**Расчёт устойчивости связи**

Этот расчёт заключается в определении процента времени ухудшения качества связи на РРЛ из-за глубоких замираний сигнала *Т*Σ и устойчивость связи оценивается по выполнению неравенства: *T*Σ ≤ *Tдоп*(допустимая вероятность ухудшения качества связи на данной РРЛ в соответствии с нормами ITU-R).

(сумма для всех пролётов РРЛ)

Порядок расчёта устойчивости следующий:

1. определяют коэффициент системы *Ксист*;
2. определяют *Vmin*;
3. определяют *Т*∑ ;
4. проверяют неравенство.

1. Коэффициент системы определяется совместным решением двух основных уравнений передачи: уменьшению мощности волны в среде распространения

*PAR* = *РAT* / *L*∑

и изменению отношения сигнал/шум в устройстве

*Kв*=(*Р*s/*Pn*)*out*.*R*/(*P*s/*Pn*)*inp.R*,

где *Кв*- выигрыш приёмника в отношении сигнал-шум, здесь *РАR*  и *Рs* *inp*.*R* одно и тоже.

Значение *РAR* подставив во 2-ю формулу, получим:

*Кв*=*Рs out R* ·*Рn inpR* /*Рn outR* ·*РAT* ·*L*Σ

Умножив правую и левую части данного уравнения на отношение *РT*/*Рn inpR*, получим 2 равных соотношения для

*Ксист*=*Кв·РТ*/*Рn inpR* = (*Рs*/Р*n*)*outR* /*L*Σ.

Из первого соотношения по известным параметрам аппаратуры можно рассчитать *Ксист*, а по нему из второго соотношения можно определить качественные показатели канала.

2. Преобразуем формулу для *Ксист*:

*Ксист*·*L*Σ =(*Рs*/Р*n*)*outR*;

*Ксист*·(*V*²·*Lconst*)= (*Рs*/Р*n*)*outR*;

*Ксист*·(*V*²*min*·*Lconst*)= (*Рs*/Р*n*)*outR min*.

Отсюда, перейдя к логарифмическим единицам, получим:

*V*²*min*.*тф*= 44дБ - *Ксист.тф*-*Lпост*;

*V*²*min*.*тв*= 49дБ - *Ксист.тв*-*Lпост*.

3) Так как глубокие замирания на пролёте обусловлены различными независящими между собой причинами, то в общем случае

*ТR*(*Vmin*)=*Т*0(*Vmin*)+*Тинт*(*Vmin*)+*Т*д(*Vmin*)

*Т*0 – учитывает экранирующее действие препятствия;

*Тинт* – учитывает интерференцию прямого и отражённого лучей (явление многолучёвого распространения), отражения радиоволн от Земли учитывают, как правило, лишь при слабопересечённых пролётах;

*Тд* – ослабление сигнала из-за дождей.

Каждое из слагаемых в формуле определяется на основе соответствующих статистических данных, характерных для данного климатического района (эти данные в технической литературе приводятся, как правило, в виде графиков).

Кроме того, при глубоких замираниях вследствие многолучёвого распространения оценивать *Тинт* в худший месяц можно с помощью приближённого асимптотического выражения:

*Тинт*=*Ккр*·*Q*·*f* В ·*d*0С·*PR*(*Т*)/*PR*(100) ,

где *Ккр*- коэффициент, учитывающий влияние климата и рельефа местности;

*Q* – учёт других параметров трассы;

*B*, *C*- учёт региональных эффектов;

*f* – частота (ГГц);

*d*0 – длина трассы (км);

*РR*(*Т*) - мощность сигнала на входе приёмника, вероятность непревышения которой *Т*. Надо вероятность представить другой буквой!

Для территории СНГ рекомендованы эмпирические значения параметров: *Ккр*·*Q* = 0,41·10‾³ (для зон с умеренно континентальным климатом или среднеширотных со средневсхолмленным рельефом); *B*=1,5; *C*=2.

## **Нормы на показатели неготовности и на показатели качества по ошибкам**

    Нормы, по рекомендации МСЭ-Т G. 821, состоят из двух основных компонент: показатели неготовности и показатели качества по ошибкам.

**Показатели неготовности (ПНГ)**

    Неготовность аппаратуры - такое состояние участка РРЛ, при котором в течение десяти секундных интервалов, следующих подряд, имеет место хотя бы одно из событий:

- пропадание сигнала (потеря синхронизации);   
- коэффициент ошибок *koш* = *Nош* / *N* > 10-3,

где *N* - число переданных символов, *Nош* - число ошибочно принятых символов.

Причины, приводящие к неготовности аппаратуры:

- экранирующее влияние препятствия при субрефракции;   
- влияние гидрометеоров (учитывается при частотах выше 5 ГГц);   
- влияние промышленных атмосферных метеоров (экологические факторы). Данные для расчётов отсутствуют;   
- ненадёжность аппаратуры;   
- ошибки обслуживающего персонала.

В ряде случаев принято оценивать состояние оборудования термином "готовность". При этом общее время работы оборудования составляется из периодов готовности и неготовности, а линия находится в состоянии готовности, если  оба её направления "готовы".

Таблица 3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Качество линии | | ПНГ, % |
| Линии связи высокого качества | | 0.3 *d* / 2500 |
| Линии связи среднего качества | 1 класс |  0.033 (*d* =280 км) |
| 2 класс |  0.05   (*d* =280 км) |
| 3 класс |  0.05   (*d* =50 км) |
| 4 класс |  0.1      (*d* =50 км) |
| Линии связи локального качества | |  0.01-1 |

**Показатели качества по ошибкам (ПКО)**

Показатели качества по ошибкам системы связи  относятся к тем промежуткам времени, в течение которых система находится в состоянии готовности.

    Различаются следующие параметры:

- сильно поражённые секунды (СПС);   
- минуты пониженного качества (МПК);   
- секунды с ошибками (СО);   
 - остаточный *koш* (ОКО).

Если процент времени превышения величины *koш* = 10-3 за 1 секунду, то такое поражения считается сильным. Минуты пониженного качества - процент времени превышения *koш*  = 10-6  за 1 минуту. Процент времени превышения *koш*  = 10-6  за 1 секунду определяет нормальное качество работы системы связи при передаче данных. В некоторых источниках имеется определение параметра секунды с ошибками как процентное отношение числа бракованных секунд, в течение которых имеется одна или больше ошибок к общему времени работы системы. Параметр секунда-ошибка СО определяется любыми причинами (а не только замираниями на трассе линии связи).

    Величины всех этих параметров зависят от интерференционных замираний сигнала на интервале РРЛ, которые складываются из гладких и частотно-селективных замираний. К гладким замираниям необходимо относить такие замирания, которые не искажают частотную характеристику системы связи.

Соответственно частотно-селективные замирания влияют на АЧХ ствола РРЛ, т.е. в пределах полосы пропускания линии связи вносят различные ослабления на разных частотах. Эти замирания необходимо учитывать при полосе пропускания ВЧ ствола больше 10-15 МГц.

                    Таблица 4 - Показатели качества по ошибкам.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Линии связи высокого качества | | СПС  0.054% L / 2500 |
| МПК  0.4% L / 2500 |
| Линии связи среднего качества *L* секции = 280 км | 1 класс | СПС  006% |
| МПК  045% |
| 2 класс | СПС  0.0075% |
| МПК  0.2% |
| Линии связи среднего качества *L* секции = 50 км | 3 класс | СПС  0.002% |
| МПК  0.2% |
| 4 класс | СПС  0.005% |
| МПК  0.5% |
| Линии связи локального качества | | СПС  0.015% |
| МПК  1.5% |

Для проектирования новых цифровых беспроводных линий связи рекомендуется пользоваться новыми, более жёсткими нормами, особенно при проектировании систем связи синхронной транспортной иерархии (SDH).

# **Расчёт запаса на гладкие замирания**

    К гладким замираниям относятся интерференционные биения, не изменяющие частотную характеристику цифрового ствола.

*М*(10-3) = *PR - Рпор*(10-3),                                           (19)

где *Рпор*(10-3) - пороговый уровень сигнала на входе приёмника при *k*0 = 10-3 (определяется из параметров аппаратуры),

*М*(10-6) = *PR- Рпор*(10-6),                                           (20)

где *Рпор*(10-6) - пороговый уровень сигнала на входе приёмника при *k*0= 10-6 (определяется параметрами аппаратуры).

    Типовые значения *Рпор*(10-3) и *Рпор*(10-6)  отличаются друг от друга  примерно на величину 4 дБ.

    Необходимо помнить, что некоторые производители аппаратуры дают эти величины  в размерностях дБВт. (например, для аппаратуры Перевал или Перевал-2). При расчётах эти параметры необходимо привести к дБм (разница составит 30 дБ !).

# 

# **Расчёт вероятности появления интерференционных замираний**

    Интерференционные замирания приводят к достаточно быстрым изменениям коэффициента ошибок в РРЛ (единицы и доли секунд), поэтому они влияют на показатели качества линии связи по ошибкам (ПКО). В общем случае, ПКО складывается из двух основных компонент:

ПКО = ПКО*гл* + ПКО*чс*,                                                 (21)

где ПКО*гл*и ПКО*чс* - влияние гладких и частотно-селективных интерференционных замираний, соответственно.   
    Как показывает практика, учёт влияния частотно-селективных замираний необходимо проводить при протяжённости пролётов линии связи более 20 км и при скоростях работы более 50 Мбит/с.

Вероятность появления гладких интерференционных замираний  определяется как

*Ринт* = *Ккл* *Q* *f bd*0*d* *c*,                                             (22)

где *Ккл* - климатический фактор,   
*b*, *c* и *d* - коэффициенты,   
*Q* - фактор условий земной поверхности.

В разных климатических зонах наблюдаются весьма большие различия при выборе величин, входящих в формулу 22. Данные для их выбора приведены в табл. 5, 6.   
Фактор влияния условий земной поверхности (*Q*), учитывающий наличие отражённых волн от поверхности Земли, принимается равным единице, если пролёт можно отнести к разряду пересечённых. К ним относятся пролёты, в которых отражением от поверхности можно пренебречь из-за неровностей поверхности отражения, превышающими удвоенную величину критического просвета *Н*(0), при экранировании отражённой волны или при малых значениях коэффициентов отражения (например, в случае отражении от поверхности леса).

                    Таблица 5

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Район | *Ккл* | *b* | *d* |
| 1 | Сухопутные районы | 4.1⋅104 | 1.5 | 2 |
| 2 | Приморские районы и районы, расположенные непосредственно  вблизи водохранилищ, крупных рек и других водных массивов | 2⋅ 10-3 | 1.5 | 2 |
| 3 | Западная Европа | 1.4⋅10-6 | 1 | 3.5 |
| 4 | Скандинавия | 6.8⋅10-5 | 1 | 3 |

Таблица 6

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Климат | *с* |
| 1 | Сухой | 0,5 |
| 2 | Умеренный | 1 |
| 3 | Жаркий, влажный климат или умеренный климат  в прибрежных районах | 2 |
| 4 | Прибрежные районы с жарким, влажным климатом | 4 |

    Расчётное значение параметра СПС

СПС*расч* = *Ринт*  10-0.1 *М*(-3),                                                (23)

а параметр МПК (по приближённой формуле)

МПК*расч* = 5.5 [*Ринт* 10-0.1 *М*(-6) - 0.5 Р*инт* 10-0.1 *М*(-3)].                                        (24)

Как правило, выполнение норм на сильно поражённые секунды приводит в современной аппаратуре и к выполнению норм на минуты пониженного качества, поэтому часто МПКрасч не определяется.

Полученные в результате расчёта величины сравниваются с нормами. При невыполнении норм, необходимо все пересчитать, задаваясь другими параметрами аппаратуры и антенно-фидерного тракта.

# **9. Учёт влияния внутренних и внешних радиопомех**

    Обычно, при работе любой радиорелейной линии связи на вход приёмных устройств поступает полезный сигнал и один или несколько мешающих сигналов, приходящих как от самой линии, так и от посторонних источников. На  рис. 13 показаны характерные примеры образования помеховых сигналов  на входе приёмного устройства узловой станции  С1 пролёта С1 - С3 для одного ствола РРЛ.

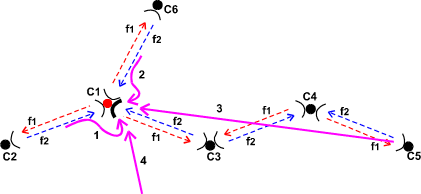


Рис. 13 - Пути прохождения помеховых сигналов показаны  пронумерованными стрелками. 1 - сигнал, поступающий на вход приёмника с предыдущего пролёта С2 - С1 за счёт заднего лепестка диаграммы направленности  антенн; 2 - сигнал, поступающий на вход приёмника с ответвления (пролёт С1 - С6) за счёт бокового лепестка диаграммы направленности  антенн; 3 - сигнал, проходящий через три пролёта со станции С5 до станции С1; 4 - мешающий сигнал, приходящий от других источников (например, от спутниковых систем связи).

В случае многоствольной работы сигналы соседних стволов также являются источниками помех.

При учёте влияния мешающих сигналов на работу линии связи,  необходимо различать коррелированные и некоррелированные составляющие помех.

К коррелированным мешающим сигналам относятся помеховые составляющие, замирания которых взаимосвязаны с замираниями полезного сигнала. Поэтому, здесь отношение полезного сигнала к мешающему сигналу (*Sк* = *Pc* / *Pп*)  постоянно во времени. Главные источники таких мешающих сигналов - помехи от соседних стволов на пролёте. Известно, что соседние стволы РРЛ различаются рабочими частотами, а в диапазонах  до 15-18 ГГц - и различной поляризацией. При этом основной причиной коррелированных замираний являются замирания в гидрометеорах, которые не зависят от частоты в широком диапазоне частот. Кроме того, при относительно длинных пролётах к коррелированным замираниям нужно относить замирания из-за закрытия трассы. Замирания же сигналов из-за интерференции, как правило, частотно-независимы в разных стволах РРЛ (особенно в системах большой ёмкости). Поэтому влияния сигналов соседних стволов при интерференционных замираниях не относятся к коррелированным помехам.

Некоррелированные мешающие сигналы ведут себя независимо от полезных сигналов. Следовательно, отношение полезного сигнала и мешающего может меняться и быть разным в течение времени. Поэтому, при учёте влияния некоррелированных помех нужно рассматривать наихудший случай, при котором полезный сигнал максимально ослаблен, а условия прохождения мешающих сигналов - наилучшие. Практически все помеховые сигналы (рис. 13) можно отнести к некоррелированным.

Влияние мешающих сигналов в ЦРРЛ эквивалентно ухудшению пороговых значений сигналов в приёмных устройствах. Естественно, что изменение пороговых значений приёмников приводит к изменению отношения сигнал / помеха в демодуляторах. При помехоустойчивых методах модуляции, таких как 4ФМ, ФММС, ЧММС и пр., допустимое отношение С/П в демодуляторе составляет 15-25 дБ. Для менее помехоустойчивых методов модуляции (16КАМ, 64КАМ), требуемое отношение С/П значительно выше (30-40 дБ). Допустимое отношение С/П и связь его с ухудшением порога необходимо находить из данных на технические характеристики аппаратуры ЦРРЛ.

Общий подход к улучшению помеховой ситуации на линии связи заключается в правильном выборе:   
- мест расположения станций РРЛ для обеспечения "зигзагообразности" трассы и "отстройки" от внешних мешающих сигналов;

- антенн с высокими направленными действиями и защитными свойствами;   
- оптимальных мощностей передатчиков;   
- плана распределения рабочих частот в многоствольных системах.

### **9.1. Расчёт влияния некоррелированных помех**

    Общий принцип расчёта заключается в выборе величины ухудшения пороговых характеристик приёмника в пределах 1-3 дБ (в зависимости от предполагаемой помеховой ситуации) и пересчёте показателей линии связи с новой величиной *Рпр пор*. Можно предложить следующий порядок расчёта:

- определить мощности мешающих сигналов.

    Эти величины измеряются на практике или рассчитываются по (4.1) с учётом того, что вместо коэффициента усиления приёмной антенны необходимо использовать величину ослабления антенны для сигналов, поступающих сзади или сбоку для учёта влияния мешающих сигналов необходимо знать характеристики диаграмм направленности антенн. Точные характеристики приводятся фирмами-производителями. Для прикидочных расчётов можно пользоваться эмпирическими формулами, определяющими величины огибающих боковых и задних лепестков диаграмм направленности параболических антенн типа АДЭ. Кроме того, при учёте помехи, имеющей частоту, отличную от частоты полезного сигнала, надо учитывать ослабление разделительных фильтров.

Тогда

*Рпi* = *Рпрi* + *А*() + *Арф*,                                              (25)

где *Рпi* - уровень мощности *i*-того мешающего сигнала;   
*Рпрi* - уровень мощности сигнала на входе приёмника мешающего направления;   
*А*() - ослабление сигнала, приходящего под углом  в антенну;   
*Арф* - ослабление сигнала в разделительных фильтрах (при разнице частот полезного и мешающего сигналов).

    Общий уровень мощности помех, приходящих с разных направлений и от разных источников,

                                         (26)

где *Рпi* - мощность сигнала помехи, приходящей с i-го пролёта или источника помех (дБм);

- определить разность уровней  мощностей полезного и мешающего сигналов без замираний

*S*0 = *Рпр* - *Рп*;                                           (27)

- определить разность уровней мощностей полезного и мешающего сигналов при  замираниях

*S* = *S*0 - *М*(10-3);                                               (28)

- сравнить полученную величину со значениями отношения С/П, приводящими к эквивалентному ухудшению порогов приёмных устройств конкретной аппаратуры РРЛ

 Соотношения между помеховой ситуацией  и ухудшением порога для аппаратуры РРЛ (пример величин в таблице 7 относится к аппаратуре DMR фирмы Nokia)

Таблица 7

|  |  |
| --- | --- |
| Отношение  С / Ш, дБ | Ухудшение  порога (***Y***), дБ |
| 17 | 3 |
| 18 | 2 |
| 20 | 1 |
| 24 | 0.5 |

- определить величину ухудшения порога (*Y*), если значения отношения С/П укладываются в диапазон, указанный в таблице 7. Ухудшение порога выше 3 дБ недопустимо и требует проведения полного пересчёта параметров и структуры линии связи;

- определить запас на замирания с учётом ухудшения порога

*М*1(10-3) = *М*(10-3) - *Y*                                                (29)

и пересчитать параметры линии связи с учётом этого нового значения запаса.   
    Если пересчитанные параметры не укладываются в норму, то нужно улучшить энергетические показатели на пролёте (увеличить мощность передатчика или коэффициенты усиления антенн) и повторить расчёты. В ряде случаев, возможно, придётся изменить диапазон рабочих частот приёмопередающей аппаратуры.

### **9.2. Расчёт влияния коррелированных помех**

    Расчёт влияния коррелированных помех можно проводить по методике сравнения отношения С / П с величинами, приведёнными в таблице 7, для случая отсутствия замираний, определяемой по формуле

*S*0(к) = *Рпр* - *Рп* + *X*,                                                       (30)

где ***X*** - проектировочный запас для учёта декорреляции процессов, проходящих на пролёте РРЛ для разных стволов. Обычно ***X*** = 3 - 6 дБ.

# **Методы повышения устойчивости связи на пролётах ЦРРЛ**

К важным способам улучшения качественных показателей РРЛ относятся специальная юстировка антенн и применение разнесённого приёма. Основной причиной ухудшения качественных показателей является наличие интерференционных замираний и мешающих сигналов на пролётах РРЛ. Специальная юстировка антенн (в пределах 0.5-1.5 град.) позволяет, используя их высокие направленные свойства, отстраиваться от различных мешающих сигналов. Обычно это делается практически в условиях эксплуатации, но прикидочные расчёты можно провести предварительно. Трудность точных расчётов обусловливается изрезанностью диаграмм направленности антенн, которая зависит от многих факторов, (в частности, влиянием антенных опор и монтажных креплений). Прикидочные расчёты проводятся по методике, приведённой в этой работе, с учётом стандартных диаграмм направленности антенн.

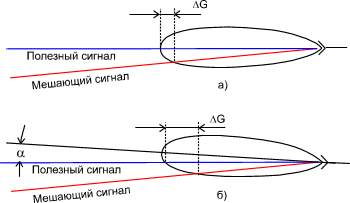


Рис. 14– Отстройка РРС от сигналов прицельной помехи отклонением центрального луча

Принцип отстройки от мешающих сигналов иллюстрируется рис. 14. Видно, что при повороте антенны на угол *α*, коэффициент усиления для полезного сигнала, уменьшается на небольшую величину, в то время как для мешающего сигнала падение усиления существенно. Обычно оптимальная величина угла *α* определяется следующим соотношением:

*αопт* 0.6 ⋅*ϕ*,                                                 (31)

# где *ϕ* - ширина диаграммы направленности антенны.

# В условиях сильных интерференционных воздействий можно применять разнесённый приём, который представляет собой достаточно эффективное средство. Известно, что применяемый на практике способ поствольного резервирования в РРЛ относится к частному случаю частотно - разнесённого приема. Если в рассчитываемой системе связи применяется такое резервирование, то качественные показатели нужно пересчитать.

# Если в системе связи не применяется поствольное резервирование, то для повышения устойчивости в цифровых РРЛ наиболее часто используется пространственно-разнесённый приём. Некоторые типы аппаратуры даже имеют конструктивные возможности для работы в подобных режимах (например, аппаратура 700-й серии фирмы NEC, аппаратура фирмы Nera). Общий принцип пространственно-разнесённого приёма - приём сигналов на две антенны, разнесённые в пространстве. Обычно в РРЛ применяется разнесение по высоте, когда антенны располагаются на одной антенной опоре на разных высотах с разносом не менее 4500 / *f*, см, где *f* -  рабочая частота, ГГц.

# **11. Алгоритм расчёта параметров ЦРРЛ**

    По материалам предыдущих разделов можно составить общий алгоритм расчётов, который заключается в последовательном подборе параметров аппаратуры и трассы для достижения заданных качественных показателей. На практике встречаются несколько задач при расчётах ЦРРЛ. Перечислим наиболее часто встречающиеся варианты.

1.  Рассчитать линию связи при заданных пропускной способности и качественных показателях.   
2.  Рассчитать линию связи при заданных пропускной способности, диапазоне рабочих частот и качественных показателях.   
3.  Определить основные параметры линии связи при заданных аппаратуре и конечных пунктах.   
4.  Провести модернизацию существующей линии связи.   
5.  Определить возможность построения линии связи между пунктами при наименьшей стоимости системы.

    Естественно, алгоритм расчёта по разным вариантам необходимо модифицировать для конкретных условий.

В большинстве случаев расчёт начинается с выбора диапазона рабочих частот, типов аппаратуры и параметров антенн.

Аппаратуру желательно выбирать с возможно меньшим значением уровня порогового сигнала на входе приёмника при заданной пропускной способности и с возможностью варьирования несколькими значениями уровней мощностей передающих устройств.

При выборе антенн нужно пользоваться несколькими соображениями. Антенны с большим коэффициентом усиления увеличивают энергетический потенциал сигналов на линии связи, что улучшает качественные показатели. Такие антенны в определённой мере могут улучшить помеховую ситуацию на трассе РРЛ за счёт хорошего защитного действия. Однако антенны с большим коэффициентом усиления имеют и большие размеры. Они подвержены сильным ветровым нагрузкам и требуют жёсткого крепления и жёстких антенных опор, что увеличивает стоимость линии связи. Поэтому нужно выбирать разумный компромисс между стоимостью и качеством.

Для выбора мест расположения станций и продольных профилей пролётов можно воспользоваться многочисленными рекомендациями. Это очень ответственный этап, во многом определяющий работоспособность линии связи. При этом нужно пользоваться качественным картографическим материалом, а в наиболее критических случаях проводить практическое обследование местности со съёмкой основных высотных отметок.

После определения мест расположения станций и уточнения протяженностей пролётов РРЛ можно рассчитать нормы, относящиеся к каждому пролёту. Необходимо напомнить, что нормы на цифровые РРЛ не установлены окончательно. Поэтому нужно следить за рекомендациями МСЭ-Р по данным вопросам.

На этапе расчёта запаса на замирания в пролётах РРЛ можно сделать предварительные выводы о правильности выбора основных параметров пролётов, аппаратуры и антенн. В большинстве случаев запас на замирания не должен быть меньше 26 - 28 дБ. При таком запасе, в определённых условиях, ещё возможно выполнение норм на показатели ЦРРЛ. Слишком большие запасы на замирания (50-60 дБ) экономически не оправданы, и их нужно избегать.

Перед проведением расчёта показателей неготовности требуется определить факторы, приводящие к нарушениям работоспособности линии связи. Как правило, в рассматриваемых диапазонах частот работоспособность линии определяется, в основном, влиянием дождей (гидрометеоров). Закрытия трасс маловероятны при  малой протяжённости пролётов и учитываются в отдельных случаях (разд. 4).

    Из всех показателей качества по ошибкам в большинстве случаев определяется процентная величина сильно поражённых секунд, остальные величины рассчитываются по потребности.

Если после выполнения вышеперечисленных действий нормы на неготовность и качественные показатели не выполняются, расчёт повторяется с другими данными на аппаратуру, антенны или пролёты до получения удовлетворительных результатов.

Следующий пункт расчётов - учёт помеховой  ситуации для каждого пролёта. Здесь необходимо провести анализ всех источников помех, провести расчёты отношений С/П и определить величины деградации порогов приёмных устройств. После этого, пересчитываются запасы на замирания с учётом величин деградации порогов и повторяются все расчёты в целях получения требуемых качественных показателей. При невыполнении норм применяются меры по увеличению энергетических уровней сигналов на пролётах, изменению азимутов пролётов, планов распределения рабочих частот или структуры линии связи в зависимости от конкретной ситуации.

В некоторых сложных случаях приходится применять меры по повышению устойчивости работы системы связи на отдельных пролётах. Но подобные способы  нужно использовать только в случаях крайней необходимости, так как они экономически невыгодны.

**Особенности построения цифровых РРЛ**

Этот вопрос рассмотрим на примере радиорелейного оборудования российского производства «Радиус-ДС», используемого для организации одно- и многоинтервальных цифровых РРЛ различного назначения общей протяжённостью до 600 км при типовом значении длины пролёта 45 км.

Данное оборудование обеспечивает передачу-приём стандартных цифровых потоков со скоростями: 2048; 8448; 34368 кбит/c в диапазоне частот 7,9….8,4 ГГц при вариантах схем связи 1+0; 2+0; 1+1 c автоматическим резервированием по критерию достоверности.

Информационный цифровой поток, сформированный каналообразующим или мультиплексным оборудованием, поступает на вход "ИНФ" ячейки ЦСС базового блока (при передаче 2048 или 8448 кбит/с) или на вход "ИНФ" ячейки "МОД 34" (при передаче 34368кбит/с). В базовом блоке осуществляется модуляция несущей первой промежуточной частоты (70 МГц) входным информационным цифровым сигналом (вид модуляции – 2PSK для потоков 2048 и 8448 кбит/с или четырёхфазная QPSK для потока 34368 кбит/с) и аналоговым сигналом канала служебной связи Инф.СК*лин* (вид модуляции - ЧМ), сформированным в полосе частот 0,3…8 кГц в результате частотного уплотнения сигналов речевого служебного канала и сигналов системы линейного телеобслуживания - ТУ-ТСлин. Сигнал ПЧ 70 МГц через устройство кабельного уплотнения (УКУ) ячейки ВИП-УКУ по кабелю поступает на ВППМ.

В ВППМ сигналы, поступившие по кабелю, разуплотняются в УКУ-Р. Далее сигнал ПЧ 70 МГц поступает в тракт ПРД ВППМ, в котором осуществляется перенос информационного спектра на промежуточную частоту 1339/ 1605 МГц (в зависимости от литерности исполнения) и второй перенос с частоты 1339/1605 МГц в рабочий диапазон 7,9 - 8,4 ГГц.

Гетеродином при первом переносе служит фиксированный кварцевый генератор на частоте 1409/1675 МГц в зависимости от исполнения.

Гетеродином при втором переносе является синтезатор частот с выходной ступенью - УЧ-8. Шаг синтезатора частоты обеспечивает (после умножения частоты) дискретность перестройки 7 МГц.

СВЧ сигнал после второго переноса и фильтрации поступает на усилитель мощности с выходной мощностью 0,5-0,7 Вт.

С выхода усилителя мощности через дуплексер СВЧ сигнал поступает в антенну.

Принятый с антенны СВЧ сигнал через дуплексер поступает на прибор СВЧ ПРМ, включающий в себя МШУ, смеситель и усилитель первой промежуточной частоты (ПЧ1)- 1339/1605 МГц.

С выхода первого преобразователя информационный сигнал на ПЧ1 поступает на преобразователь ПЧ ПРМ, где он переносится на частоту 70 МГц. С выхода второго преобразователя информационный сигнал с частотой 70 МГц поступает на прибор УПЧ-70, объединяющий сигнальный фильтр и усилитель промежуточной частоты 70 МГц с глубиной АРУ - 70 дБ, и далее через устройство УКУ на выход ВППМ.

Следует отметить, что в УПЧ-70 за счёт детектора АРУ формируется сигнал постоянного тока, пропорциональный уровню входного сигнала. Этот сигнал используется в системе ТУ-ТС для оценки уровня входного сигнала, что важно при проведении юстировки и в процессе эксплуатации для оценки энергетического запаса на линии.

Гетеродинирование в приёмном тракте выполнено так же, как и в передающем тракте, причём необходимо отметить, что в трактах приёма и передачи при преобразовании частоты в приборах СВЧ ПРД и СВЧ ПРМ используется один и тот же гетеродинный тракт, состоящий из синтезатора и выходной ступени - умножителя частоты (УЧ-8).

В состав ВППМ кроме вышеуказанных приборов входит также источник вторичного питания, обеспечивающий напряжения +7В и ±12В для питания приборов модуля и модем СКВ, обеспечивающий обработку сигналов системы телеобслуживания данной станции.

В базовом блоке сигнал ПЧ 70 МГц поступает на демодулятор.

Из демодулированного сигнала выделяется информационный поток и сигналы служебного канала (Инф СК*лин*): сигналы линейной телесигнализации и речевой канал служебной связи.

Информационный поток после регенерации в ячейке ЦСС поступает на выход ББ. Кроме регенерации в ячейке ЦСС осуществляется оценка достоверности принимаемой информации и осуществляется переключение стволов при работе РРО по схеме связи "1+1".

Сигналы линейной телесигнализации дешифрируются в ячейке ПТС и поступают на её светодиоды:

1. если в PPЛ нет аварийных станций, то все индикаторы - светодиоды "ИНФ", "ДЕЖ", "ПPМ", "ПPД" и цифровой индикатор "Номер станции" - погашены;
2. если в PPЛ какая-либо станция начала выдавать сигнал аварии, то базовый блок в каждой станции PPЛ отображает номер аварийной станции "N", а также фиксирует все аварии, которые имеют место на этой станции:

"***ИНФ***" - отсутствует входной информационный поток,

"***ДЕЖ***" - включён один из дежурных режимов - *шлейф, автоконтpоль*, *выключён УМ*,

"***ПPМ***" - авария приёмного тракта,

"***ПPД***" – авария передающего тракта.

Информация местного служебного канала (Инф СКм) о состоянии ВППМ данной станции дешифрируется в ячейке СК-ДС и отражается светодиодами ячейки:

"***АPУ-1***" - уровень сигнала в тракте приёма выше порога чувствительности на 3-10 дБ;

″***АPУ-2***" - уровень сигнала в тракте приёма находится на пороге и ниже порога чувствительности;

"***ПРД***" - авария тракта ПРД;

"***ПРМ***" - авария тракта ПРМ;

"***ГЕТ***" - авария тракта ГЕТ;

"***НЧ***" - авария тракта НЧ;

"***УМ***" - отсутствие мощности излучения.

В цифровых РРЛ очень важную роль играет регенератор (в данном оборудовании находится в ячейке ЦСС). Регенератор восстанавливает амплитуду, форму и временное положение принятых импульсов.

Все цифровые РРЛ содержат такие устройства как скремблер (на передающей стороне) и дескремблер (на приёмной стороне). Скремблер выполняет логические преобразования двоичных цифровых сигналов, в результате которых в выходном сигнале исключается возможность появления длинных серий одинаковых символов. При длинных сериях символов может быть нарушена работа системы тактовой синхронизации и могут возникнуть проблемы ЭМС (из-за сосредоточения энергии в более узкой полосе частот).

Кроме приёмо-передающей аппаратуры, которую мы рассмотрели, в состав основной комплектации «Радиус-ДС» входит также антенна (с диаметром зеркала 1,2 м, либо 1,75 м) с опорно-поворотным устройством.

**Особенности построения аналоговых РРС**

Радиорелейная линия начинается с оконечной станции (ОРС). Здесь формируются спектры и группового сигнала и видеосигнала. Рассмотрим структурную схему аналоговой ОРС. Принятые обозначения:

* ТЦ – телецентр;
* МТС – междугородняя телефонная станция;
* МД – модулятор;
* ДМ – демодулятор;
* *T* – передатчик;
* *R* – приёмник;

- АР – аппаратура резервирования;

- ФСл – фильтр сложения мощностей.

Здесь приведена схема станции 3-ствольной РРЛ (стволы телефонный, телевизионный и резервный). Групповой сигнал, поступающий с МТС, в МД модулирует сигнал промежуточной частоты, который может быть 35; 70; 140 МГц. Во втором МД аналогичную операцию осуществляет видеосигнал, поступающий из ТЦ.

Рассмотрим, например, организацию телефонного ствола РРЛ. Кроме узлов, вошедших в приведённую выше схему (МД-ДМ, ПРД-ПРМ, АФТ), в состав тракта ствола входит также *оконечное* устройство, которое расположено в МТС. Там с помощью аппаратуры объединения формируется многоканальное телефонное сообщение, добавляются сигналы звукового вещания (СЗВ), служебные сигналы (СС), пилот-сигнал (ПС) и в результате сформированный полный *групповой* сигнал поступает на МД и далее на СВЧ-оборудование (радиоствол), отличие приёмной стороны в том, что там используется аппаратура разделения.

## **Т**

## **Т**

## **Т**

## **R**

## **R**

## **R**

**Фильтр сложения**

**мощностей - Ф Сл**

## **РФ**

## **УС**

## **АР – Аппаратура**

## **резервирования**

## **МД**

## **МД**

## **ДМ**

## **ДМ**

## **АФТ**

## **МТС**

Рис. 15. - РФ – разделительный фильтр; АФТ – антенно-фидерный тракт; УС – устройство селекции.

В состав оконечного оборудования на передающей стороне входит пред искажающий контур (ПК), на приёмной (ВК) – восстанавливающий. Назначение ПК– повысить помехозащищённость верхних каналов ТЧ, где больше уровень шумов, ВК – восстановить спектр принимаемых сигналов.

Приведём пример спектра группового сигнала телефонного ствола:

***f***

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

Рис. 16.

1 – CC (сигналы служебной связи, в нижней части группового спектра отдельный узкополосный канал);

2 – МТфС (многоканальное телефонное сообщение);

3 – *СЗВ*1 (сигналы звукового вещания 1);

4 – С*ЗВ*2 (сигналы звукового вещания 2);

5 – ПС (пилот-сигнал – позволяет осуществлять контроль допустимого уровня сигнала при принятии решения об использовании резервного канала);

*f* – частота.

Рассмотрим построение промежуточных станций РРЛ. Здесь сигналы только ретранслируются (либо по СВЧ, либо по промежуточной частоте, когда сигнал с выхода приёмника поступает на вход передатчика, либо по групповому спектру, когда сигнал с выхода демодулятора поступает на вход модулятора). Ниже приводится фрагмент структурной схемы ретранслятора по групповому спектру. Такой вид ретрансляции используется также на узловых станциях.

**РФ**

***R***

### Д**М**

### М**Д**

***T***

**ФСл**

Модем

Рис. 17.

**Автоматическое резервирование РРЛ**

Входной сигнал приёмника РРЛ непрерывно колеблется из-за изменений условий распространения. Когда он падает ниже порогового значения, резко возрастают тепловые шумы на выходе канала (это обусловлено работой АРУ приёмника) и связь становится невозможной.

Иными словами, из-за замираний сигнала нарушается устойчивость работы РРЛ. Связь может нарушиться также из-за неисправности аппаратуры. Для повышения устойчивости и надёжности работы на РРЛ применяют резервирование.

Поучастковое резервирование применяется достаточно широко (участок между соседними УРС или УРС и ОРС).

Принцип работы понятен: ставший неисправным рабочий ствол на данном участке переключается на резервный. Здесь ГОАС – генератор обратного аварийного сигнала.

Рабочий ствол

Рабочий ствол

Пилот сигнал

Пилот сигнал

Выделение пилот сигнала

Выделение пилот сигнала

ГОАС

Резервный ствол

Ствол

служебной связи

Рис. 18.

Постанционное резервирование применяется в некоторых малоканальных РРЛ.

ПРМ - ПРД

ПРМ - ПРД

СУР

Рис. 19 – Схема СУР – система управления резервом

**Электромагнитная совместимость РРЛ**

Согласно Регламенту Радиосвязи (основному документу МСЭ) и соответственно «Таблице распределения полос частот между радиослужбами Республики Казахстан» РРЛ прямой видимости, входящие в состав фиксированной службы, могут работать на первичной основе в совмещённых полосах частот, как со спутниковыми системами связи, так и с другими наземными системами связи. Ясно, что при такой работе существует вероятность возникновения взаимных помех. C целью уменьшить помехи со стороны РРЛ на оборудование других систем связи на параметры РРЛ накладываются определённые ограничения:

* (*РT*×*ηT*)макс ≤ 13дБВт при *f*=1-10 ГГц;
* (*РT*×*ηT*)макс ≤ 10дБВт при *f*>10 ГГц;
* (*РT*×*ηT*×*GA*)макс ≤55дБВт при *f*> 1 ГГц.

На практике производится расчёт взаимных помех, которые зависят от ряда факторов, включающих мощности передатчиков, тип модуляции, усиление антенн в направлении мешающих сигналов, допустимые уровни помех на входе приёмников, механизмы распространения радиоволн, радиоклиматические условия, расстояние между станциями и профиль окружающей местности. Для спутниковых станций строятся координационные зоны и в том случае если станции РРЛ оказываются за пределами этих зон, расчёты взаимных помех можно не проводить.

**Сигналы групповых и линейных трактов многоканальных систем радиосвязи**

**Принципы построения аппаратуры с частотным разделением каналов -ЧРК**

В аппаратуре систем передачи с ЧРК принято использовать следующие стандартные группы каналов:

* ПГ (первичная группа) состоит из 12 каналов ТЧ;
* ВГ(вторичная группа) состоит из 5 первичных групп (60 каналов ТЧ);
* ТГ(третичная группа) состоит из 5 вторичных групп (300 каналов ТЧ);
* ЧГ (четверичная группа) состоит из 3 третичных групп (900 каналов ТЧ).

Пояснение группообразования в многоканальных системах с ЧРК можно дать с помощью следующей схемы:

1 кан

2 кан

11 кан

12 кан

*f* кан. подн.

*f* нес. груп.

*f* нес.

ГУ

...

Рис. 20

Рисунок 21, приведённый ниже, иллюстрирует принцип формирования спектра первичной группы каналов (ПГ).

60

108

0.3

G1(F)

F, кГц

3,4

0.3

G2(F)

3,4

F, кГц

0.3

GN(F)

3,4

F, кГц

F, кГц

12

11

2

1

Gгр

Рис.21.

Общая полоса частот стандартной ПГ - 48 кГц (от 60 до 108 кГц, на каждый канал отводится полоса частот 4 кГц). Преобразование спектра выполняют методом АМ-ОБП. На преобразователь каждого канала поступает сообщение и колебания канальных поднесущих. Колебания неиспользуемой БП (боковой полосы) и поднесущей подавляются полосовыми фильтрами на 60…65 дБ, чтобы ослабить помехи от соседних каналов. При дальнейшем укрупнении групп каналов групповые преобразователи работают по тем же принципам, что и канальные. Приведём спектр 24-канальной группы (2 ПГ), причём одна ПГ- стандартная, вторая - нестандартная (ширина полосы сохраняется, но спектр преобразован с инверсией).

F кГц

12

60

108

Гр А

Гр В

Рис. 22.

Приведём спектр основной стандартной вторичной группы (ВГ):

312

552

360

408

456

504

Gгр

F, кГц

Рис. 23.

На рисунке 24 ниже приведена структурная схема группового оборудования ВГ.

ПГ1

ПГ2

ПГ3

ПГ4

ПГ5

60…108

60…108

60…108

60…108

60…108

504…552

456…504

408…456

360…408

312…360

312…552кГц

420

468

516

564

612

Рис. 24.

Относительно мощностей групповых сигналов есть обоснованные Рекомендации МСЭ:

*Рср.гр*= 31,6×*N*, мкВт (в ТНОУ, *N*≥240);

эта же формула в логарифмическом виде принимает вид

*Рср.гр*= -15 +10 lg *N*, дБмО;

при *N* < 240 рекомендуется использовать:

*Рср.гр*= -1 + 4 lg *N*, дБмО.

Значение *Рпик.гр*(ε%) особенно важно знать при проектировании групповых усилителей, так как при перегрузке возрастает нелинейность амплитудной характеристики:

0,1æ(ε%)

*Pпик.гр*(ε%) = РСР.ГР ×10

При *N* > 240 рекомендуется

æ(ε =1%) = 8,3дБ;

æ(ε=0,1%) =10,1 дБ;

æ(ε→0) = 13дБ.

При æ = 10дБ *Рпик.гр* = 10 *Рпик.ср* - это квазипиковый уровень.

Мы рассмотрели сигналы и принципы построения групповых трактов аппаратуры с ЧРК. Остановимся на некоторых особенностях сигналов линейного тракта. Поскольку ЧМ производится случайным сигналом, то введено понятие эффективного значения девиации частоты:

Δ*fДЭ* = *КЧМ* ×*Uср.гр*,

где *КЧМ* [Гц/В]- крутизна характеристики ЧМД; *Uср.гр*– среднеквадратичное напряжение сигнала (*Рср. гр*).

При этом эффективное значение индекса модуляции будет равно

*mЭ =* Δ*fДЭ /FВ,*

где *FВ* – верхняя частота в спектре модулирующего сигнала.

Обычно в системах с ЧРК и ЧМ эффективные индексы модуляции при изменении числа каналов также значительно изменяются

*N* = 60 → 1920; *mЭ* = 2,56 → 0,01625.

Это объясняется тем, что с ростом N, а, следовательно, и FВ нельзя соответственно увеличивать и Δ*fДЭ*, поскольку при КЧМ= const должно возрастать UПИК.ГР и отсюда линейный участок модуляционной характеристики.

На практике крутизну характеристики ЧМД устанавливают по измерительному сигналу (800Гц, 1мВт). При подаче этого сигнала в один из каналов ТЧ в ТНОУ на выходе ЧМД определяют эффективное измерительное значение девиации частоты на канал Δ*f ДК*, рекомендованное МСЭ (например, при *N*= 300…1000 рекомендовано Δ*f ДК* = 200 кГц).

А далее Δ*fд.пик*= Δ*fДК*  и ширину спектра сигнала на выходе ЧМД можно определить по формуле:

Δ*fЧМ* ≈ 2 (Δ*fд.пик* + *FB*).

Остановимся кратко на параметрах ЧМ радиосигнала при передаче ТВ сигналов. По Рекомендациям МСЭ при подаче на ЧМД полного ТВ сигнала на его выходе должен быть полный размах частоты Δ*f*ПТВ = 8 МГц. Размаху же сигнала от уровня черного до уровня белого будет соответствовать размах частоты Δ*fИ* = 5,6 МГц (8МГц×0,7).

Исходя из этих рекомендаций, линейный участок модуляционной характеристики ЧМД должен быть 8 МГц. На практике при смене сюжета изменяется постоянная составляющая сигнала ТВ, полный размах сигнала может увеличиться примерно в 1,5 раза и это потребует увеличения модуляционной характеристики до 12 МГц. Чтобы избежать этого вводят предискажающий контур (ПК), который ослабляет компоненты ПТВС на частотах ниже 1,5 МГц (значительно ослабляя постоянную составляющую, как бы “симметрируя” ПТВС) и тем самым облегчает требования к модуляционной характеристике ЧМД, сохраняя размер линейного участка 8МГц. На приёмной стороне ставят восстанавливающий контур.

**Принципы построения аппаратуры с временным разделением каналов - ВРК**

При временном разделении каналов (ВРК) канальные сигналы передаются по одной линии поочередно (не перекрываясь по времени). Канальные сигналы (последовательности импульсов) являются переносчиками информации. При импульсных видах модуляции (АИМ, ШИМ, ФИМ) эта информация заключена либо в амплитуде, либо во временном положении, либо в длительности передаваемых импульсов. При цифровых видах модуляции (ИКМ, ДМ) информация заключена в кодовых комбинациях импульсов, либо в комбинациях их полярностей. При любых видах модуляции первый этап преобразования непрерывных сигналов – дискретизация (FД ≥ 2FМАКС ). Принцип формирования группового сигнала при ВРК показан на рисунке 25 ниже. Здесь берутся поочередные выборки отдельных сигналов, формируя групповой АИМ-сигнал.

Однако, поскольку при импульсных видах модуляции и помехоустойчивость, и пропускная способность значительно ниже, предпочтение отдают цифровым видам.

При ИКМ передача непрерывных сообщений сводится к передаче кодовых групп, отображающих квантованные уровни сообщений в моменты отсчёта по шкале времени. Рассмотрим, как формируется цифровой телефонный сигнал (режим ИКМ).

1 кан

2 кан

3 кан

Рис. 25

Частота дискретизации принята *FД* =8 кГц, число уровней квантования *L*= 256 (число импульсов в кодовой комбинации *n* = 8), при этом скорость цифрового сигнала составляет 64 кбит/c.

При квантовании допускается ошибка (появляются импульсы разности фактических и квантованных уровней). Это есть шумы квантования. Средняя мощность шумов квантования (при равновероятных значениях всех уровней сигнала) может быть определена по формуле:

*PКВ* = Δ² /12, Δ – шаг квантования.

Предпочтение отдают неравномерному квантованию (Δ = var), чтобы обеспечить одинаковую защищённость сигналов от шумов ( АЗ.КВ = 10 lg РС / PКВ ).

Иерархические ступени цифровых каналов отличаются от аналоговых.

Существует 2 наиболее широко используемых во всем мире стандарта по группообразованию и кодированию канала – СЕПТ (Европейский) и Североамериканский. В СЕПТ выходная скорость передачи равна 2048 кбит/с, или Е1 (ПГ образуется из 32 основных цифровых каналов по 64 кбит/c), а в Североамериканском стандарте объединяются 24 канала для получения выходной скорости передачи 1544 кбит/с, или DS1.

В СЕПТ мультиплексоре второго порядка объединяются четыре сигнала 2048 кбит/с в целях получения плезиохронного выходного сигнала 8448 кбит/с, или Е2 (плезиохронные сигналы имеют скорости передачи, которые в разное время неодинаковы). В СЕПТ мультиплексоре 3-го порядка объединяются четыре сигнала 8448 кбит/c, чтобы получить на выходе скорость Е3- 34,368Мбит/c. В СЕПТ мультиплексоре 4-го порядка объединяются четыре сигнала 34,368 Мбит/c в целях получения выходного потока битов 139,264 Мбит/c (Е4).

Иерархия Североамериканского стандарта состоит из уровней DS1, DS2, DS3 и DS4, но в настоящее время используются в основном DS1(1544кбит/c) и DS2(6312кбит/c).

Из приведённых данных видно, что скорости передачи на выходе мультиплексоров немного выше, чем произведение входной скорости передачи на число каналов. Причина этого – дополнительные биты, которые требуются, чтобы а) обеспечить кодирование данных; б) обеспечить интервалы для вставки согласующих импульсов.

Принцип чередования битов, используемый в плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ), позволяет получить доступ к группообразованию только на следующем более низком иерархическом уровне. Доступ к ещё более низким уровням, например, для выделения и восстановления сигналов требует полной цепочки демультиплексор/мультиплексор.

Этот недостаток устраняется при синхронном группообразовании. Синхронные методы группообразования с использованием новых синхронных форматов кадра и чередования байтов при уплотнении позволяют в принципе обеспечить прямой доступ ко всем нижним подчинённым уровням до 64 кбит/c. Стандартный формат, который применяется во всём мире, получил название “синхронная цифровая иерархия”, или СЦИ. Основной формат сигнала дан при помощи “синхронного транспортного модуля- уровень 1”, или сокращённо СТМ-1. Скорость передачи СТМ-1 155,52 Мбит/c может быть приспособлена под американские и европейские (СЕПТ) ПЦИ скорости передачи сигналов.

Приведённые выше скорости – это скорости передачи на входе и выходе цифровых радиосистем (*fB*). Скорость передачи в самой радиосистеме (*fBR*) обычно примерно на 6% выше (*fBR* =1,06*fB*), поскольку добавляются биты, отводимые для прямого исправления ошибок, а также добавочные вспомогательные биты, необходимые для внутреннего технического обслуживания радиосистемы и для уплотнения нескольких потоков битов разного стандарта.

Для конкуренции с существующими аналоговыми радиосистемами, которые высокоэффективны с точки зрения использования спектра, в цифровых системах поступающие потоки битов должны быть модулированы обычно на ПЧ в конфигурации с множеством состояний. Это снижает требования к используемой ширине частотной полосы или при данной ширине позволяет передавать потоки с большей скоростью. На практике находят применение различные виды

В предположении использования найквистовского косинусного импульса с коэффициентом избирательности α (0<α<1), имеем следующее выражение для ширины спектра сигнала:

Δ*FRF  = fBR* (1+α)/ log2 *s* = 1,06*fB* (1+*α*)/ log2*s*,

где *s* – число состояний в двумерной (фазовой) плоскости.

Это значение обычно приводится к одному из стандартизованных значений ширины полос частот путём соответствующего подбора коэффициента *α*. Окончательный выбор этого коэффициента делается с таким расчётом, чтобы спектр цифрового сигнала не выходил из границ соответствующей маски излучений, предписанной одной из международных организаций по стандартизации (Федеральная комиссия по связи США или Европейский институт стандартов электросвязи).

На основе приведённого выше уравнения получены следующие значения пропускной способности цифровых каналов (они приведены к стандартам МСЭ и соответствуют различной ширине полосы пропускания канала и различным способам модуляции).

Первые четыре строки таблицы 8 отведены для радиостволов с шириной полосы, кратной 3,5 МГц, которая используется в Европейской иерархии. Следующие четыре строки отведены для радиостволов с шириной полосы, кратной 2,5 МГц (Североамериканская иерархия).

Таблица 8

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ΔFBR,  МГц | Пропускная способность (α) | | |
| QPSK, 4fsk  *s*=4 | 16QAM  *s*=16 | 64QAM  *s*=64 |
| 3,5 | 2Е1 (0,61) | 4E1(0,61) | 8E1(0,21) |
| 7,0 | 4E1 (0,61) | 8E1(0,61) | 12E1(0,61 |
| 14 | 8E1 (0,61) | 1E3(0,54) | 1E3 (1,0) |
| 28 | 1E3 (0,54) | 2E3(0,54) | 2E3(0,54) |
| 2,5 | 2DS1 (0,53) | 4DS1(0,53) | 6DS1(0,53) |
| 5,0 | 4DS1 (0,53) | 8DS1(0,53) | 12DS1(0,53) |
| 10 | 8DS1 (0,53) | 16DS1(0,53) | 1DS3 (0,27) |
| 20 | 16DS1(0,53) | 1DS3(0,69) | 2DS3 (0,27) |

Эффективность использования спектра, выраженная в бит/c на Герц (бит/c/Гц), может быть получена из выражения:

*η* = *fBR* /Δ*FRF* = log2 *s* /(1+*α*).

Значения эффективности находятся в диапазоне от 1,25 бит/c/Гц для QPSK до примерно 6 бит/c/Гц для 512QAM. В США требования к минимальному значению эффективности для цифровых радиосистем, работающих в диапазонах ниже 15 ГГц, были установлены из расчёта, чтобы количество телефонных каналов было таким же как и в аналоговом радиостволе, занимающем ту же полосу частот. Отсюда следует, что в качестве методов модуляции в данном случае должны использоваться либо 16QAM, либо 64QAM, в результате чего достигается эффективность в диапазоне от 2,5 до 4,6 бит/c/Гц. Ясно, что применение принципа соответствия заполнения аналогового радиоствола было продиктовано также экономическими соображениями.

В диапазоне выше 15 ГГц, где больше свободного частотного пространства, требования к эффективности использования спектра были снижены до 1бит/c/Гц, что позволяет использовать более простую схему модуляции QPSK или эквивалентные ей.