

Л е к ц и я 16

Построение радиорелейных и спутниковых линий передачи

Основные понятия и определения. Классификация радиорелейных линий передачи. Принципы многоствольной передачи

Радиолиния передачи, в которой сигналы электросвязи передаются с помощью наземных ретрансляционных станций, называется радиорелейной линией передачи. Радиорелейная линия передачи (РРЛП) представляет собой цепочку приемопередающих радиостанций (оконечных, промежуточных, узловых), которые осуществляют последовательную многократную ретрансляцию (прием, преобразование, усиление и передачу) передаваемых сигналов.

Радиорелейная линия передачи, соседние станции которой размещаются одна от другой на расстоянии прямой видимости между антеннами этих станций, называется РРЛП прямой видимости (рис. 1). Здесь приняты следующие обозначения:

ОРС – *оконечная радиорелейная станция*, обеспечивающая преобразование отдельных подлежащих передаче сигналов в диапазоне частот радиосигнала, объединения их в общий радиосигнал и передачу его в среду распространения, а также прием встречного радиосигнала, разделение его на отдельные принимаемые сигналы, их преобразования и выдачу потребителю; ПРС – *промежуточная радиорелейная станция*, обеспечивающая прием, преобразование, усиление или регенерацию и последующую передачу радиосигнала; УРС – *узловая радиорелейная станция*, обеспечивающая разветвление и объединение потоков сообщений, передаваемых по разным РРЛП, на пересечении которых и располагаются УРС. К УРС относятся также станции РРЛП, где осуществляется ввод и вывод телефонных, телевизионных и других сигналов.

На ОРС и УРС всегда имеется технический персонал, который обслуживает не только эти станции, но и осуществляет контроль и управление с помощью специальной системы телеобслуживания ближайшими ПРС. Участок РРЛП (300...500 км) между ОРС (УРС)

делится примерно пополам так, что одна часть ПРС входит в зону телеобслуживания одной ОРС (УРС), а другая часть ПРС обслуживается другой УРС (ОРС).

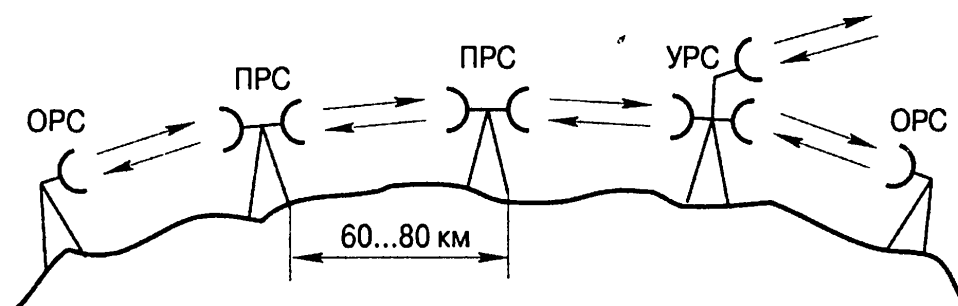


Рис. 1. Радиолинейная линия передачи прямой видимости

Радиорелейная линия передачи, в которой используется рассеяние и отражение радиоволн в нижней области тропосферы при взаимном расположении соседних станций, называется *тропосферной радиорелейной линией передачи* (ТРРЛП) (рис. 2).

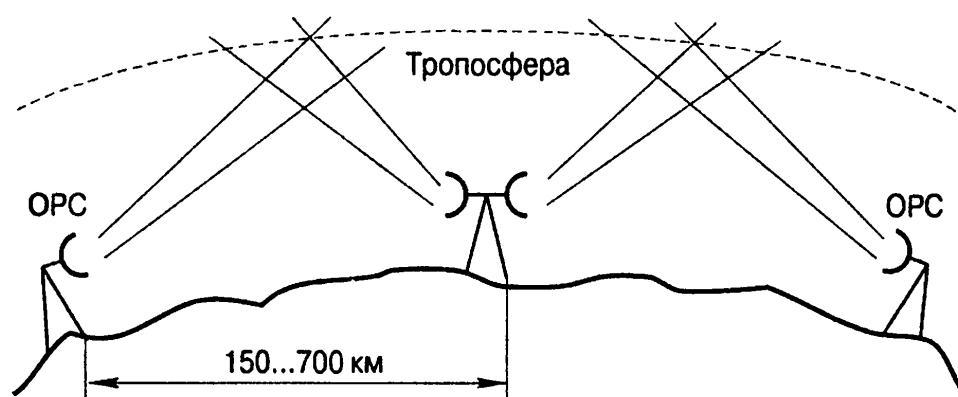


Рис. 2. Тропосферная радиорелейная линия передачи

Радиолиния передачи, в которой используются космические станции, пассивные спутники или иные космические объекты, называется *космической линией передачи*.

Космическая линия передачи, осуществляющая электросвязь между земными станциями этой линии с помощью установленных на искусственных спутниках Земли ретрансляционных станций или пассивных спутников, называется *спутниковой линией передачи* (СЛП) (рис. 3). Здесь приняты такие обозначения: ЗС – земная станция, т.е. станция спутниковой линии передачи, расположенная на земной, водной поверхностях или в основной части земной атмосферы и предназначенная для космической линии передачи; КС – космическая станция, расположенная на объекте, который находится за пределами основной части земной атмосферы; ИСЗ – искусственный спутник Земли.

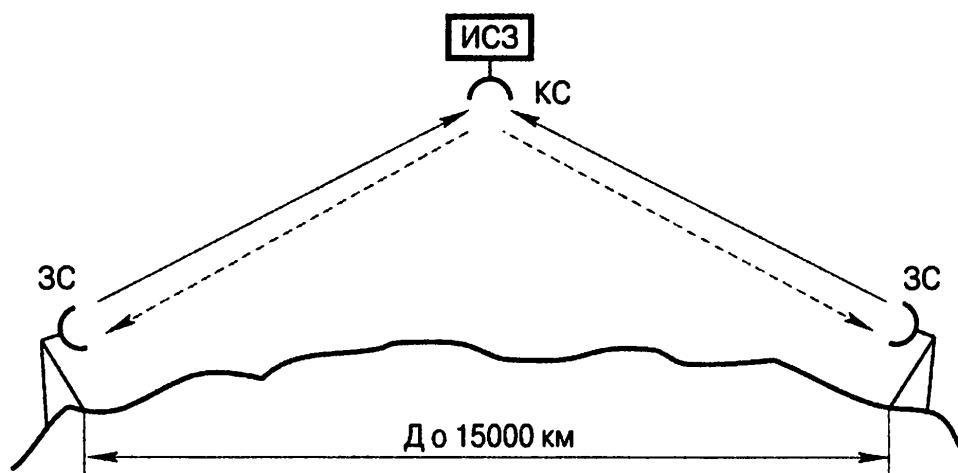


Рис. 3. Спутниковая линия передачи

Под космической линией передачи понимается радиолиния, в которой используются космические станции, пассивные спутники или иные космические объекты.

При использовании одного ИСЗ, расположенного на геостационарной или вытянутой орбите, максимальная дальность радиосвязи СЛП около 15 000 км.

Радиорелейные линии прямой видимости, тропосферные радиорелейные линии и спутниковые линии передачи в большинстве своем работают в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн (в диапазонах УВЧ и СВЧ).

Однако отметим, что имеются малоканальные радиорелейные системы передачи (РРСП), работающие в диапазоне метровых волн (на ОВЧ). Использование этих диапазонов обусловлено, главным образом, возможностью передачи широкополосных сигналов (телевидения, первичных, вторичных, третичных широкополосных каналов и трактов, первичных, вторичных, третичных, четверичных потоков и потоков синхронной цифровой иерархии).

Совокупная ширина полосы частот дециметрового и сантиметрового диапазонов в сотни раз превышает ширину полосы частот всех более длинноволновых диапазонов, вместе взятых. Это позволяет организовать совместную работу большого числа широкополосных РРСП, передавать любые виды сообщений, а также строить многоканальные РРСП с высокой пропускной способностью (до нескольких тысяч каналов тональной частоты или основных цифровых каналов с эквивалентной скоростью передачи, соответствующей нескольким сотням мегабит в секунду).

Широкополосность систем позволяет применять эффективные помехоустойчивые методы передачи сигналов такие, как частотная

модуляция, импульсно-кодовая модуляция, дельта-модуляция и их разновидности, а также использовать эффективные методы кодирования.

Кроме того, в диапазонах УВЧ и СВЧ довольно просто создать антенны с узконаправленным излучением и приемом радиоволн.

Применение таких антенн, имеющих относительно небольшие габариты, позволяет получить энергетический выигрыш по сравнению с ненаправленным излучением (приемом) примерно 30...50 дБ. Это недостижимо для антенн более длинноволновых диапазонов и дает возможность упростить приемо-передающую аппаратуру (уменьшить необходимые мощности передатчиков и чувствительность приемников), а также облегчить электромагнитную совместимость различных систем радиосвязи. Наконец, в этих диапазонах мало влияние промышленных и атмосферных помех.

Для повышения пропускной способности, надежности и экономичности при построении РРСП и спутниковых систем передачи (ССП) широко используется *принцип многоствольной передачи*. При этом на каждой станции устанавливается несколько комплектов оборудования *ствола – линейного тракта*.

На рис. 4 приведена структурная схема четырехствольной радиолинии связи, содержащей три радиосистемы передачи (РСП): аналоговую телефонную, цифровую, аналоговую телевизионную и отдельный резервный ствол.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: АКГ_{пер (пр)} – аналоговое каналообразующее оборудование и оборудование формирования типовых групп каналов (обычно оборудование систем передачи с частотным разделением) тракта передачи (приема); ЦКГ_{пер (пр)} – цифровое каналообразующее оборудование и оборудование формирования типовых цифровых потоков (обычно оборудование цифровых систем передачи на основе импульсно-кодовой модуляции с временным разделением каналов) трактов передачи (приема); СЛ_{пер (пр)} – соединительные линии; ОТФ_{пер (пр)}, ОЦ_{пер (пр)} и ОТВ_{пер (пр)} – оконечное оборудование, соответственно, телефонного, цифрового и телевизионного стволов передачи (приема); каналы ТЧ, ТВ, ЗС, ЗВ – каналы тональной частоты, телевидения, сигналов звукового сопровождения телевидения и сигналов звукового вещания; R (R'), T (T') точки подключения к соединительным линиям различного оборудования.

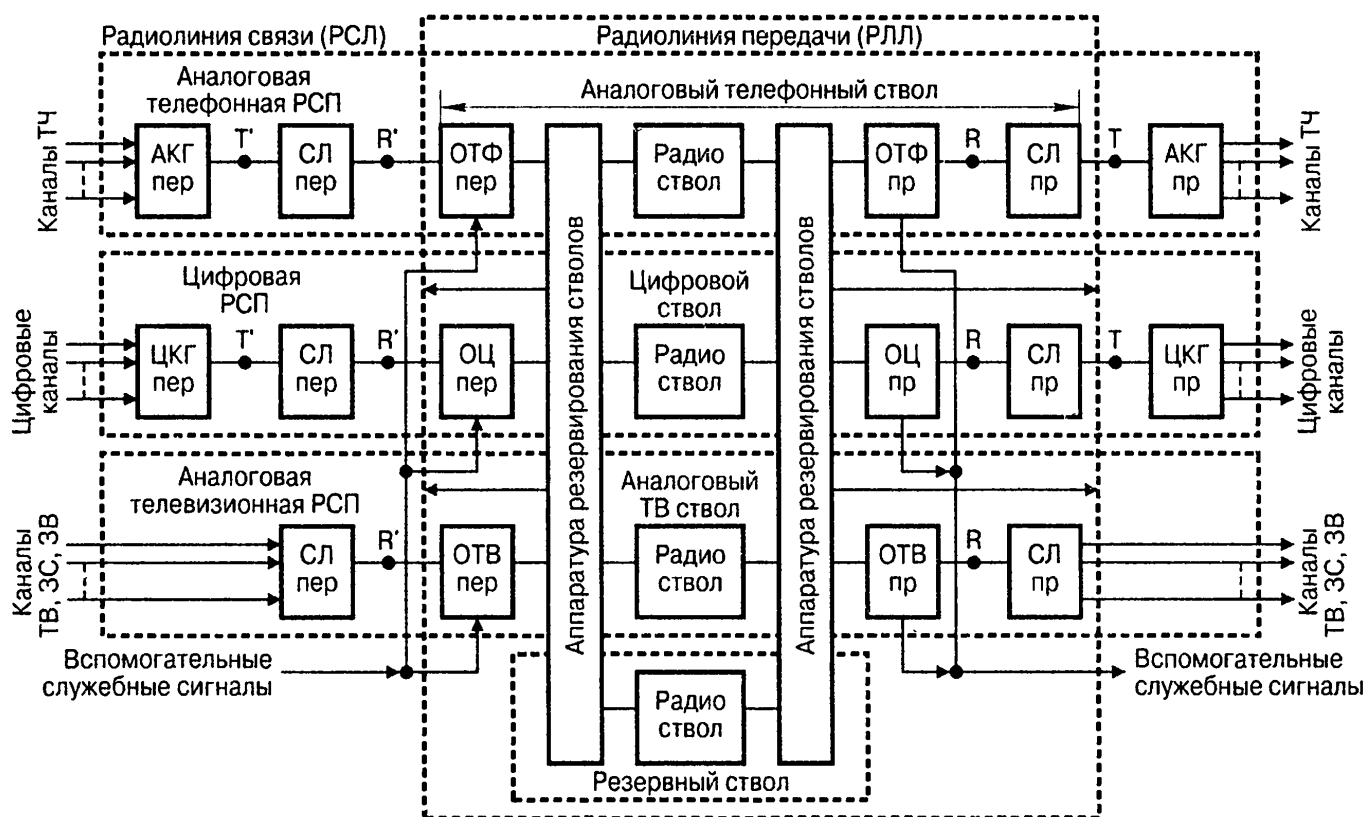


Рис. 4. Структурная схема четырехствольной радиолинии связи

Совокупность нескольких однотипных или разнотипных РСП и отдельных стволов, имеющих общие тракты распространения радиоволн, оконечные и ретрансляционные станции, а также устройства их обслуживания, образуют *многоствольную радиолинию связи (РЛС)*, а совокупность стволов, входящих в состав радиолинии связи, образует *многоствольную радиолинию передачи (РЛП)*. В многоствольных РЛП с резервированием каждый из стволов включает в себя радиоствол, оконечное оборудование и аппаратуру резервирования, обеспечивающую переключение на резервный ствол при выходе из строя основного радиоствола. В некоторых РЛП предусмотрен отдельный ствол служебной связи, содержащий упрощенное оборудование. Использование общих антенн, фидерных трактов, источников электропитания, систем служебной связи и телеобслуживания, сооружений для размещения оборудования значительно повышает экономичность многоствольных РЛП.

Совместная работа нескольких стволов в одной РЛП обеспечивается путем их частотного разделения. При многоствольной работе частоты передачи и приема стволов должны быть выбраны таким образом, чтобы свести к минимуму влияние трактов передачи на тракты приема в отдельных стволах и взаимные помехи между ними. Для этого в многоствольных РЛП применяется группирование

частот передачи и приема, в соответствии с которым частоты передачи всех стволов размещаются в одной половине отведенной полосы частот, а частоты приема – в другой. В стволах РЛП могут использоваться двух- и четырехчастотные планы. На рис. 5, а и б изображены, соответственно, двухчастотный и четырехчастотный планы для трехствольной РЛП (см. рис. 4). Двухчастотные планы обычно применяются на радиорелейных линиях (РРЛ) и спутниковых линиях передачи (СЛП), работающих в сантиметровом диапазоне. На РРЛ дециметрового диапазона, мобильных РРЛ, а также на тропосферных радиорелейных линиях (ТРРЛ) применяются четырехчастотные планы. При этом ТРЛП содержит не более двух стволов. Для сигналов разных стволов используются различные несущие частоты.

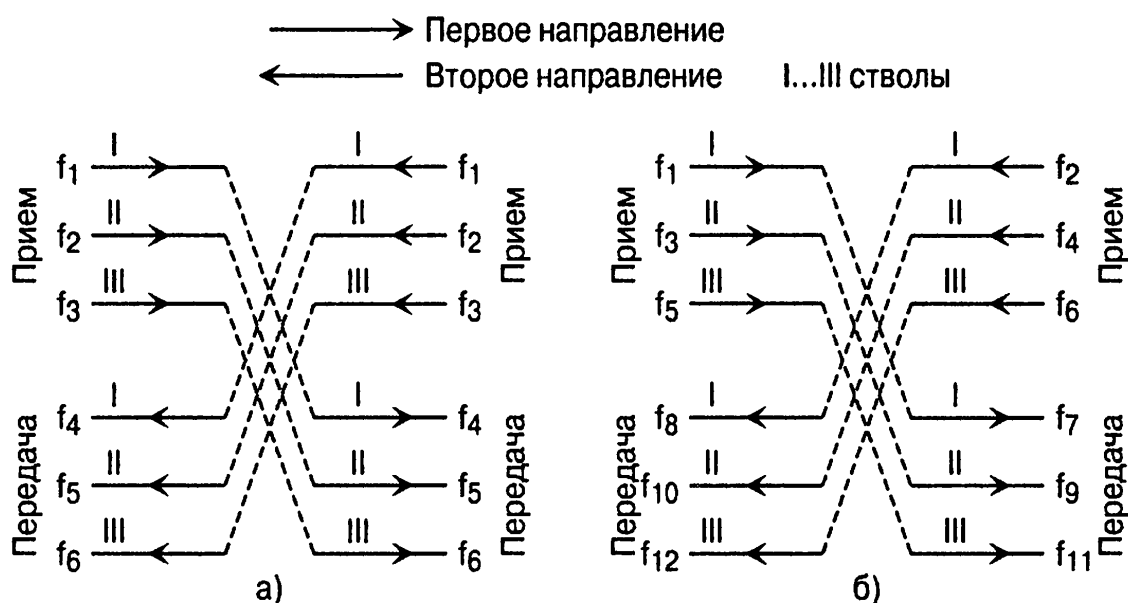


Рис. 5. Двух- и четырехчастотные планы для трехствольной РЛП

Все системы многоствольной РРЛ организуются таким образом, чтобы все стволы работали независимо один от другого, были бы взаимозаменяемы.

К уже рассмотренной классификации РРЛ добавим их классификацию еще по ряду наиболее важных признаков и характеристик.

1. По назначению различают: междугородные магистральные, внутризоновые и местные РРЛ. Магистральные РРЛ обычно являются многоствольными.

2. По диапазону рабочих (несущих) частот РРЛ подразделяются на линии дециметрового и сантиметрового диапазонов. В этих диапазонах в соответствии с Регламентом радиосвязи для организации РРЛ выделены полосы частот, расположенные в области 2, 4,

6, 8, 11 и 13 ГГц. В настоящее время осваивается область частот 18 ГГц и выше. Однако использование столь высоких частот затруднено из-за сильного ослабления энергии радиоволн во время атмосферных осадков.

3. По способу разделения каналов и виду модуляции несущей можно выделить:

а) РРЛ с частотным разделением каналов (ЧРК) и частотной модуляцией (ЧМ) гармонической несущей;

б) РРЛ с временным разделением каналов (ВРК) и аналоговой модуляцией периодической последовательности импульсов, которые затем модулируют несущую стволу;

в) цифровые РРЛ на основе импульсно-кодовой или дельта-модуляций и их разновидностей, цифровые сигналы которых затем модулируют несущую стволу.

4. По принятой в настоящее время классификации РРЛ разделяют на системы большой, средней и малой емкости.

К РРЛ большой емкости принято относить системы, позволяющие организовать в одном стволе 600 и более каналов тональной частоты (КТЧ), что соответствует пропускной способности более 100 Мбит. Стационарные РРЛ большой емкости используются для организации магистральных связей. Если РРЛ позволяет организовать 60...600 КТЧ, то такие системы относятся к РРЛ средней емкости, а если менее 60 КТЧ – РРЛ малой емкости. Пропускная способность РЛ средней и малой емкости равна соответственно 10...100 Мбит/с и менее 10 Мбит/с.

Стационарные РРЛ средней емкости используются для организации зонной связи. Это линии протяженностью до 500...1500 км. Подобные РРЛ в большинстве рассчитаны на передачу телевизионных сигналов и сигналов звукового вещания. Часто эти линии являются многоствольными и ответвляются от магистральных.

РРЛ малой емкости применяются на местных сетях связи и, кроме того, широко используются для организации технологических линий передачи на железнодорожном транспорте, в системе энергоснабжения, в газо- и нефтепроводах и др.

В настоящее время на телекоммуникационных сетях все большее распространение получают цифровые РРЛ с большой пропускной способностью на основе синхронной цифровой иерархии.

Виды модуляции, применяемые в радиорелейных и спутниковых системах передачи

Технико-экономические показатели радиорелейных (РРСП) и спутниковых (ССП) систем передачи и особенности построения оконечного оборудования ствола, приемопередающей аппаратуры во многом определяются выбранным видом модуляции высокочастотной несущей многоканальным (групповым) сигналом. Последний может быть сформирован:

1) с помощью каналообразующего оборудования и оборудования формирования групп каналов и трактов аппаратуры аналоговых систем передачи с частотным разделением каналов (СП с ЧРК) с помощью однополосной амплитудной модуляции;

2) с использованием каналообразующего оборудования аналоговых систем передачи с временным разделением каналов (СП с ВРК) с помощью фазоимпульсной модуляции;

3) с помощью каналообразующего оборудования и оборудования формирования типовых потоков цифровых систем передачи (ЦСП) с использованием импульсно-кодовой модуляции, дельта-модуляции и их разновидностей.

В системах передачи сигналов телевидения полный телевизионный сигнал формируется с помощью оборудования телевизионного ствола на оконечных радиорелейных или земных спутниковых станциях и затем модулирует высокочастотную несущую.

Формирование высокочастотной несущей или высокочастотного радиосигнала осуществляется в оконечном оборудовании ствола.

Основными показателями, характеризующими виды модуляции в РРСП и СП (далее *радиосистемы передачи* – РСП), являются помехоустойчивость в отношении тепловых шумов, эффективность использования занимаемой полосы частот, степень подверженности передаваемых сигналов влиянию неидеальности характеристик ствола – *линейного тракта*, сложность построения приемопередающей аппаратуры и соответствующих модуляторов и демодуляторов (модемов).

Частотная модуляция в аналоговых РСП. В аналоговых СП с ЧРК и телевидения в основном применяется *частотная модуляция* (ЧМ).

При ЧМ основной причиной нелинейных искажений сигналов в радиоканале, приводящих к взаимным влияниям между каналами в СП с ЧРК, является нелинейность ФЧХ, в то время как при обычной АМ и АМ с передачей одной боковой полосы (АМ-ОБП) частот основ-

ной причиной нелинейных искажений является нелинейность АХ. Так как компенсация нелинейности ФЧХ выполняется более простыми методами, чем компенсация нелинейности АХ, то приемопередающая аппаратура при использовании ЧМ в РСР оказывается более простой, чем при АМ и АМ-ОБП. Кроме того, ЧМ обладает большей помехоустойчивостью в отношении теплового шума и внешних помех по сравнению с АМ и АМ-ОБП, если индекс ЧМ не слишком мал (в малоканальных РСР с числом каналов ТЧ не более 120).

При ЧМ мгновенная частота $f(t)$ модулированного радиосигнала $u_{чм}(t)$ изменяется в соответствии с модулирующим сигналом $c(t)$:

$$f(t) = f_0 + \Delta f(t) = f_0 + K_{чм} c(t), \quad (1)$$

где f_0 – частота несущей; $\Delta f(t)$ – отклонение частоты под воздействием модулирующего сигнала (*девиация частоты*); $K_{чм}$ – крутизна модуляционной характеристики частотного модулятора, Гц/В.

Общее выражение для ЧМ радиосигнала имеет вид

$$u_{чм}(t) = U_0 \cos \left[\omega_0 t + 2\pi K_{чм} \int_0^t c(\tau) d\tau \right], \quad (2)$$

где U_0 – постоянная амплитуда радиосигнала.

Основными характеристиками ЧМ радиосигнала являются: девиация частоты, индекс частотной модуляции и ширина спектра, необходимая для неискаженной передачи. Поскольку основной нагрузкой радиостолов являются групповые телефонные сигналы СП с ЧРК, то и рассмотрим характеристики ЧМ радиосигнала для этого вида загрузки.

Эффективная девиация частоты $\Delta f_{эф}$ соответствует средней мощности $W_{ср}$ группового сигнала и эффективной девиации частоты на канал Δf_k (соответствующей измерительному уровню сигнала в одном канале ТЧ) и определяется по формулам

$$\Delta f_{эф} = 0,224 \Delta f_k \sqrt{N} \quad \text{для } N > 240 \quad (3)$$

и
$$\Delta f_{эф} = 0,89 \Delta f_k \sqrt{N} \quad \text{для } 12 \leq N \leq 240, \quad (4)$$

где N – число каналов соответствующей СП с ЧРК. Величина Δf_k обычно нормируется и в зависимости от N может изменяться в пределах 35...200 кГц.

Эффективное значение индекса ЧМ $M_{эф}$ определяется отношением эффективной девиации частоты к верхней частоте $F_в$ спектра группового телефонного сигнала, т. е.,

$$M_{\text{эф}} = \Delta f_{\text{эф}}/F_{\text{в}}. \tag{5}$$

Для характеристики ЧМ радиосигнала используются также понятия квазипиковых девиации частоты и индекса модуляции, соответствующие квазипиковой мощности группового сигнала, превышаемой с вероятностью не более 10^{-3} и соответственно равным:

$$\Delta f_{\text{пик}} = 3,33\Delta f_{\text{эф}} = 0,746\Delta f_{\text{к}} N^{0.5} \text{ и } M_{\text{пик}} = 3,33 M_{\text{эф}}. \tag{6}$$

Важной характеристикой ЧМ радиосигнала является ширина его спектра, определяющая необходимую полосу пропускания радиоканала $\Pi_{\text{чм}}$. При передаче сигналов многоканальной телефонии минимальная необходимая полоса частот должна определяться исходя из минимально допустимого уровня переходных помех, возникающих из-за ограничения спектра

$$\Pi_{\text{чм}} = 2 F_{\text{в}} q_{\text{чм}}, \tag{7}$$

где $q_{\text{чм}}$ -- параметр, зависящий от уровня переходных помех.

На рис. 6 приведены значения $q_{\text{чм}}$ в зависимости от $M_{\text{эф}}$ для двух значений мощности переходных помех в верхнем (по спектру) телефонном канале: $W_{\text{пп}} = 1 \text{ пВт}$ и $W_{\text{пп}} = 10 \text{ пВт}$.

На практике для приближенной оценки необходимой полосы частот часто пользуются следующей эмпирической формулой Карсона

$$\Pi_{\text{чмк}} = 2 (F_{\text{в}} + \Delta f_{\text{пик}}) = 2F_{\text{в}} (1 + M_{\text{пик}}). \tag{8}$$

Значения основных параметров ЧМ радиосигнала РСП при передаче сигналов многоканальной телефонии для различной емкости группового сигнала приведены в табл.1.

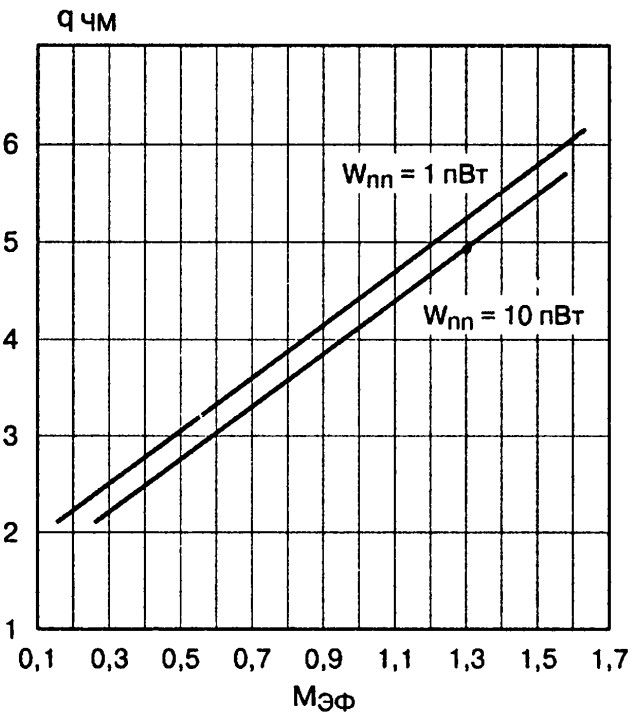


Рис. 6. Зависимость параметров $q_{\text{чм}}$ от эффективного значения индекса ЧМ $M_{\text{эф}}$

Т а б л и ц а 1

Параметры ЧМ радиосигнала	Число каналов тональной частоты					
	12	24	60	120	240	300
Δf_k , МГц	0,05	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2
$F_{\text{в}}$, МГц	0,06	0,108	0,252	0,552	1,032	1,3
$\Delta f_{\text{эф}}$, МГц	0,073	0,084	0,404	0,464	0,533	0,776
$\Delta f_{\text{пук}}$, МГц	0,38	0,394	1,647	1,745	1,871	2,584
$M_{\text{эфф}}$	1,217	0,778	1,603	0,841	0,516	0,597
$M_{\text{пук}}$	6,333	3,648	6,536	3,161	1,813	1,988
$\Pi_{\text{чм}}$, МГц, при $W_{\text{пп}} = 1$ пВт	0,61	0,84	3,05	4,33	6,4	8,5
$\Pi_{\text{чм}}$, МГц, при $W_{\text{пп}} = 10$ пВт	0,55	0,78	2,72	3,94	5,57	7,64
$\Pi_{\text{чм, к}}$, МГц	0,88	1,0	3,8	4,6	5,81	7,77
Параметры ЧМ радиосигнала	Число каналов тональной частоты					
	360	600	720	1020	1320	1920
Δf_k , МГц	0,2	0,2	0,2	0,2	0,14	0,14
$F_{\text{в}}$, МГц	1,54	2,596	3,34	4,636	5,932	8,524
$\Delta f_{\text{эф}}$, МГц	0,85	1,097	1,202	1,43	1,139	1,374
$\Delta f_{\text{пук}}$, МГц	2,83	3,653	4,003	4,762	3,793	4,575
$M_{\text{эфф}}$	0,552	0,423	0,36	0,308	0,192	0,161
$M_{\text{пук}}$	1,838	1,407	1,199	1,027	0,639	0,537
$\Pi_{\text{чм}}$, МГц, при $W_{\text{пп}} = 1$ пВт	9,67	14,75	17,57	23,37	25,51	35,8
$\Pi_{\text{чм}}$, МГц, при $W_{\text{пп}} = 10$ пВт	8,72	13,19	15,9	21,14	23,73	32,9
$\Pi_{\text{чм, к}}$, МГц	8,74	12,5	14,69	18,8	19,45	26,2

Как видно из табл. 1, в большинстве случаев применяется частотная модуляция с $M_{\text{эф}}$ не более 1.

При передаче сигналов телевидения характеристики ЧМ радиосигнала зависят от соответствующих параметров сигналов изображения и звукового сопровождения. Для сигнала изображения верхняя частота спектра $F_{\text{в}}$, размах сигнала, а, следовательно, максимальная девиация частоты Δf_k известны: $F_{\text{в}} = 6$ МГц, $\Delta f_k = 4$ МГц.

Индекс ЧМ равен $M_u = \Delta f_k / F_\theta = 4/6 = 0,67$, а необходимая полоса частот, определенная по формуле Карсона, равна $\Pi_{\text{чм те}} = 2(F_\theta + \Delta f_k) = 2(6 + 4) = 20$ МГц или $\Pi_{\text{чм те}} = 2F_\theta (1 + M_u) = 2 \times 6(1 + 0,67) = 20$ МГц.

Если в одном стволе передаются сигналы изображения, звукового сопровождения и звукового вещания с использованием частотного разделения, то верхняя частота модулирующего сигнала, эффективная девиация частоты и необходимая полоса частот возрастут.

Манипуляция в цифровых РСП. Модуляцию в цифровых РСП принято называть *манипуляцией*. В зависимости от числа уровней модулирующего (манипулирующего) сигнала различают *двухуровневую* (двоичную) и *многоуровневую* манипуляцию.

Для многих видов манипуляций, применяемых в цифровых радиорелейных системах передачи, предполагается использование манипулирующих сигналов, отличающихся по структуре от исходного передаваемого двоичного сигнала. Формирование указанных манипулирующих сигналов осуществляется специальным кодирующим устройством – *кодером модулятора*. При демодуляции радиосигнала на приемном конце с помощью *декодера демодулятора* производится обратное преобразование, в результате чего формируется исходный двоичный сигнал. Декодированию, естественно, предшествует регенерация сигнала. Совокупность кодера модулятора и декодера демодулятора образует *модем для цифровой РСП*, обобщенная схема которого приведена на рис. 7.

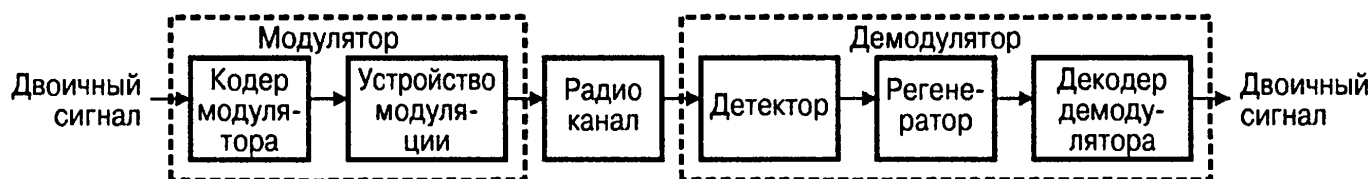


Рис. 7. Функциональная схема модема цифровой РСП

В современных цифровых радиорелейных и спутниковых системах передачи применяются амплитудная, фазовая, частотная и комбинированная амплитудно-фазовая манипуляции.

Амплитудная манипуляция – АМ. Хотя этот вид манипуляции в современной цифровой радиосвязи встречается весьма редко, он еще служит удобной основой для введения некоторых основных понятий. В настоящее время находит применение лишь двоичная АМ.

Манипулирующим (модулирующим) сигналом в цифровых системах радиосвязи является случайная последовательность «1» (токо-

вая *посылка*) и «0» (*пауза* – бестоковая посылка). Радиосигнал с АМ может быть представлен в следующей несколько упрощенной форме:

$$s_{AM}(t) = \begin{cases} u_n(t) \cos \omega_n t, & \text{посылка – «1»}, \\ 0, & \text{пауза – «0»}. \end{cases} \quad (9)$$

где $u_n(t)$ – модулирующая случайная двоичная последовательность *видеоимпульсов* (часто, не обязательно, прямоугольной формы), ω_n – частота несущего радиочастотного колебания.

Пример радиосигнала для случайной двоичной последовательности прямоугольных видеоимпульсов показан на рис. 8, где T – длительность элемента исходного двоичного сигнала.

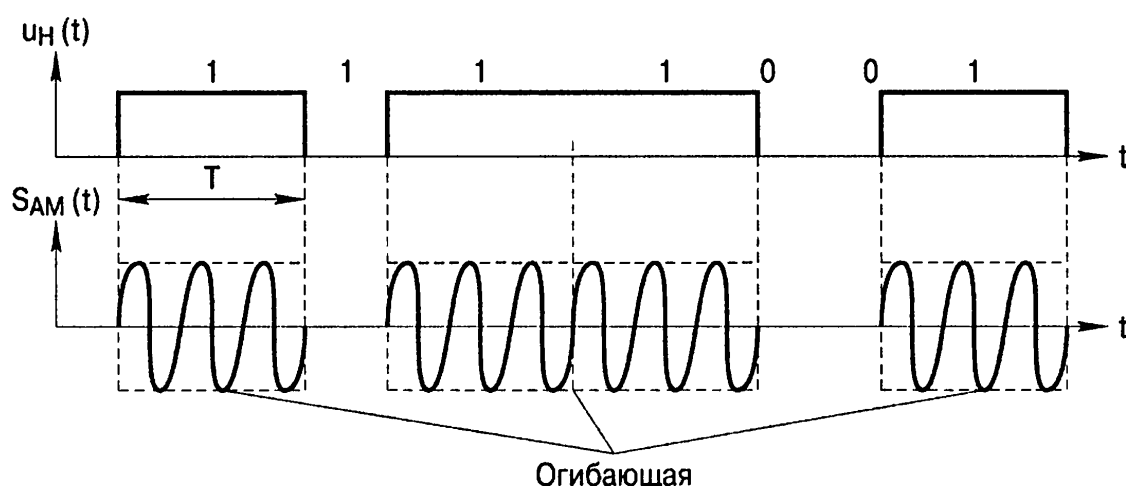


Рис. 8. Форма сигналов при амплитудной модуляции

Для сигналов АМ самым распространенным является некогерентный прием, включающий в себя измерение амплитуды *огибающей* на выходе узкополосного фильтра. Модуляция и демодуляция сигналов в системах с двоичной АМ не требует специального кодирования и декодирования.

Минимальная полоса частот Π_{AM} , необходимая для передачи АМ радиосигнала, численно равна скорости передачи цифровой информации B (частоте следования передаваемых элементов исходного двоичного сигнала)

$$\Pi_{AM} = B = 1/T. \quad (10)$$

Эффективность использования полосы частот характеризуется максимальной удельной скоростью передачи при двоичной АМ и равна $S_{AM} = B/\Pi_{AM}$.

Фазовая манипуляция – ФМ. При ФМ манипулируемым параметром высокочастотной несущей радиоимпульса является ее фаза

$\omega_n t$. В современных РСП применяются двоичная, четырехуровневая и восьмиуровневая ФМ. При демодуляции фаза ФМ радиосигнала сравнивается с фазой восстановленного на приемном конце опорного колебания (несущей). Из-за случайных искажений радиосигнала имеет место неопределенность фазы восстановленной несущей, что является причиной, так называемой *обратной работы*, при которой двоичные посылки принимаются «в негативе». Для устранения влияния неопределенности фазы применяется разностное кодирование фазы передаваемых радиоимпульсов. Фазовую манипуляцию с разностным кодированием фазы называют *фазоразностной* или *относительной фазовой манипуляцией* (ОФМ). В цифровых радиорелейных системах передачи с ОФМ при передаче информации кодируется не сама фаза радиосигнала, а разность фаз (фазовый сдвиг) двух соседних радиоимпульсов.

Структура ОФМ радиосигнала для двухуровневой ФМ представлена на рис. 9.

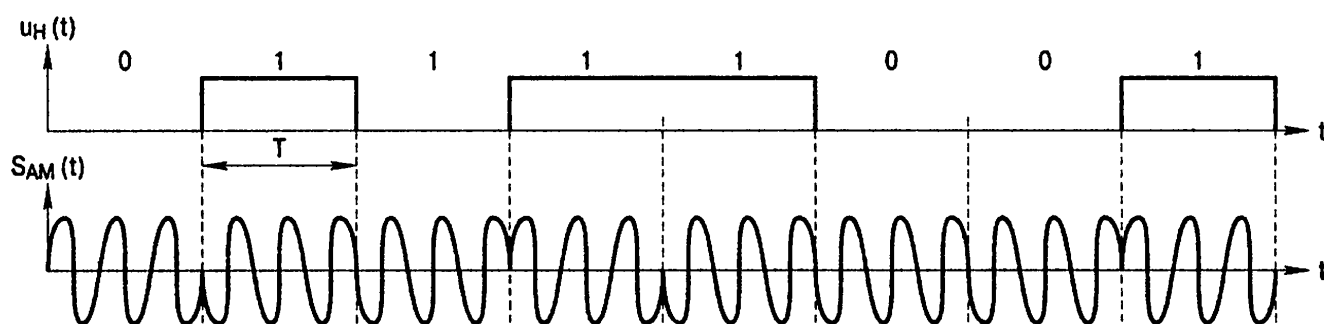


Рис. 9. Структура двухуровневого ОФМ радиосигнала

Из рис. 9 следует, что фаза несущего колебания изменяется относительно ее предыдущего состояния на π при передаче «1» и остается неизменной при передаче «0».

Применяются два способа демодуляции ОФМ радиосигналов. В первом случае вначале восстанавливается несущая и когерентно детектируется ОФМ радиосигнала, затем разностно (дифференциально) декодируются принимаемые сигналы. При таком способе демодуляции операции детектирования и декодирования разделены и выполняются последовательно. Второй способ предполагает дифференциально-когерентное (автокорреляционное) детектирование ОФМ радиосигнала, при котором в качестве опорного колебания используется предшествующий радиоимпульс. При этом операции детектирования и декодирования совмещены.

Ширина спектра ОФМ радиосигнала зависит от скорости передачи информации B и числа уровней манипуляции M . Необходимая для ОФМ радиосигнала минимальная полоса пропускания равна.

$$П_{ОФМ} = B / \log_2 M. \quad (11)$$

Обычно полосу пропускания выбирают несколько большей, т.е. $П_{ОФМ} = (1,1...1,2) B / \log_2 M$. Из (11) следует, что при увеличении числа уровней манипуляции полоса частот, необходимая для передачи ОФМ радиосигнала, уменьшается. Так, при ОФМ–4 ($M = 4$) полоса частот вдвое меньше, чем при ОФМ при одинаковой скорости передачи информации. Максимальная эффективность использования полосы частот при ОФМ равна $S_{ОФМ} = B/П_{ОФМ} = \log_2 M$.

Частотная манипуляция – ЧМ. При ЧМ модулируемым (манипулируемым) параметром является частота высокочастотного заполнения радиоимпульса. В РСП применяются двоичная, трехуровневая (при использовании квазитроичных кодов), четырехуровневая и восьмиуровневая ЧМ. Пример простейшей двухуровневой ЧМ показан на рис. 10.

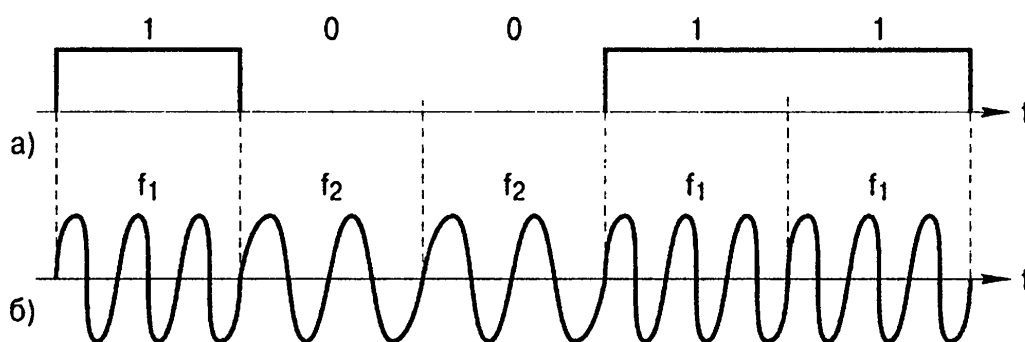


Рис. 10. Форма сигнала при частотной манипуляции:
а – манипулирующий сигнал; б – частотно-манипулирующий
сигнал – радиосигнал ЧМ

В большинстве РСП с частотной манипуляцией используются модулирующие колебания прямоугольной формы, причем амплитуды несущих остаются постоянными. Для этого случая радиосигнал имеет вид

$$s_{ЧМ} = \begin{cases} A \cos 2\pi f_1 t, & \text{посылка,} \\ A \cos 2\pi f_2 t, & \text{пауза.} \end{cases} \quad (12)$$

Полоса частот необходимая для передачи ЧМ радиосигнала $П_{ЧМ}$, и эффективность ее использования $S_{ЧМ}$ зависят от скорости передачи информации B , числа уровней M и максимальной девиации частоты Δf_M и равны, соответственно

$$P_{\text{ЧМ}} = B \log_2 M + 2 \Delta f_M; \quad (13)$$

$$S_{\text{ЧМ}} = B/P_{\text{ЧМ}} = \log_2 M / (1 + 2 M_M), \quad (14)$$

где Δf_M – максимальная девиация частоты, зависящая от M , а $M_M = [\Delta f_M \log_2 M] / B$ – максимальный индекс ЧМ.

При демодуляции ЧМ радиосигналов применяется некогерентное детектирование, причем обычно используются те же частотные детекторы, что и в аналоговых РСП с ЧМ.

Большой интерес представляет применение *частотной манипуляции с минимальным сдвигом* (ЧММС), являющейся частным случаем манипуляции с непрерывной фазой, при которой фаза манипулированного радиосигнала изменяется непрерывно и не имеет скачков на границах радиоимпульсов. При ЧММС для передачи «1» и «-1», как при обычной двоичной ЧМ, используются две частоты, однако разнос между ними выбирается так, чтобы за время длительности элемента T фаза манипулированного радиосигнала изменялась ровно на $\pi/2$. При этом если передается «1», то частота радиосигнала $f = f_0 + 1/4 T$, так что в момент окончания радиоимпульса его фаза получает сдвиг $\pi/2$. При передаче «-1» частота радиоимпульса $f = f_0 - 1/4 T$, в результате чего фаза радиоимпульса в момент его окончания приобретает сдвиг $\pi/2$. Таким образом, ЧММС весьма похожа на ОФМ, при которой фаза манипулированного радиосигнала также изменяется на $\pi/2$ в течение каждого интервала T . Отличие состоит лишь в том, что при ЧММС фаза изменяется не скачкообразно, а непрерывно.

При демодуляции ЧММС радиосигналов используется когерентное детектирование. Помехоустойчивость ЧММС близка к помехоустойчивости двоичной ОФМ, а эффективность использования полосы частот примерно такая же, как при четырехуровневой ОФМ.

Амплитудно-фазовая манипуляция – АФМ. При АФМ манипулируемым (представляющим) параметром является комплексная амплитуда радиосигнала. Формирование M -уровневого АФМ сигнала может быть реализовано путем $M^{0.5}$ -уровневой балансной амплитудной манипуляции *синфазной* и *квадратурной* составляющих сигнала одной частоты и сложения полученных АМ радиосигналов. По этой причине АФМ часто называют *квадратурной амплитудной манипуляцией* (КАМ).

Минимальная необходимая полоса частот $P_{\text{АФМ}}$ и максимальная эффективность использования полосы $S_{\text{АФМ}}$ определяются так же, как в случае многоуровневой ФМ (ОФМ).

Сравнительная оценка качественных показателей различных видов манипуляции, применяемых в цифровых РСП, приведена в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Вид манипуляции	Число уровней манипуляции	Способ детектирования принимаемых сигналов	Отношение сигнал-шум на входе приемника, дБ (при $p_{\text{ощ}} = 10^{-6}$)	Максимальная эффективность использования полосы частот, бит/с/Гц
АМ	2	Некогерентный	17,2	1
	2	Дифференциально-когерентный	11,2	1
ОФМ	4	То же	12,8	2
	2	Когерентный	10,8	1
	4	То же	10,8	2
	8	«	14,6	3
ЧМ	3	Некогерентный	15,9	1
	4	То же	20,1	2
	8	«	25,5	3
ЧММС	2	Когерентный	10,8	2
АФМ	16	То же	17,0	4

Интересно ориентировочно сравнить эффективность использования полосы частот цифровых и аналоговых РСП. Если в цифровых системах используется ИКМ со скоростью передачи основного цифрового канала 64 кбит/с, то в системах с АМ и ОФМ–2 (двухуровневая) максимальная емкость ствола с полосой 40 МГц составляет 625 каналов тональной частоты (КТЧ), с ОФМ–4 (четырёхуровневая) и ЧММС – 1250 КТЧ, с ОФМ-8 – 1875 КТЧ, наконец, при использовании АФМ-16 – 2500 КТЧ. Максимальная достигнутая в настоящее время емкость аналоговых систем с ЧМ при той же полосе составляет 3600 КТЧ. Таким образом, можно считать, что эффективность использования полосы частот в наиболее совершенных цифровых РСП приближается к эффективности аналоговых систем с ЧМ. В РСП с малой и средней пропускной способностью эффективность использования полосы частот в цифровых системах не ниже, чем в аналоговых системах с ЧМ.

Среди рассмотренных видов манипуляций наибольшей простотой реализации отличаются двоичные АМ и ЧМ, а также трехуров-

невая и четырехуровневая ЧМ при использовании частотного дискриминатора для демодуляции сигналов. Сравнительно просто реализуются ОФМ–2 и ОФМ–4 при дифференциально-когерентном детектировании сигналов, основные сложности связаны с необходимостью восстановления опорного колебания на приемном конце. Наибольшие трудности возникают при использовании ОФМ-8 и АФМ-16, причем в последнем случае возникают дополнительные трудности, связанные с необходимостью обеспечения высокой линейности амплитудной характеристики всего линейного тракта.

Двоичные некогерентные АМ и ЧМ применяются в РСП с малой пропускной способностью, а также в перевозимых РРСП, двоичная ОФМ – в РСП с малой и средней пропускной способностью. Широкое применение в РСП с различной пропускной способностью нашли ОФМ–4. Наряду с ОФМ–4 АФМ-16 становится основным видом манипуляции для цифровых РСП с высокой пропускной способностью. Для передачи цифровых сигналов в аналоговых РСП применяются двоичная и многоуровневая ЧМ с числом уровней $M = 3, 4$ и 8 при использовании аналогового частотного детектора для демодуляции.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите типы станций радиорелейной линии прямой видимости и укажите их назначение.
2. Что такое ствол радиорелейной линии передачи? Его состав.
3. Назовите основные признаки классификации радиорелейных линий передачи.
4. Какое явление используется в тропосферных радиорелейных линиях.
5. Виды модуляции, используемые при построении радиорелейных и спутниковых систем передачи. Их достоинства, недостатки и область применения.
6. Виды манипуляций в цифровых радиорелейных системах передачи, их достоинства и недостатки.
7. Назовите основные элементы модема цифровой радиорелейной системы передачи.
8. Сущность амплитудно-фазовой манипуляции.
9. Назовите значения промежуточной частоты в радиорелейных и спутниковых системах передачи.
10. Почему в качестве промежуточной ступени модуляции в радиорелейных и спутниковых системах передачи применяется частотная модуляция.

11. Назовите основные параметры и характеристики ЧМ радиосигнала и поясните их физическую сущность.
12. Как организуется двусторонняя передача сигналов в одном высокочастотном стволе радиорелейной системы передачи?
13. Перечислите достоинства и недостатки двух- и четырехчастотного распределения.
14. Назовите достоинства многоствольной радиорелейной системы передачи и способы ее организации.
15. Назовите основные элементы структурной схемы четырехствольной радиолинии связи и укажите их назначение.