

Василий Алексеевич Смирнов
Основы радиосвязи на ультракоротких волнах

Отв. редактор *С. В. Бородич*
Редактор *А. В. Гороховский*

Техн. редактор *Л. Ш. Береславская*
Корректор *Л. Н. Пур*

Сдано в набор 12/XI 1956 г. Подписано в печ. 31/VIII 1957 г.
Форм. бум. 60×92/16. 51,5 печ. л. (вкл. 1 вкл.) 46,63 уч.-изд. л.
Т-08338. Тираж 10 000 экз. Зак. изд. 4498 Цена 24 руб. 85 коп.
Связьиздат, Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2.

Типография Связьиздата, Москва-центр, ул. Кирова, 40. Зак. тип. 788

В. А. СМИРНОВ

ОСНОВЫ РАДИОСВЯЗИ НА УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛНАХ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ
ПО ВОПРОСАМ СВЯЗИ И РАДИО
МОСКВА 1957

ПРЕДИСЛОВИЕ

Связь на ультракоротких волнах (УКВ) получила в наши дни широкое практическое использование. Директивами XX съезда КПСС предусматривается, в частности, строительство за годы шестой пятилетки большого числа радиорелейных линий.

Однако в настоящее время отсутствуют книги, в которых достаточно полно излагались бы основные теоретические и практические сведения, относящиеся к радиосвязи на УКВ. Поэтому, естественно, написание предлагаемой вниманию читателей книги, являющейся первой попыткой восполнить указанный пробел, было сопряжено с большими трудностями.

Одна из трудностей состояла в том, что из весьма большого числа опубликованных в отечественной и иностранной периодической литературе статей, а также из монографий и диссертаций нужно было выбрать наиболее существенное.

Кроме того, основы современной техники связи на УКВ не могут быть хорошо поняты и усвоены без знания некоторых разделов высшей математики и физики, которые или совершенно не читаются студентам высших технических учебных заведений, или даются в весьма ограниченном объеме и абстрактно. К таким разделам математики относятся, например, теория случайных функций и теория специальных функций, а к разделам физики — теория электромагнетизма. В связи с этим мы сочли необходимым кратко изложить в книге наиболее важные для усвоения основ радиосвязи на УКВ разделы математики и физики. Включение этих разделов облегчает чтение книги, так как отпадает необходимость прибегать на каждом шагу к многочисленной специальной дополнительной литературе и, кроме того, показывает, какими общетеоретическими и общезначимыми знаниями должен обладать радионинженер, чтобы глубоко освоить технику радиосвязи на УКВ.

Задача написания книги осложнялась также и тем, что автор стремился дать не только общетеоретические положения, но и тесно увязать их с практикой. С этой целью в каждой главе вводятся формулы, применяемые при проектировании систем УКВ связи, и даются различные сведения, важные для практики. Автор стремился к тому, чтобы по материалам книги можно было провести достаточно полный расчет основных параметров проек-

тируемой системы УКВ связи.

В книге учтён опыт работы автора и ряда ведущих специалистов НИИ Министерства связи СССР в области создания отечественных радиорелейных систем связи на УКВ.

Из семнадцати глав книги автором написано четырнадцать; гл. 6, 16 и 17, написанные соответственно кандидатом технических наук И. А. Домбровским, кандидатом технических наук Н. И. Калашниковым и инженером А. В. Соколовым, были подвергнуты лишь общему редактированию.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук С. В. Бородичу за большую помощь, оказанную им при написании и издании настоящей книги. Являясь ответственным редактором, С. В. Бородич в процессе редактирования внёс много весьма ценных рекомендаций. Кроме того, им осуществлена некоторая коррективная гл. 9, 11 и 13 книги.

Автор считает своим долгом выразить благодарность также рецензентам книги, сделавшим ценные замечания, которые были учтены при окончательной подготовке текста книги к изданию.

Все замечания по книге следует направлять в Связьиздат по адресу: Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Диапазон ультракоротких волн и его деление. Ультракороткими электромагнитными волнами (УКВ) называются волны длиной от 10 м до 1 см включительно. Этим волнам соответствуют колебания с частотами от 30 Мгц до 30 000 Мгц включительно.

Спектр ультракоротких волн и соответствующих им частот, согласно Регламенту радиосвязи, принятому в г. Атлантик-Сити (США) в 1947 г., разделяется на ряд диапазонов, указанных в таблице.

Диапазоны ультракоротких волн

Название волн (диапазонов)	Длина волн м	Полное название частот	Сокращённое обозначение частот	Частоты Мгц
Метровые	10—1	Очень высокие частоты	ОВЧ (VHF)	30—300
Дециметровые	1—0,1	Ультравысокие частоты	УВЧ (UHF)	300—3000
Сантиметровые	0,1—0,01	Сверхвысокие частоты	СВЧ (SHF)	3000—30 000

По своим физическим и техническим особенностям весь этот спектр электромагнитных волн не является однородным. Действительно, если рассмотреть такую особенность УКВ, как их распространение над поверхностью земли, то как будет об этом подробно изложено в гл. 7, ультракороткие волны различной длины имеют различный характер распространения. Например, волны длиной приблизительно от 3 м до 10 м обладают ещё заметной способностью отражения от ионосферы, аналогичной отражению коротких волн. Благодаря этому с помощью их можно, хотя и не регулярно, осуществлять связь на весьма далёкие расстояния. Используя эффект рассеяния от ионосферы волн длиной 5—7 м, устанавливают и довольно регулярные связи на расстояния более тысячи километров. Волны короче 3 м практически теряют эти особенности и поэтому в большинстве случаев используются для связи лишь

в пределах прямой оптической видимости или, используя эффект рассеяния от неоднородностей тропосферы, на расстояния, не превышающие нескольких сотен километров. Для волн приблизительно короче 5 см характерна другая особенность — сравнительно сильное поглощение их энергии в сыром воздухе (при тумане, дожде, снегопаде). Не однородны и некоторые другие свойства волн УКВ диапазона.

По ряду причин, о которых будет сообщено далее, для связи используют обычно волны в пределах примерно от 5 см до 3 м. На более длинных волнах УКВ диапазона работают основное радиовещательные и телевизионные станции. Волны короче 5 см для целей связи используются более редко вследствие их сильного поглощения в атмосфере. Поэтому в дальнейшем изложении под УКВ диапазоном будем подразумевать главным образом практически используемый для связи диапазон волн от 5 см до 3 м (диапазон частот 100 Мгц — 6000 Мгц).

Причины использования УКВ диапазона и его основные технические особенности. В течение примерно 20 лет развития современной радиотехники (считая со времени появления ламповых радиопередатчиков и радиоприёмников) для связи и вещания использовались длинные, средние и короткие радиоволны. Вследствие быстрого развития радиосвязи и радиовещания и увеличения количества радиостанций уже в тридцатых годах возникла серьёзная техническая проблема „экономии эфира“, т. е. необходимость экономного использования спектра частот. Ширина всего спектра частот, соответствующего диапазонам длинных, средних и коротких волн, составляет около 30 000 кГц. Учитывая, что каждый вещательный и телефонный радиоканал занимает полосу частот шириной около 10 кГц и что возможность одновременно о использования одного и того же канала в спектре весьма ограничена, практически оказалось возможным осуществлять одновременно лишь весьма ограниченное число радиосвязей. „Экономия эфира“, которая достигалась такими мерами, как жёсткая стабилизация несущих частот, сокращение полос, предоставляемых каждому виду связи, использование для передачи одной боковой полосы частот, применение направленных антенн не могла радикально разрешить проблемы дальнейшего развития связи и вещания. Возможное количество каналов-часов, предоставляемое разным странам в указанных диапазонах, было в явном несоответствии с фактическими потребностями этих стран в средствах связи и вещания. Отсюда совершенно естественно появилось стремление применить УКВ для радиосвязи и радиовещания.

Было бы, однако, неточным утверждать, что переход к использованию УКВ диапазона продиктован лишь причинной, вытекающей из роста народнохозяйственных потребностей в средствах связи и вещания. Имеются причины и чисто технического характера. Например, применение УКВ для передачи

телевидения является по существу уже технической необходимостью. Действительно, для передачи только одной телевизионной программы с приемлемым качеством необходима полоса частот около 5—6 *Мгц*. Разместить хотя бы несколько таких каналов в спектре частот до 30 *Мгц* невозможно вследствие уплотнённости диапазона, и кроме того (что очень важно), из-за различного характера распространения радиоволн, соответствующих полосе частот телевизионного канала. Последняя причина приводит к недопустимым искажениям передаваемого изображения. Поэтому для передачи телевидения УКВ технически необходимы.

Как видно из определения УКВ диапазона, здесь можно использовать спектр частот шириной около 6000 *Мгц*. Такая огромная ширина УКВ спектра является первой и важнейшей особенностью этого диапазона. Она позволила прежде всего осуществить на этих волнах высококачественное телевизионное вещание. Кроме того, такая ширина УКВ спектра позволила по новому подойти и к созданию систем связи, предназначенных для передачи телефонных и других сообщений. Этот новый подход заключается в использовании здесь новых видов модуляции, не применяющихся на других волнах, например, широкополосной частотной модуляции, различных видов импульсной модуляции и др. Применение таких видов модуляции позволяет повысить помехозащищённость передаваемых сообщений и улучшить некоторые другие полезные качества систем связи. Однако при этом системы связи занимают значительно более широкий спектр частот, вследствие чего осуществление их невозможно в диапазоне более длинных волн. Наконец, эта же основная особенность УКВ диапазона дала возможность создать многоканальные системы телефонно-телеграфной связи.

Другая существенная особенность УКВ диапазона вытекает из характера распространения этих волн. Как уже отмечалось, практически УКВ не распространяются далеко за пределы прямой оптической видимости. Отсюда возникла необходимость применения радиорелейных систем связи для обеспечения дальней связи на УКВ.

Радиорелейными системами связи принято называть такие системы, которые состоят из цепочки приёмо-передающих радиостанций, соединяющих оконечные пункты линии связи. Соседние радиостанции этой цепочки располагают на таком расстоянии друг от друга, чтобы передача сигнала от одной из этих станций к другой осуществлялась с достаточной надёжностью. Сигнал, излучённый антенной радиопередатчика одной из оконечных станций, принимается ближайшей к ней соседней, так называемой радиорелейной или ретрансляционной станцией, усиливается ею и излучается к следующей станции и т. д. до другой оконечной станции. Подробное описание радиорелейных систем на УКВ приведено в гл. 1.

Ограниченная дальность распространения УКВ является их недостатком и в то же время достоинством. Действительно, благодаря этой их особенности возможно, например, создание в данной стране системы вещания и связи без помех со стороны аналогичных систем других стран; следовательно, в этом отношении свойства УКВ линий связи приближаются к свойствам проводных линий.

Третья важная техническая особенность УКВ состоит в возможности создания антенных систем, обладающих острой направленностью излучения энергии. Применение таких систем приводит к снижению взаимных помех между УКВ линиями связи, позволяет понизить мощность радиопередатчиков, а также имеет ряд других преимуществ.

Существенная особенность диапазона УКВ состоит также в отсутствии атмосферных помех и сравнительно небольшом уровне промышленных помех.

Все приведённые основные особенности УКВ диапазона и определяют его широкое практическое использование в настоящее время.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УКВ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И ТРЕБОВАНИЯ К КАНАЛАМ СВЯЗИ

1.1. Классификация УКВ систем связи

В настоящее время УКВ системы широко применяются для целей как междугородной, так и местной связи.

Прежде всего все УКВ системы связи аналогично системам связи на более длинных волнах разделяются на неподвижные, подвижные и смешанные. Неподвижные, подвижные и смешанные системы, в свою очередь, можно разделить на системы радиорелейные и прямые (однопролётные).

Кроме того, УКВ системы можно также разделить по характеру передаваемых сигналов на телефонные, телеграфные, телевизионные и смешанные.

Таким образом, классификация УКВ систем связи по существу не отличается от классификации систем связи на длинных, средних и коротких волнах. Следует, однако, отметить, что если на более длинных волнах наибольшее распространение получила система прямой связи как на междугородных, так и местных линиях (радиорелейная связь здесь является редкостью), то на УКВ радиорелейная система связи является почти единственной встречающейся системой междугородной связи; прямая же система типична лишь для местных линий весьма небольшой протяжённости. Этот характер УКВ систем связи роднит их с системами проводной междугородной связи.

Следующим существенным отличием УКВ систем связи от радио систем на более длинных волнах и одновременно сходством их с проводными системами является многоканальность УКВ систем. Многоканальность не типична для систем радиосвязи на волнах более длинных чем УКВ, в то время как УКВ системы, особенно междугородной связи, как правило, многоканальные. Благодаря этой особенности, а также благодаря меньшей стоимости, небольшим затратам цветных металлов и большей гибкости УКВ системы смогли конкурировать с проводными воздушными и кабельными системами связи.

Передача телевидения, как уже отмечалось во введении, осуществляется только на УКВ и по кабелю.

УКВ системы могут быть одностороннего и двустороннего действия. К односторонним системам относятся, например, системы, предназначенные для трансляции телевидения или звукового вещания из студии на радиочастоту и т. п. Типичным примером систем двустороннего действия являются телефонные радиорелейные системы.

1.2. Выбор рабочих волн

Как было указано во введении, для УКВ связи используются в большинстве случаев волны от 5 см до 3 м (соответственно частоты от 100 МГц до 6000 МГц). Первое распределение радиоволн этого диапазона между различными службами было предпринято на международной конференции в Атлантик-Сити в 1947 г. Распределение волн, принятое в настоящее время в различных странах, отличается от рекомендованного в Атлантик-Сити и допускает сооружение УКВ линий связи на метровых, дециметровых и сантиметровых волнах. Сейчас в эксплуатации имеются УКВ системы связи, работающие на всех этих волнах.

Отметим некоторые основные факторы, влияющие на выбор конкретных рабочих волн при проектировании УКВ систем связи. К таким факторам относятся, например, следующие:

- 1) максимальная длина участков линии связи,
- 2) класс системы (стационарная, подвижная),
- 3) ширина полосы системы, определяемая количеством и качеством каналов связи.

Влияние первого фактора особенно ясно можно проиллюстрировать на примерах рассмотрения связей в пределах прямой видимости и за этими пределами.

Как уже отмечалось, по особенностям распространения радиоволн диапазон УКВ не является однородным. В частности, известно, что при одинаковых условиях излучения с увеличением длины волны возрастает поле за пределами прямой видимости. Поэтому во всех тех случаях, когда по тем или иным условиям невозможно осуществить прямую видимость на участке связи (например, при установлении связи через значительные водные пространства), используют наиболее длинные волны, обычно больше 1 м. В этих случаях ещё более выгодным было бы использовать волны длиннее 3 м, однако их не применяют из-за того, что волны такой длины могут отражаться от ионосферы и распространяться на весьма далёкие расстояния. Этим самым нарушается полезная локальность УКВ связи и работа систем связи на волнах более 3 м может сопровождаться взаимными помехами. Намечаемое в ближайшие годы использование эффекта тропосферного рассеяния дециметровых волн

для целей связи возможно изменит такой подход к выбору волн для участков большой протяжённости.

Лучшая дифракционная способность более длинных волн делает их более удобными для подвижной связи, особенно в городских условиях. Поэтому, например, для таких видов городской УКВ подвижной связи как полицейская, пожарная и т. п. используют волны длиннее 1 м. Действительно, из полос частот, выделенных для этих видов связи на конференции в Атлантик-Сити:

- | | |
|----------------|-------------------|
| I. 30—40 МГц | III. 156—184 МГц; |
| II. 70—100 МГц | IV. 460—470 МГц, |

главным образом используются полосы II и III, которые соответствуют волнам длиннее 1 м.

Первоначально интенсивно использовалась также полоса I, но указанный уже недостаток соответствующих ей волн снизил интерес к ней в последующее время. Полоса IV, хотя и рекомендована для подвижных служб, однако сомнительно, чтобы она широко применялась в городских условиях ранее, чем будут полностью исчерпаны возможности полос II и III.

Естественно, что метровые волны могут быть также использованы для подвижной связи вне города, например, для подвижных радиорелейных линий связи, поскольку в условиях подвижной связи труднее обеспечить условия прямой видимости между всеми станциями в любое время и в любой местности. Однако в годы второй мировой войны в армиях США, Англии и Германии применялись радиорелейные линии связи, работавшие и на более коротких волнах. Так, немецкая аппаратура военного времени типа „Михаэль“ имела диапазон рабочих волн 50—55 см и широко использовалась для подвижных связей. В США во время войны была разработана, например, аппаратура типа AN/TRC-6 с рабочими волнами 6—7 см. Таким образом, для радиорелейных линий связи подвижного типа могут применяться и довольно короткие волны, что продиктовано уже иными тактико-техническими требованиями, например, требованием передавать сообщение с очень широкой полосой частот.

Что касается выбора рабочих волн для стационарных линий связи, работающих в пределах прямой видимости, а также и для радиорелейных стационарных линий связи, то современные теория и практика дают здесь более определённые указания. Здесь наблюдается вполне определённая тенденция перехода от волн наиболее длинных к наиболее коротким. Так, в 1930—1940 гг., т. е. в первое десятилетие развития УКВ стационарной связи, в основном использовались метровые волны. Во втором десятилетии (1940—1950 гг.), как правило, для этих связей использовались дециметровые и сантиметровые волны.

Все наиболее совершенные системы УКВ стационарной связи, созданные после 1945 г., работают на волнах, лежащих в диапазоне примерно 5—25 см. Сейчас этот диапазон волн и следует считать наиболее подходящим для стационарных линий связи (особенно радиорелейных) в тех случаях, когда исключена необходимость работать вне пределов прямой видимости.

Главнейшие причины использования наиболее коротких волн УКВ диапазона для стационарных систем связи, работающих в пределах прямой видимости, следующие:

а) они обеспечивают минимальное затухание на участке связи при минимальных размерах приёмно-передающих антенн и минимальных значениях мощностей передатчиков,

б) обладают большими практическими возможностями при передаче сообщений с очень широкими спектральными полосами.

Действительно, как будет показано в гл. 7, при осуществлении связи, например, с помощью одного прямого луча затухание участка, определяемое как отношение мощности, излучённой передающей антенной, к мощности, принятой приёмной антенной, пропорционально квадрату длины волны. Это означает, что при переходе от волны длиной 100 см к волне длиной 10 см затухание участка уменьшается в 100 раз (т. е. на 20 дб) при одинаковых эффективных площадях антенн. Кроме того, на коротких волнах диапазона становится возможным получить очень высокую направленность излучения, или соответственно очень большой коэффициент усиления антенн при разумных их габаритах. Например, на волнах 6—10 см в современной практике применяют антенны с коэффициентом усиления до 40 дб. Хотя принципиально и практически антенны с таким усилением можно создать для любой волны УКВ диапазона, однако на метровых и дециметровых волнах антенны становятся при этом столь огромными, что по экономическим соображениям реализация их нецелесообразна.

В современной практике на УКВ междугородных линиях связи требуется передача спектра частот шириной до 6 Мгц и даже выше (например, при передаче телевидения). Чтобы обеспечить неискажённое прохождение такого спектра через многие приёмно-передающие устройства, эти устройства должны обладать эффективными полосами пропускания значительно более широкими, чем спектр сигнала. Это условие легче реализовать на более коротких волнах УКВ диапазона.

1. 3. Радиорелейные линии связи, их построение и число используемых рабочих частот

Создание радиорелейных широкополосных систем связи является крупным достижением в использовании возможностей УКВ техники. В настоящее время известны УКВ системы связи,

допускающие одновременную передачу нескольких сотен телефонных разговоров и нескольких телевизионных программ на расстоянии в несколько тысяч километров (до 5000 км) при соблюдении соответствующих норм на качественные показатели. Тем самым такие УКВ системы стали технически не менее совершенными, чем системы связи по концентрическому кабелю. Поскольку многоканальные УКВ системы также более экономичны, чем кабельные системы, они весьма быстро внедряются в практику.

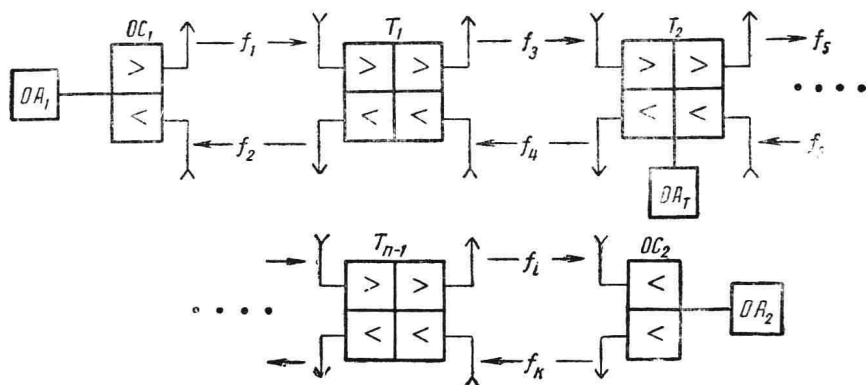


Рис. 1.1

Упрощённая блок-схема радиорелейной линии связи двустороннего действия приведена на рис. 1.1. На этой блок-схеме OC_1 и OC_2 — оконечные станции линии связи; $T_1, T_2 \dots T_{n-1}$ — ретрансляционные или промежуточные станции (блок-схема относится к линии связи, состоящей из n пролётов или участков); OA_1 и OA_2 — оконечная аппаратура, расположенная на концах линии связи; OA_T — оконечная аппаратура, связанная с одной из ретрансляционных станций, если в месте расположения этой станции происходит выделение части каналов или параллельное ответвление тех же каналов (например, каналов звукового вещания или телевидения); $f_1, f_2 \dots, f_i, f_k$ — рабочие частоты, используемые на отдельных участках линии. Как будет далее указано, многие из этих частот могут быть равны между собой, т. е. на разных участках линии частоты могут повторяться.

До настоящего времени на УКВ линиях связи двустороннего действия используют два отдельных канала — прямой и обратный, т. е. для передачи в одном и противоположном направлениях применяют отдельную аппаратуру.

Рассмотрим основной состав аппаратуры оконечных и ретрансляционных станций. На рис. 1.2 приведена блок-схема

оконечной станции. Как видно из неё, аппаратура оконечных станций может быть разделена на следующие основные узлы: *ВА* — высокочастотная аппаратура, включающая в себе *Пд* — передающее устройство и *Пр* — приёмное устройство; *СА* — служебная аппаратура; *ОА* — оконечная аппаратура; *ПП* — устройства первичного питания; *А* — передающая и приёмная антенны; *Л* — высокочастотные линии питания антенн (волновод и др.).

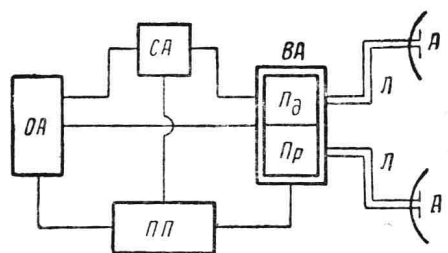


Рис. 1.2

В передающем устройстве *Пд*, входящем в комплект *ВА*, осуществляется генерация высокочастотных колебаний, их усиление и модуляция передаваемым сообщением. В приёмном устройстве *Пр* происходит обычно обратный процесс — демодуляция сообщения из предварительно усиленных модулированных высокочастотных колебаний.

С помощью высокочастотных линий *Л* (чаще всего они представляют собой коаксиальный кабель или полый волновод) *Пд* и *Пр* присоединяются соответственно к передающей и приёмной антеннам *А*, обладающим, как правило, большой направленностью.

Оконечная аппаратура *ОА* в многоканальных телефонных системах служит для группирования нескольких телефонных (или других) сообщений (т. е. расположения их определённым образом в спектре частот или во времени) с целью создания общего первичного модулирующего спектра, поступающего на передающую часть *ВА*, или для осуществления обратного процесса выделения индивидуальных сообщений из общего первичного модулирующего спектра, полученного с выхода приёмной части *ВА*.

Служебная аппаратура *СА* включает в себя устройства сигнализации, не предусмотренные непосредственно в составе *ОА* и *ВА*, устройства для осуществления служебной телефонной связи и для автоматического контроля и управления станцией.

Объём и техническое решение каждого из основных узлов зависит от типа системы связи, который определяется, главным образом, количеством и качеством каналов и видом модуляции. Более подробные сведения о высокочастотной аппаратуре приводятся в гл. 16 и 17.

Блок-схема ретрансляционной станции показана на рис. 1.3. Как видно из рисунка, эта станция представляет собой комбинацию из двух комплектов *ВА*. Существует два вида ретрансляционных станций. В одном из них *ВА* полностью аналогична аппа-

