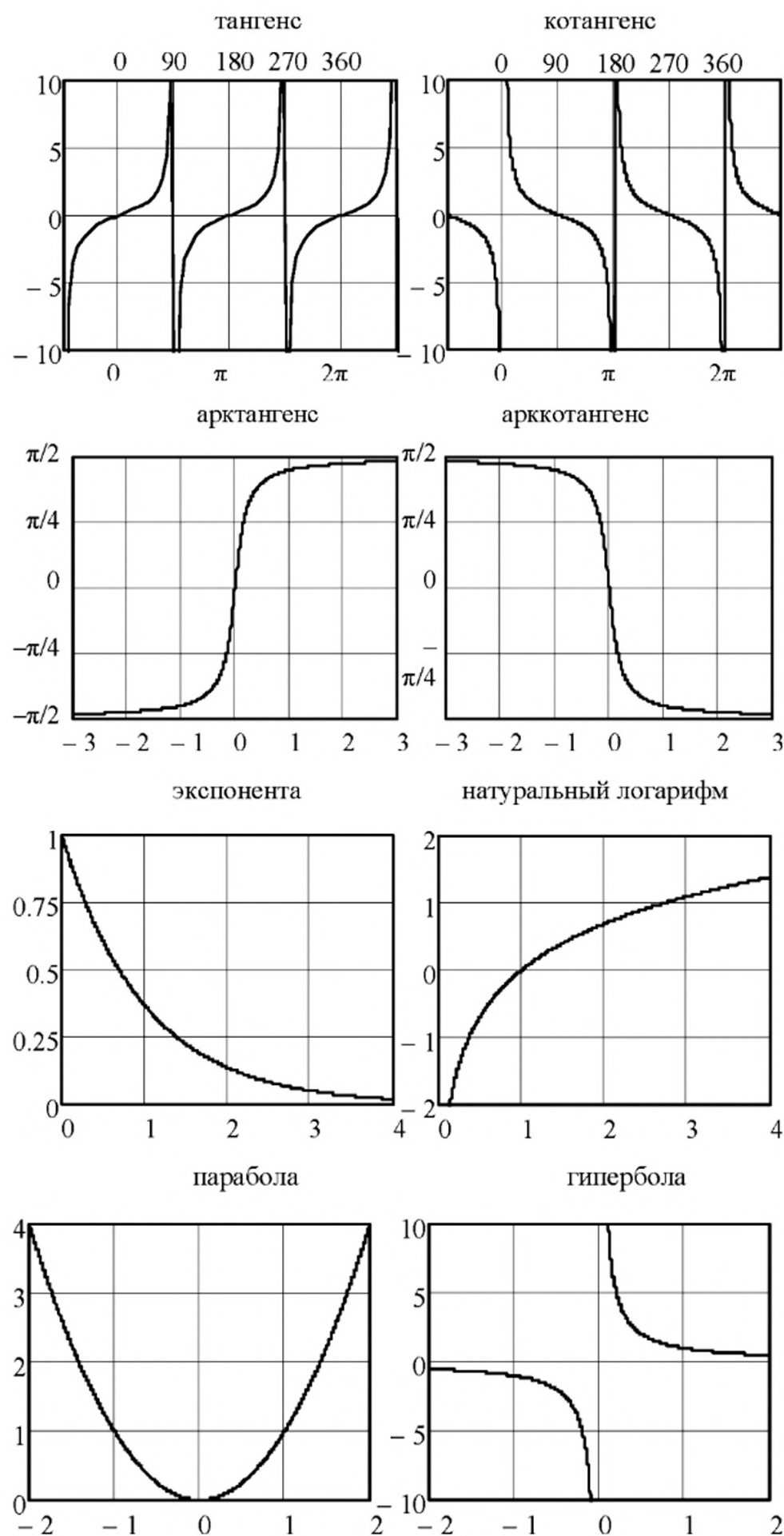
Как видите, приближенные вычисления дают вполне приемлемую точность. При надлежащей тренировке вы сможете делать и более сложные вычисления, не имея в руках ничего, ну может быть лишь ручку и листок бумаги.

Приложение 12

Некоторые часто встречающиеся функции



¹ Сейчас известно 12 884 901 000 значащих цифр этого числа.



Некоторые полезные формулы

$$\sin(A \pm B) = \sin(A)\cos(B) \pm \sin(B)\cos(A)$$

$$\cos(A \pm B) = \cos(A)\cos(B) \pm \sin(A)\sin(B)$$

$$\sin(2A) = 2\sin(A)\cos(B)$$

$$\cos(2A) = \cos^2(A) - \sin^2(A)$$

$$\sin^2(A) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(2A)$$

$$\cos^2(A) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(2A)$$

$$\sin^3(A) = \frac{3}{4}\sin(A) - \frac{1}{4}\sin(3A)$$

$$\cos^3(A) = \frac{3}{4}\cos(A) + \frac{1}{4}\cos(3A)$$

$$2\cos(A)\cos(B) = \cos(A - B) + \cos(A + B)$$

$$2\sin(A)\sin(B) = \cos(A - B) - \cos(A + B)$$

$$2\sin(A)\cos(B) = \sin(A - B) + \sin(A + B)$$

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:
в отделе по работе с вузами
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:
список магазинов смотрите на сайте urait.ru
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:
в отделе продаж
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию
e-mail: gred@urait.ru

Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»

Учебное издание

Штыков Виталий Васильевич

ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ

Учебник и практикум для вузов

Формат 70×100 1/16.
Гарнитура «Charter». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 17,69

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru