Лекция 14

Цифровые радиорелейные линии

Цифровые системы передачи (ЦСП) принято строить в соответствии с ***иерархическим принципом***.

Согласно Рекомендациям ITU-T G-701 **цифровой иерархией** называют последовательное группообразование, упорядоченное в соответствии со способностью объединять на одном уровне определенное количество цифровых сигналов нижнего уровня в один поток так, чтобы потом этот сигнал вместе с другими цифровыми сигналами такой же скорости мог быть объединен в цифровой сигнал более высокого уровня.

Основные стандарты передачи цифровых сигналов

- Плезиохронная цифровая иерархия Plesiochronous Digital Hierarchy (**PDH**)
- Синхронная цифровая иерархия Synchronous Digital Hierarchy (**SDH**)

Скорости цифровых потоков PDH и SDH

Скорости цифровых потоков PDH

Уровень иерархии	Обозначение	Скорость, Мбит/с	Количество каналов	Количество трактов	Рекомендации ITU-T
0	EO	0,064	1		0.711
1	E1	2,048	30-31		0.704
2	E2	8,448	120	4×E1	0.742
3	E3	34,368	480	4×E2, I6×E1	0.751
4	E4	139,264	1920	4×E3	0.751
5	E5	565,148	7800	4×E4	0.954

Скорости цифровых потоков SDH

SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Скорость, Мбит/с	155,520	622,080	2488,320	9953,280	39813,120

Способы построения цифровых РРЛ

- передача информации в цифровой форме по телефонным или телевизионным стволам аналоговых РРЛ одновременно с аналоговым телевизионным или многоканальным телефонным сообщением
- организация передачи только цифрового потока в стволе аналоговой РРЛ
- организация цифровых РРС, по которым передается только цифровая информация; по таким системам могут передаваться цифровые потоки от ЦСП любой ступени иерархии; в этом случае используются различные способы модуляции: амплитудная, частотная, фазовая (в том числе многопозиционная)

В настоящее время большинство магистральных РРЛ оснащено современным оборудованием синхронной цифровой иерархии. Но при этом в действующих сетях связи еще имеется большое количество РРЛ с ЧРК-ЧМ. Поэтому **целесообразным является** внедрение цифровых методов передачи информации путем **создания цифровых линейных трактов на базе аналоговых РРЛ**.

Предпочтительность использования **ПЕРВОГО ПОДХОДА** к организации ЦРРЛ обусловлена рядом **причин**:

незначительный объем арендуемых цифровых каналов

недостаточный пока объем ввода в действие оборудования цифровой коммутации

организация передачи ТВ сигналов на сетях магистральной и внутризоновой связи только в аналоговом виде

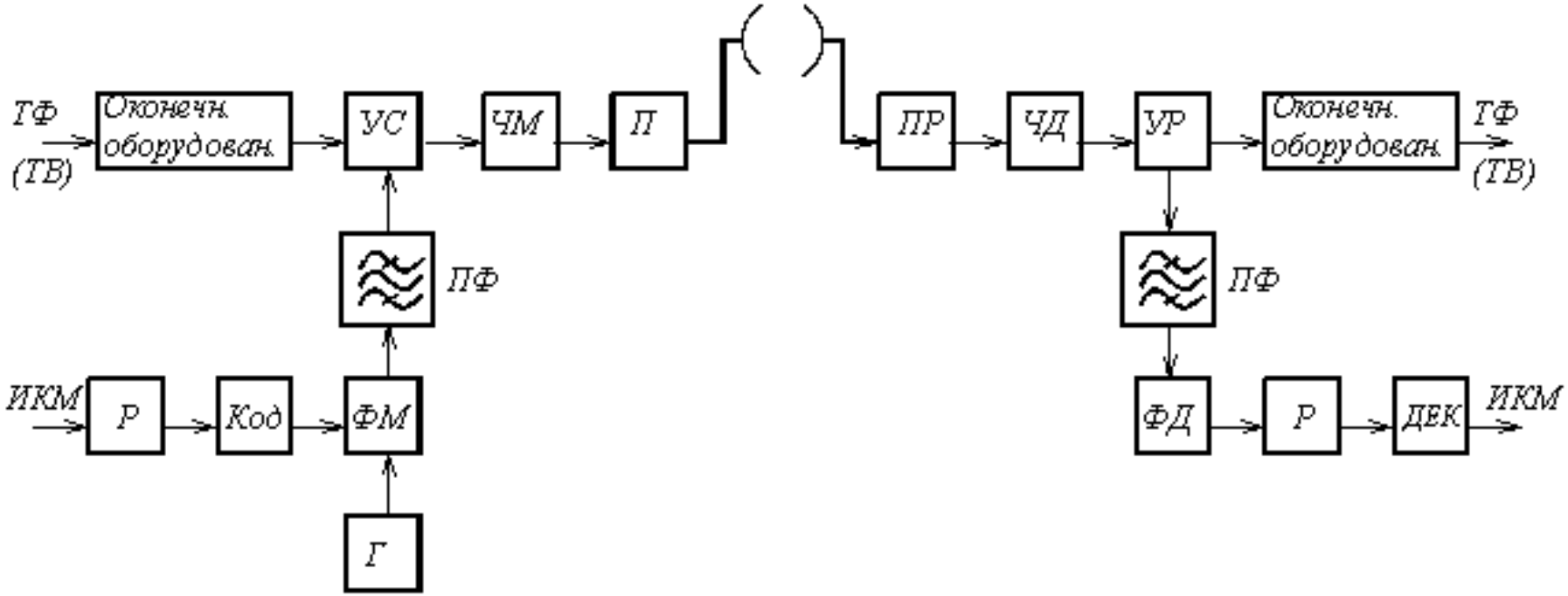
возможность в кратчайшие сроки при минимальных затратах образовывать на магистральных и внутризоновых линиях цифровые каналы передачи различной информации качественные показатели которых выше, чем у аналоговых

возможность создания на внутризоновых линиях смешанных аналогово-цифровых систем, в которых сигналы телефонии передаются в цифровом виде, а ТВ сигналы – в аналоговом с сохранением единой системы управления РРЛ.

Основное **преимущество** данного подхода в том, что можно организовывать цифровые тракты разных уровней на основе действующих аналоговых РРЛ путем установки только ***дополнительного оконечного цифрового оборудования***. При этом можно полностью сохранить системы управления аналоговых РРЛ.

Обобщенная структурная схема аналогово-цифрового ствола

При создании цифровых линейных трактов на базе существующих аналоговых РРЛ основное внимание уделяется максимальному использованию их оборудования, включая частотные модемы и систему управления, поскольку это позволяет передавать цифровые сигналы наиболее простыми средствами.

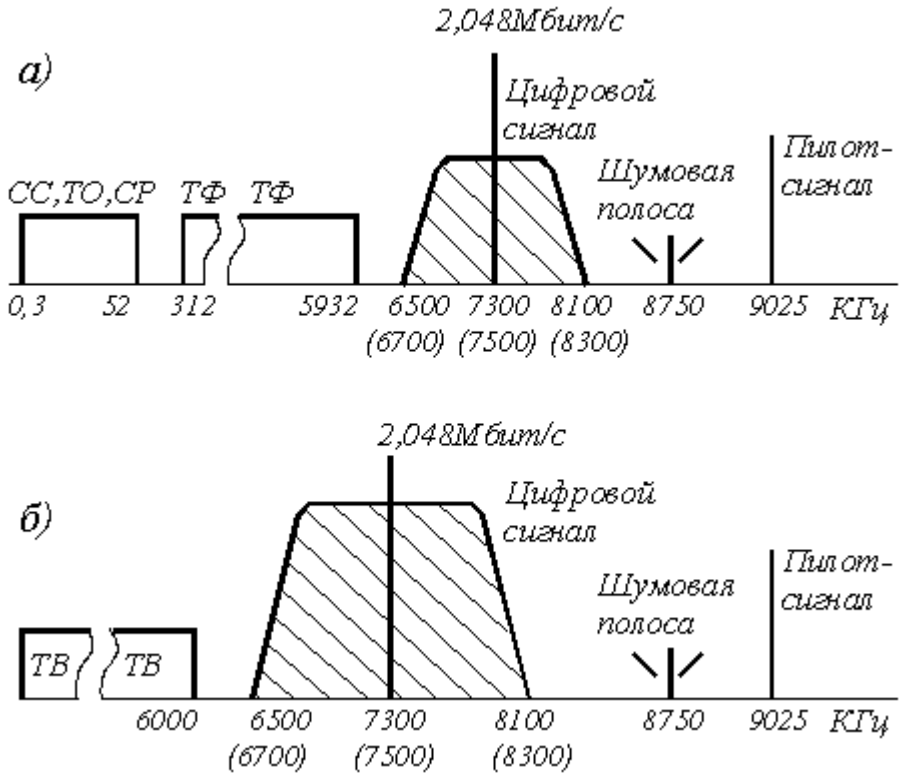


УС, УР – устройства сложения и разделения сигналов;
ЧМ, ЧД – частотные модулятор и демодулятор;
П, ПР – передатчик и приемник;
ПФ – полосовой фильтр;
Код, Дек – кодер и декодер цифрового сигнала;
ФМ, ФД – фазовый манипулятор и демодулятор.

Дополнительное цифровое оборудование аналоговых РРЛ

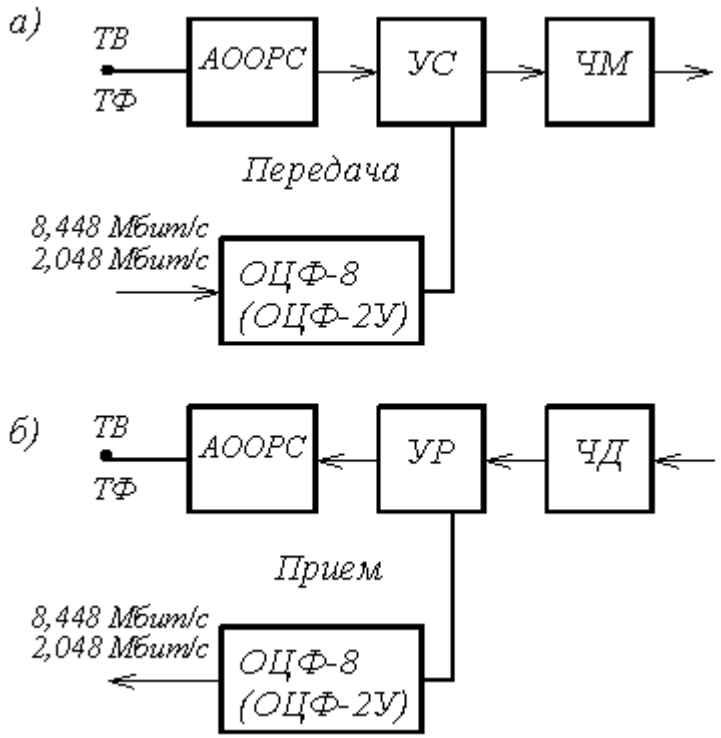
В качестве дополнительного цифрового оборудования зачастую используется серийно выпускаемая аппаратура **ОЦФ-2У** или **ОЦФ-8**.

ОЦФ-2У позволяет передавать цифровые сигналы со скоростью 2,048 Мбит/с в основной полосе частот одного радиорелейного ствола совместно с телевизионным сигналом (без звуковых поднесущих) или с сигналом многоканальной телефонии (до 1320 каналов ТЧ). В потоке 2,048 Мбит/с могут быть организованны каналы цифрового вещания (до шести каналов высшего класса при использовании аппаратуры ИКМ-В6/12); 30 основных каналов (ОЦК); каналы передачи газетных полос, видеоконференцсвязи и т. д. В аппаратуре ОЦФ-2У передача цифровых сигналов организованна на поднесущей 7,5 или 7,3 МГц методом офсетной фазовой манипуляции (ФМ) при ширине полосы, занимаемой ФМ сигналом, около 1,6 МГц. Фазоманипулированный сигнал, передаваемый со скоростью 2,048 Мбит/с, располагается на свободном участке спектра основной полосы частот между аналоговым сигналом и пилот-сигналом системы резервирования оборудования аналоговых РРЛ. Аппаратура ОЦФ-2У стыкуется с каналообразующей аппаратурой первичной ЦСП и обеспечивает преобразование цифровых сигналов для передачи по аналоговым РРЛ, а также контроль входного и выходного сигналов и индикацию ошибок без перерыва связи.



Распределение спектров для телефонного (а) и телевизионного (б) стволов

СС, ТО, СР – соответственно сигналы служебной связи, телеобслуживания, системы резервирования;
ТФ – телефонные сигналы;
ТВ – телевизионные сигналы

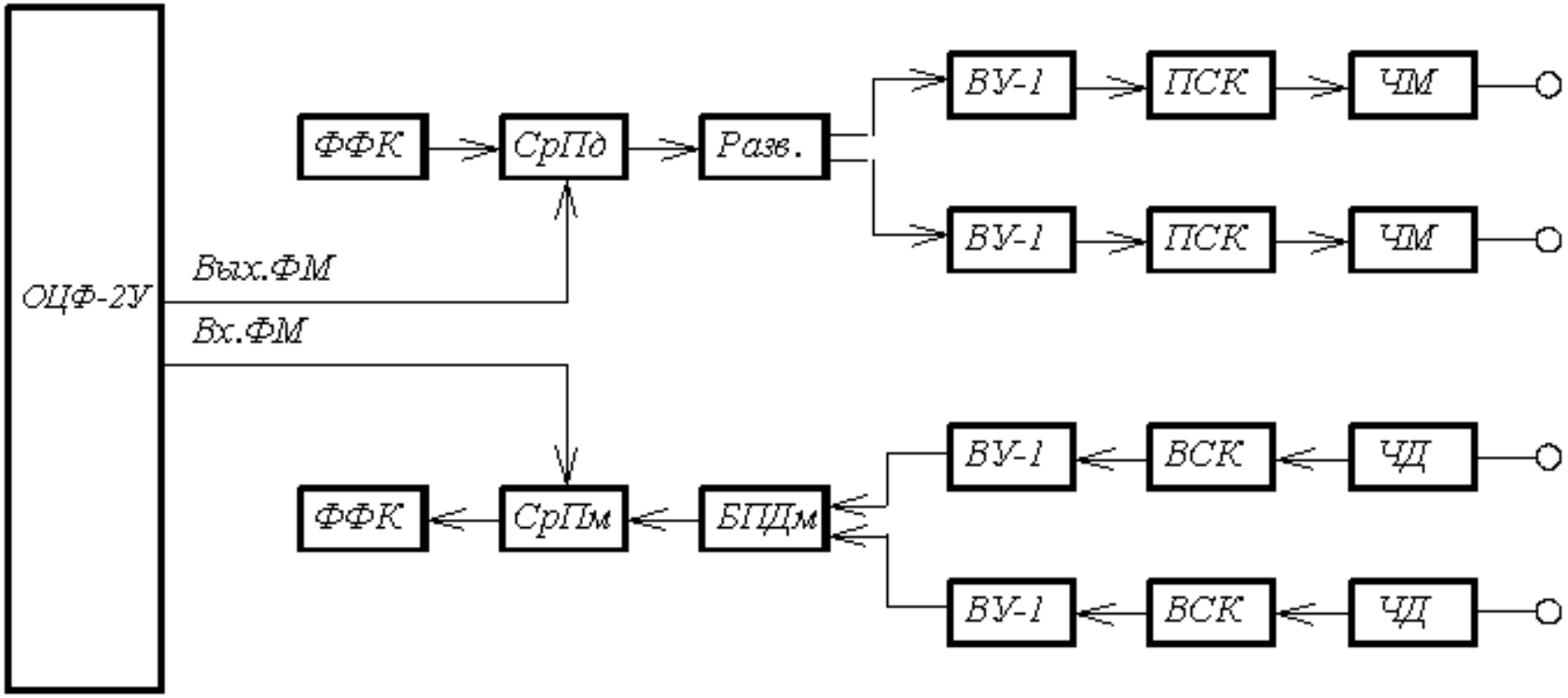


Обобщенная схема подключения оконечного цифрового оборудования к аналоговой РРЛ (а) – передача, (б) – прием

АООРС – аналоговое оконечное оборудование радиорелейной станции

Устройствами сложения (разделения) для аппаратуры ОЦФ-2У служат неравноплечие согласованные тройники, а для аппаратуры ОЦФ-8 – вилки фильтров ДК-55.

Схема подключения ОЦФ-2У к аппаратуре “Восход”



Вх. ФМ и **Вых. ФМ** – входной и выходной сигналы фазоманипулированной цифровой поднесущей;

ФФК – фильтр цифровых поднесущих;

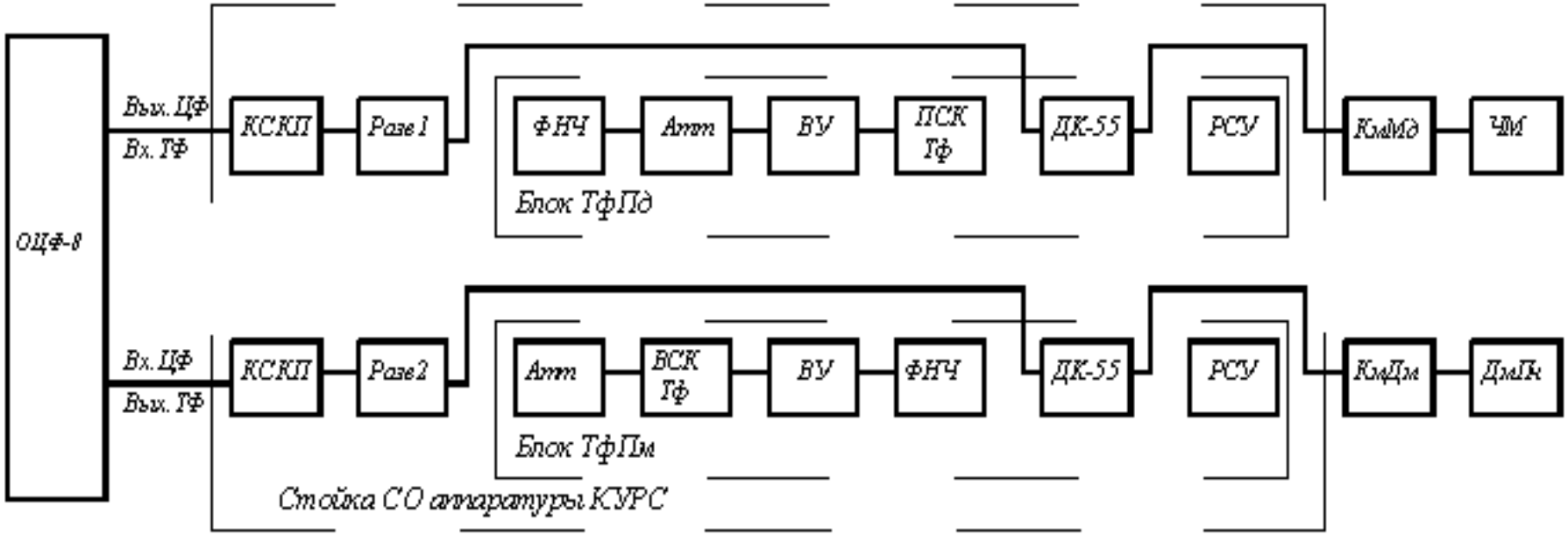
СрПд и **СрПм** – соответственно блоки сложения и разделения аналоговых и цифровых сигналов;

Разв. – разветвитель; **ВУ** – видеоусилитель;

БП Дм – блок переключения демодуляторов;

ПСК и **ВСК** – соответственно контуры предыскажения и восстановления.

Схема подключения ОЦФ-8 к ТФ стволу аппаратуры “Курс” 9



КСКП – блок коррекции кабельной линии,
Разв. – разветвители,
Атт – аттенюаторы,
ДК-55 – вилка фильтров сложения (разделения) служебных сигналов и телефонии,
КмМд и **КмДм** – соответственно коммутаторы модулятора и демодулятора,
ПСК и **ВСК** – соответственно контуры предыскажения и восстановления.

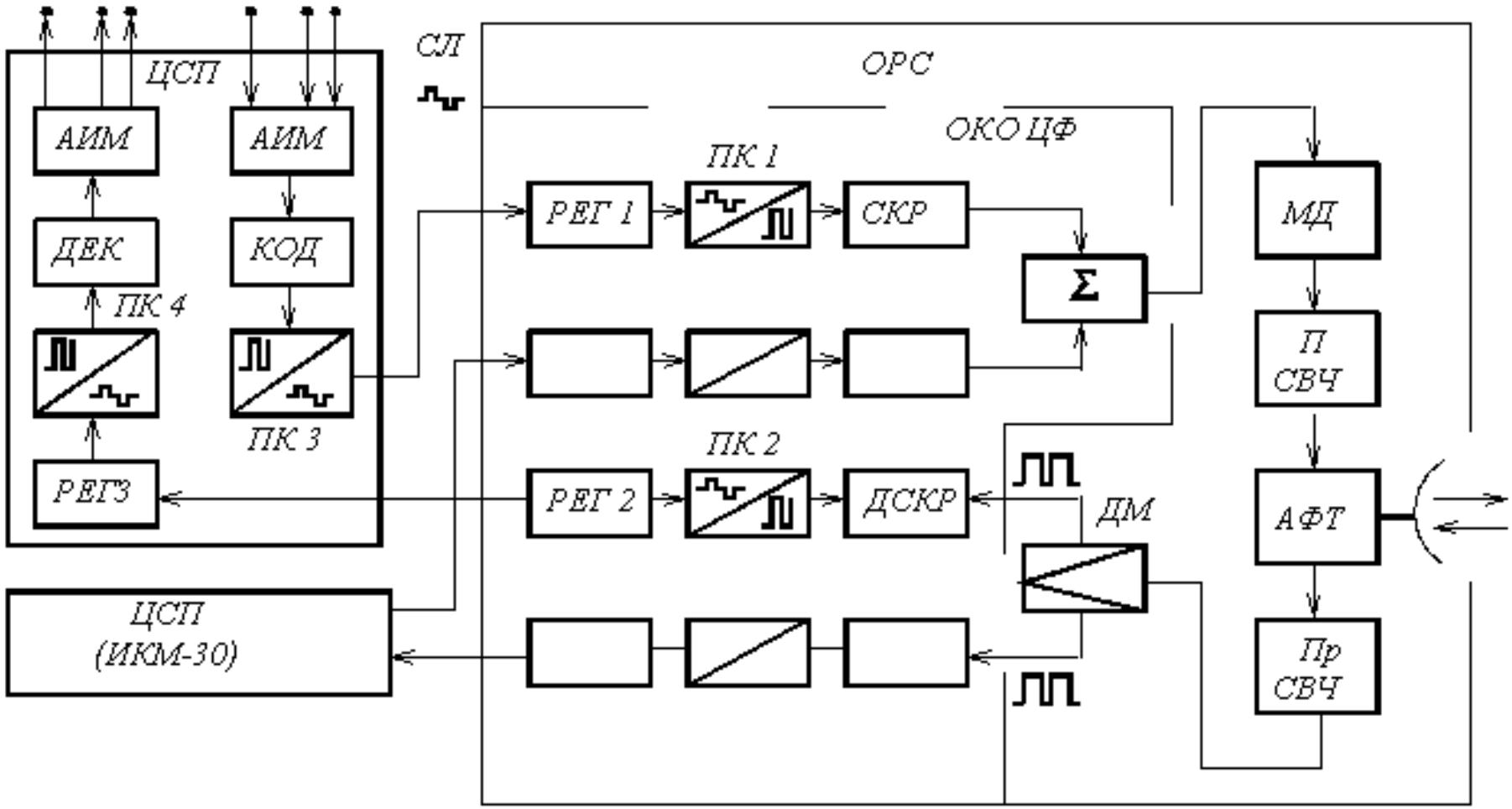
При организации передачи по **ВТОРОМУ СПОСОБУ** на РРЛ подается линейный цифровой сигнал (ЛЦС) получаемый от ЦСП.

Этот цифровой сигнал после некоторых преобразований модулирует СВЧ несущую. Модуляция несущей дискретным сигналом называется **манипуляцией**. Если в ЦСП применена ИКМ, а в РРЛ – амплитудная модуляция (АМ), то говорят о передаче ИКМ-АМ сигнала по РРЛ.

При этом может быть использована аппаратура большинства существующих аналоговых радиорелейных систем (“Курс-4”, “Курс-6”, “Рассвет-2” и др.), для которых разработаны специальные устройства, позволяющие организовать цифровые стволы совместно аналоговыми на существующих РРЛ. Передача цифровых сигналов осуществляется методом **ИКМ-ЧМ**.

Перспективным направлением является применение **многопозиционных методов манипуляции**, позволяющих повысить пропускную способность цифрового ствола без расширения полосы частот приемно-передающей радиорелейной аппаратуры. Такие методы частот используются для передачи бинарных (относительных бинарных) ЛЦС, при этом число позиций (уровней) манипуляции $M = 2^n$. В общем виде цифровые сигналы с многопозиционной ЧМ обозначаются ИКМ-МЧМ, с многопозиционной ФМ – ИКМ-МФМ и т. п. Иногда вместо М указывается его числовое значение, например, ИКМ-4ФМ.

Функциональная схема цифрового ствола РРЛ на примере ОРС при М = 4



На оконечную радиорелейную станцию (ОРС) поступают ЛЦС по соединительной линии СЛ от ЦСП, например, от ИКМ-30 (при М = 4, n =2, т. е. нужны две ЦСП). Передаются ЛЦС обычно в квазитроичном (+1, 0, -1) коде.

Схема ОРС содержит:
ОКОЦФ – оконечное оборудование цифрового ствола;
приемно-передающее радиорелейное оборудование:
МД и ДМ – модулятор и демодулятор;
ПСВЧ и ПрСВЧ – передатчик и приемник СВЧ колебаний;
АФТ – антенно-фидерный тракт;
антенну.

В составе передающей части ЦСП показаны:
АИМ-тракт, на выходе которого образуется многоканальный сигнал с АИМ;
кодер, на выходе которого получаем двоичный цифровой сигнал (ЦС);
преобразователь кода (ПКЗ), на выходе которого получаем линейный цифровой сигнал (ЛЦС). Преобразователь кода служит для согласования спектра ЛЦС с частотной характеристикой соединительных линий. Он осуществляет формирование ЛЦС в квазитроичном коде из двоичного цифрового сигнала.

В составе приемной части ЦСП показаны:
РЕГЗ – регенератор;
ПК4 – преобразователь кода, формирующий двоичный цифровой сигнал из квазитроичного;
декодер, преобразующий двоичный цифровой сигнал в АИМ-сигнал;
АИМ-тракт.

Оконечное оборудование цифрового ствола

Оконечное оборудование цифрового ствола (ОКОЦФ) часто называют устройством сопряжения, так как оно служит для сопряжения ЦСП с передающим (приемным) радиорелейным оборудованием.

Передающая часть ОКОЦФ содержит регенераторы РЕГ1, преобразователи кодов ПК1, скремблеры СКР и суммирующее устройство (∑), а в составе **приемной части** – дескремблеры (ДСКР), преобразователи кода ПК2 и регенераторы РЕГ2.

Регенераторы служат для восстановления формы, длительности и амплитуды каждого из символов ЛЦС. При этом РЕГ1 служит для исправления искажений, вызванных СЛ (такое же назначение имеет РЕГ3 в ЦСП), а РЕГ2 – для исправления искажений, возникающих при передаче сигнала по РРЛ.

В **ПК1** производится преобразование квазитроичного ЛЦС в бинарный, а в ПК2 – обратное преобразование. Длительность импульса двоичного ЦС, соответствующего передаче одного символа, обычно равна тактовому интервалу Т. При передаче длинных серий символов 0 (или 1) подряд на тактовых интервалах, на выходе ПК1 могут появиться отрицательные (или положительные) импульсы большой длительности (К·Т), появятся постоянная и НЧ составляющие. На приеме из такого сигнала будет трудно выделить колебания тактовой частоты, необходимые для нормальной работы регенератора и других устройств. В результате могут наблюдаться срывы систем тактовой синхронизации по всей РРЛ.

Поэтому двоичный ЦС до того, как поступит на модулятор, подвергается специальному преобразованию – **скремблированию** в СКР, в результате которого импульсы большой длительности К·Т превращается в последовательность положительных и отрицательных импульсов длительностью от Т до R·T, где R<K. В результате скремблирования увеличивается период повторения для последовательности символов двоичного ЦС.

В ОРС двоичные ЦС с выхода СКР поступают на ∑, где объединяются в один многоуровневый сигнал (в данном случае - четырехуровневый ЦС). Сумматор представляет собой ПК, в котором каждому возможному сочетанию полярностей импульсов входных двоичных ЦС ставится в соответствие определенный входной уровень в зависимости от принятого кода.

Многоуровневый ЦС используют для модуляции. На выходе ПСВЧ модулируемый параметр СВЧ сигнала может принимать одно из М дискретных значений. Например, при ИКМ-4ЧМ несущая частота СВЧ сигнала на каждом интервале длительностью Т принимает одно из следующих четырех значений: f_1, f_2, f_3, f_4. При ИКМ-4ФМ начальная фаза СВЧ сигнала на каждом интервале длительностью Т может принимать одно из таких значений: ±45º, ±135º (либо в других ЦРРЛ: 0º, 90º, 180º, 270º). Длительность импульсов на входе и выходе ∑ одинакова. Следовательно, приемно-передающая аппаратура ЦРРЛ при четырехпозиционной модуляции может иметь ту же полосу пропускания, что и при двухпозиционной (кроме систем с ЧМ), однако пропускная способность ствола увеличена вдвое.

Разделение на приеме многоуровневого сигнала на отдельные двоичные ЦС обычно происходит в демодуляторе. На ОКОЦФ поступает несколько ЦС. Дескремблеры выполняют преобразование ЦС, обратное скремблированию, то есть восстанавливают сигнал, идентичный входному сигналу скремблера (при условии, что прием без ошибок).

Сложности организации цифровых стволов в аналоговых РРЛ

Ключевым параметром оценки качества цифровых систем передачи является **коэффициент битовых ошибок BER**

BER практически невозможно использовать для оценки качества цифровой линии

В рекомендации ITU-T G.821 в качестве параметров ошибок цифрового соединения выбраны:

число секунд с ошибками (Errored Second, ES), к которым относится каждая секунда, в которой имеется по крайней мере одна ошибка.

число секунд с многочисленными ошибками (Severely Errored Second, SES), где SES означает секунду с коэффициентом ошибок $\geq 10^{-3}$.

Поскольку оба параметра — и ES, и SES — зависят от времени измерения T, для практической оценки качества цифрового соединения применяют их относительные значения: Errored Second Ratio ESR =ES/T и Severely Errored Second Ratio SESR = SES/T.

При использовании действующих аналоговых РРЛ для организации ЦРЛТ **сложно выполнить все требования ITU-T по показателям качества**, особенно на магистральной сети. Главным образом, это касается параметра ES. Дело в том, что переключение на резерв в действующих РРЛ с ЧРК-ЧМ осуществляется на ПЧ. Время переключения даже при предварительном подключении резервного ствола составляет около 2 мкс, поэтому при переключении на резерв в цифровом тракте, образованном в аналоговых РРЛ, возможно появление проскальзывания, если не принять меры по выравниванию времени пробега. Сегодня такая операция осуществляется с помощью кабеля, дополнительно устанавливаемого в тракте ПЧ, что не всегда бывает оптимальным. Наиболее целесообразно проводить выравнивание в цифровой форме, что требует установки модема в резервном стволе и модификации оконечного цифрового оборудования. Выравнивание трактов при пространственно-разнесенном приеме возможно только путем регулировки длин кабельных перемычек и волноводов.

Следует также отметить, что устойчивость (в частности процент SES) ЦРЛТ, организованных на основе существующих аналоговых РРЛ, зависит от их качественных показателей. Данные предварительных испытаний подтверждают возможность обеспечения высоких показателей качества и готовности таких ЦРЛТ, однако необходимо проведение дополнительных долговременных исследований на различных РРЛ для проверки выполнения норм рекомендаций ITU-T.

Оконечная аппаратура для цифровизации аналоговых РРЛ

Модем МДП-2 предназначен для передачи и приема цифрового потока 2048 кбит/с на модулированной поднесущей в спектре группового сигнала аналоговой РРЛ.

Оборудование УВВ-Пн обеспечивает выделение и ввод поднесущей, передаваемой в групповом спектре, при ретрансляции сигнала ПЧ на промежуточной радиорелейной станции.

Аппаратура АЦТ-8-4/2 предназначена для передачи 4 асинхронных цифровых потоков 2048 кбит/с в стволе РРЛ.

Аппаратура АЦТ-17-8/2 предназначена для передачи 8 асинхронных цифровых потоков 2048 кбит/с в стволе РРЛ.

Аппаратура АЦТ-34-16/2 предназначена для передачи 16 асинхронных цифровых потоков 2048 кбит/с в стволе РРЛ.

Аппаратура семейства АЦТ используется как оконечное оборудование РРЛ для организации соединительных линий между АТС, между узлами связи и земными станциями спутниковой связи, в сетях распределения программ радиовещания и т. п.

Вся указанная оконечная аппаратура РРЛ стыкуется с любым типом РРЛ (КУРС, ГТТ, РАКИТА, РАДУГА, КОМПЛЕКС и др.) по ПЧ 70 МГц.

Оконечная аппаратура для цифровизации аналоговых РРЛ содержит модемное и мультиплексорное оборудование, имеет систему телеконтроля и служебной связи, обеспечивает автоматическое резервирование сигналов. Использование этой аппаратуры позволяет полностью преобразовывать аналоговые РРЛ в цифровые.

С помощью аппаратуры АЦТ осуществлена успешная цифровизация аналоговой радиорелейной линии, состоящей из 38 пролетов общей протяженностью 1748 км.

Как отмечалось ранее, **ТРЕТЬИМ** является вариант построения РРЛ изначально ориентированный на передачу цифровой информации.

Скорость передачи аналоговых РРЛ практически ограничена потоком Е3, что определяется

- полосой пропускания ВЧ ствола,
- неравномерностью характеристики ГВЗ радиоствола,
- “проскальзыванием” сигнала при переключениях на резерв,
- используемыми видами манипуляции ВЧ сигнала.

В цифровых РРЛ влияния указанных факторов сведены до минимального, а использование многопозиционной относительной ФМ позволяет эффективно использовать полосу пропускания ствола РРЛ. Это обуславливает **основное преимущество цифровых РРЛ** – возможность обеспечения достаточно высоких скоростей передачи информации.

Оптимальная ширина полосы ствола при передаче цифровых сигналов **19** по РРЛ может быть определена по формуле:

$$\Delta f_{ств} = (1{,}1...1{,}5)\Delta f_{оп} K_м$$

$\Delta f_{оп}$ – ширина полосы, численно равная скорости передачи цифрового сигнала В;

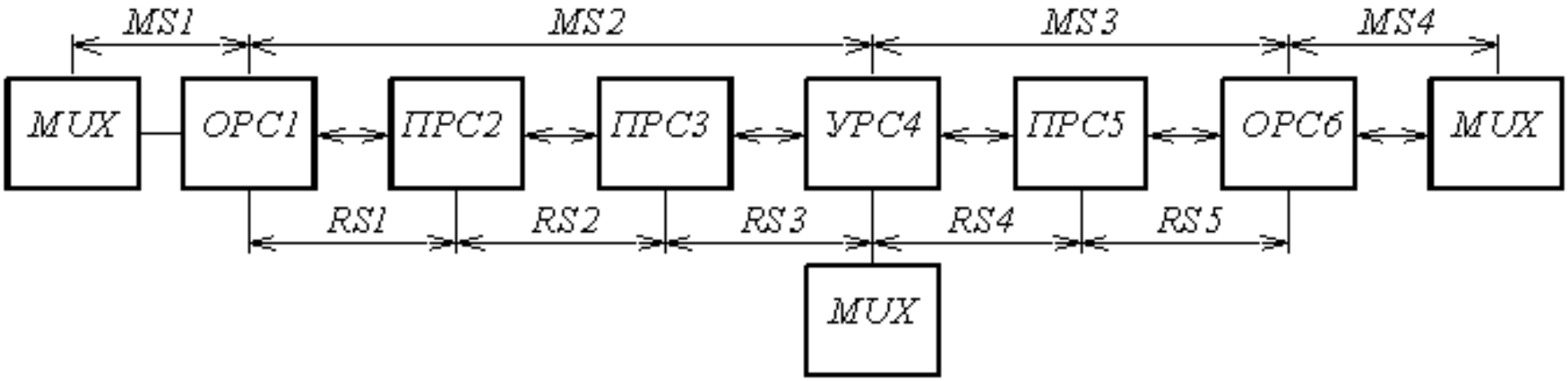
$K_м = 1/\log_2 M$ – коэффициент, учитывающий изменение полосы частот, занимаемой стволом, при использовании М-позиционной модуляции, М = 2, 4, 8, 16, 32, ….

Полосы частот занимаемые цифровыми потоками, при различных видах модуляции

Вид модуляции	Ширина полосы частот радиоствола, занимаемая в РРС, МГц					
	2E1	4E1(E2)	8E1(2E2)	16E1(E3)	STM-0	STM-1
PSK	7	14	28			
QPSK, 4QAM, Q-QPSK, СЕМР и т.п.	3,5	7	14	28		
4FSK	3,5	7	14	28		
16QAM	1,75	3,5	7	14	28	
32QAM				7	14	
64QAM						28

Сужение полосы пропускания ВЧ тракта ниже приведенных в таблице величин вызывает сильное увеличение межсимвольных помех, а ее расширение приводит к увеличению мощности тепловых шумов. В обоих случаях увеличивается BER, т.е. ухудшается качество связи.

В настоящее время по ЦРРЛ передаются цифровые потоки соответствующие STM-RR и STM-1. При прохождении этих модулей по ЦРРЛ производится обработка секционного заголовка SOH, состоящего из заголовков мультиплексной MSOH и регенерационной RSOH секций и AU указателя. В соответствии со структурой секционного заголовка на ЦРРЛ выделяются мультиплексные и регенерационные секции.



На ОРС1 заканчивается мультиплексная секция MS1 кабельной соединительной линии между мультиплексным оборудованием MUX и оконечной радиорелейной станцией (ОРС) и начинаются мультиплексная MS2 и регенерационная RS1 секции РРЛ. Регенерационные секции радиорелейной линии начинаются и заканчиваются на всех пролетах. Мультиплексные секции радиорелейной линии начинаются и заканчиваются на ОРС и узловой радиорелейной станции (УРС), следовательно, на ОРС и УРС обрабатывается весь заголовок SOH STM, включая AU указатель. На промежуточной станции (ПРС) обрабатывается только заголовок регенерационной секции RSOH, а остальная часть заголовка проходит через эти станции транзитом.

Параметры некоторых аналоговых и цифровых РРС

Название станции	Диапазон частот, ГГц	Вид модуляции	Пропускная способность Мбит/с (КТЧ)	Мощность передатчика, дБм	Коэффициент системы при BER = 10^{-3}, дБ
Mini-Link C (Ericson)	15, 23, 26, 38	4-FSK	От 2 до 8×2	25,20,19, 16	109,104, 102, 94
Mini-Link E (Ericson)	7, 15, 18, 23, 26, 38	OQPSK	От 2 ×2 до 17×2	28, 25, 24, 20, 18, 16.5	116, 113, 113, 107, 104, 98
Pasolink (NEC)	15, 18, 23, 38	QPSK	От 2 ×2 до 8	23, 23, 23, 15	113, 112, 110, 101
Spectrum II (DMC)	13, 15, 18, 26	4-FSK	От 2 до 16×2	18, 17, 16, 15	99, 97, 95, 94
DMR (Nokia)	7, 18, 23, 38	CPM	От 2 до 8×2	18, 16	115, 101, 97
Alcatel серії 94 UX	13,15, 18 23, 26, 38	4QAM	2 ×2, 4 ×2, 8 8×2, 16×2	–	120, 111, 110, 104, 105, 106
Quantum series (DMC)	7	16QAM	От 2 до 16×2	26,5	107,5 (16E1)
Курс-4 Курс-6 Курс-8	3,4…3,9 5,67…6,17 7,9...8,4	ЧМ ЧМ ЧМ	(720) (1320) (600)	0,5 Вт 10 ± 2 Вт 0,4 Вт	139 143 115
NL 400 (Nera)	12...40	QPSK	2 ×2, 4 ×2, 8 8×2, 16×2	27 ...21	115,5... 109
Серия “Просвет” (МНИИТИ)	8,13,18, 38	QPSK	–	29, 22, 20, 16	114, 103, 100, 95
“Радан-МС”, “Радан-МГ”, “Родник-15” (ГНПП “Исток”)	11 11 15	ЧМ QPSK QPSK	1, 2 4 ×2, 8, 6×2, 2, 8, 34	18, 19, 20	92, 98, 100, 198, 100