

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R SM.1046-3
(09/2017)

Определение использования радиочастотного спектра и эффективности радиосистемы

Серия SM
Управление использованием спектра



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Приложение 1 – Общие критерии оценки коэффициента использования спектра и спектральной эффективности	3
1 Коэффициент использования спектра	3
2 Эффективность использования спектра (SUE).....	4
3 Относительная спектральная эффективность (RSE).....	5
4 Сравнение спектральных эффективностей	6
Приложение 2 – Примеры использования спектра различными службами	6
1 Использование спектра сухопутными подвижными радиосистемами	6
1.1 Спектральная эффективность внутренней пикосотовой радиосистемы.....	6
1.1.1 Пикосотовая система, охватывающая здание.....	6
1.1.2 Пикосотовая система, охватывающая деловой центр города	7
1.2 Относительная спектральная эффективность (RSE) сухопутной подвижной радиосистемы.....	8
1.3 Эффективность использования спектра (SUE) сухопутных подвижных радиосистем	9
1.3.1 Вычисление индекса занимаемого и исключенного спектра.....	11
1.3.2 Результаты.....	12
1.4 SUE сухопутных подвижных радиосистем (метод измерения)	15
1.5 SUE сухопутных подвижных радиосистем (альтернативный метод)	15
1.5.1 Введение.....	15
1.5.2 Определение полезного эффекта	15
1.5.3 Определение коэффициента использования спектра.....	16
1.5.4 Проведение расчета эффективности использования спектра	17
1.5.5 Плотность настройки спектра (альтернативный метод расчета коэффициента использования спектра).....	17
1.5.6 Степень использования спектра.....	19
2 Использование спектра радиорелейной системой	20
2.1 Введение.....	20
2.2 SUE для протяженных магистралей с ответвляющимися линиями в узлах	21
2.3 SUE в произвольно расположенных радиорелейных линиях	22
2.3.1 Формулы.....	22
2.3.2 Пример: спектральная эффективность радиорелейной системы в диапазоне 2 ГГц.....	24

2.3.3	SUE произвольной узловой сети.....	26
2.4	Оценка способности экономии спектра новых технологий цифровых радиорелейных систем.....	28
2.4.1	Введение.....	28
2.4.2	Антенны	30
2.4.3	Модуляция	32
2.4.4	Обработка сигнала.....	35
2.4.5	Кодирование с коррекцией ошибок.....	35
2.4.6	Адаптивный/трансверсальный корректор.....	36
2.4.7	Кодирование с коррекцией ошибок и адаптивные корректоры.....	37
2.4.8	Выводы	37
2.5	RSE для однопролетных сельских радиорелейных линий	38
2.6	Использование спектра системами связи "из пункта в пункт" (СПП)	38
2.6.1	Введение.....	38
2.6.2	Определение полезного эффекта для системы СПП.....	39
2.6.3	Определение коэффициента использования спектра для систем СПП.....	40
2.6.4	Проведение расчета SUE для систем СПП	42
3	Использование спектра системами телевизионного и аудиорадиовещания	46
3.1	Введение.....	46
3.2	Определение полезного эффекта для системы телевизионного радиовещания.....	46
3.3	Определение коэффициента использования спектра для систем ТВ-радиовещания.....	48
3.4	Проведение расчета SUE для систем ТВ-радиовещания.....	49
3.5	Примечания в отношении оценки SUE для систем звукового радиовещания	49

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SM.1046-3

**Определение использования радиочастотного спектра
и эффективности радиосистемы**

(1994-1997-2006-2017)

Сфера применения

Настоящая Рекомендация определяет эффективность и порядок использования радиочастотного спектра для различных систем радиосвязи с помощью теоретических и измерительных моделей.

Ключевые слова

Радиосвязь, спектральная эффективность, использование радиочастотного спектра

Сокращения/гlossарий

AM-SSB	Amplitude modulation – single-side band	AM-ОБП	Однополосная амплитудная модуляция
BER	Bit error ratio		Коэффициент ошибок по битам
C/N	Carrier to noise		Отношение несущей к шуму
CHR	Conical horn reflector		Коническая рупорно-рефлекторная (антенна)
CSD	Carrier spectrum density		Плотность спектра несущей
EMC	Electro magnetic compatibility	ЭМС	Электромагнитная совместимость
FEC	Forward error correction		Упреждающая коррекция ошибок
FM	Frequency modulation	ЧМ	Частотная модуляция
MTES	Most theoretically efficient system		Теоретически наиболее эффективная система
OCR	Off channel rejection		Ослабление сигнала вне полосы пропускания
P-P	Point to point		Пункт-пункт
PSK	Phase-shift keying	ФМН	Фазовая манипуляция
PCM	Pulse-code modulation	ИКМ	Импульсно-кодовая модуляция
QAM	Quadrature amplitude modulation	КАМ	Квадратурная амплитудная модуляция
RSE	Relative spectrum efficiency		Относительная спектральная эффективность
SHD	Shrouded dish		Параболическая, защищенная кожухом (антенна)
SSD	Spectrum setting density		Плотность настройки спектра
STD	Standard-dish		Стандартная параболическая (антенна)
SUE	Spectrum utilization efficiency		Эффективность использования спектра
TIA	Telecommunications Industry Association, USA		Отраслевая ассоциация в области электросвязи (США)
UHF	Ultra high frequency	УВЧ	Ультравысокая частота
VHF	Very high frequency	ОВЧ	Очень высокая частота

Соответствующие Рекомендации и Отчеты МСЭ

Рекомендация МСЭ-R F.699	Эталонные диаграммы направленности антенн фиксированных беспроводных систем для использования при изучении вопросов координации и оценке помех в диапазоне частот от 100 МГц до примерно 70 ГГц
Рекомендация МСЭ-R P.530	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости
Рекомендация МСЭ-R SM.1047	Управление использованием спектра на национальном уровне
Рекомендация МСЭ-R SM.1880	Измерение и оценка занятости спектра
Отчет МСЭ-R SM.2015	Методы определения долгосрочных национальных стратегий использования спектра
Отчет МСЭ-R SM.2256	Измерение и оценка занятости спектра
ПРИМЕЧАНИЕ. – В каждом случае следует использовать последнее издание действующей Рекомендации/Отчета.	

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что спектр является ограниченным природным ресурсом, имеющим большое экономическое и социальное значение;
- b) что потребность использования спектра быстро возрастает;
- c) что много различных факторов, таких как использование различных полос частот для отдельных радиослужб, соответствующие методы управления использованием спектра для сетей в этих службах, технические характеристики передатчиков, приемников и антенн, используемых в службах и т. д., существенно влияют на эффективность использования спектра и что путем их оптимизации, особенно применительно к новым и улучшенным технологиям, можно достичь значительной экономии спектра;
- d) что имеется необходимость определения степени и эффективности использования спектра как инструмента сравнения и анализа, позволяющего оценить преимущества, полученные с помощью новых или улучшенных технологий, особенно для администраций при их национальном долгосрочном планировании использования спектра и развития радиосвязи;
- e) что сравнение эффективности использования спектра различными существующими радиосистемами будет весьма полезно при разработке новых или улучшенных технологий и для оценки качества имеющихся систем,

рекомендует,

- 1** чтобы за основу был принят параметр "ширина полосы–пространство–время", являющийся мерой оценки использования спектра – "коэффициент использования спектра", как это описано для приемного и передающего оборудования в Приложении 1;
- 2** чтобы основой для расчета эффективности использования спектра (SUE) или, кратко, эффективности спектра было определение полезного эффекта, получаемого радиосистемами посредством использования спектра, и коэффициента использования спектра, как показано в Приложении 1. Некоторые примеры использования этой концепции даны в Приложении 2;
- 3** чтобы основной принцип относительной спектральной эффективности, представленный в Приложении 1, использовался для сравнения спектральной эффективности между радиосистемами;
- 4** чтобы любое сравнение спектральной эффективности осуществлялось только между подобными радиосистемами, представляющими идентичные службы радиосвязи, как это показано в пункте 4 Приложения 1;

5 чтобы при определении спектральной эффективности учитывалось взаимовлияние различных радиосистем и радиосетей в данной электромагнитной обстановке.

В Приложениях 1 и 2 представлены теоретическая модель (U), модель измерений (U') и примеры использования спектра различными службами.

Приложение 1

Общие критерии оценки коэффициента использования спектра и спектральной эффективности

1 Коэффициент использования спектра

Эффективность использования спектра достигается (среди прочих факторов) защищенностью, получаемой с помощью направленности антенны, географического разнесения, совместного использования частот, ортогональной поляризации, временного совмещения или разделения использования частот – все эти обстоятельства влияют на определение использования спектра. Следовательно, мера использования спектра – коэффициент использования спектра (U) определяется как произведение ширины полосы частот, геометрического (географического) пространства и времени, которые исключены для предоставления связи другим возможным пользователям:

$$U = B \cdot S \cdot T, \quad (1)$$

где:

B : ширина полосы частот;

S : геометрическое пространство (обычно площадь);

T : время.

Рассматриваемое геометрическое пространство может быть также объемом, линией (например, геостационарная орбита) или угловым сектором относительно некоторой точки. Величина исключенного пространства зависит от спектральной плотности мощности. Во многих случаях фактор времени может быть игнорирован, поскольку служба работает постоянно. Однако для некоторых служб, например радиовещания или одноканальной подвижной, фактор времени важен для возможности совместного использования частот, поэтому все три фактора следует рассматривать одновременно и затем оптимизировать.

Мера использования спектра может быть вычислена перемножением ширины полосы, ограничивающей излучение (то есть ширины занимаемой полосы), и созданной ею зоны помех; она может также учитывать действительную форму спектральной плотности мощности излучения и характеристики излучения антенны.

Обычно радиопередатчики рассматриваются как пользователи ресурсов спектра. Они используют спектр-пространство, заполняя некоторую его часть радиомощностью такой величины, при которой в некоторых местах, в некоторое время и на некоторых частотах приемники других систем не могут работать из-за неприемлемых помех. Отметим, что передатчик ограничивает пространство только для приемников. Тот факт, что в пространстве уже содержится излученная мощность, никоим образом не препятствует другому передатчику излучать мощность в направлении того же места, то есть один передатчик не препятствует работе другого передатчика.

Приемники используют спектр-пространство постольку, поскольку они ограничивают его для передатчиков. Простая физическая работа одного приемника никак не мешает работе другого (исключая его непреднамеренную работу в качестве передатчика или источника питания). Даже в таком случае физически используемое пространство относительно мало. Однако администрации ограничивают выдачу лицензий на передатчики, стремясь гарантировать прием, свободный от помех.

Защита может быть обеспечена по пространству (пространственное разнесение, координационное расстояние), по частоте (защитные полосы) или даже во времени (в Соединенных Штатах Америки ограничивается работа некоторых СЧ-станций в светлое время суток). Эти ограничения составляют "использование" пространства приемником. Полосы для радиоастрономии являются примером того, как приемник использует частотно-пространственный объем.

Одним из способов объединения этих фактов в единицу измерения спектрального пространства является разделение ресурса на два пространства – пространство передатчика и пространство приемника – и определение двойных единиц для измерения использования каждого пространства. При необходимости упрощения эти две единицы могут быть рекомбинированы в одну меру использования системы.

Дальнейшая информация, касающаяся общего подхода к вычислению коэффициента использования спектра, может быть получена из Главы 8 Справочника по национальному управлению использованием спектра (Женева, 2005 г).

2 Эффективность использования спектра (SUE)

Согласно определению SUE (или, в сокращенной форме, эффективности спектра) системы радиосвязи, она может быть выражена комплексным критерием:

$$SUE = \{M, U\} = \{M, B \cdot S \cdot T\}, \quad (2)$$

где:

M : полезный эффект, получаемый с помощью рассматриваемой системы связи;

U : коэффициент использования спектра для этой системы.

Если необходимо, комплексный индикатор эффективности спектра может быть преобразован к простому индикатору: отношению полезного эффекта к коэффициенту использования спектра:

$$SUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T}. \quad (2a)$$

Метод вычисления SUE в уравнениях (2) и (2a) представляет собой теоретический подход. Когда администрации оценивают SUE самостоятельно, полезный эффект, получаемый с помощью системы связи (числитель M), не всегда известен. В этом случае его можно заменить коэффициентом использования спектра, полученным на основе фактических измерений (U'):

$$U' = B' \cdot S' \cdot T', \quad (2b)$$

где:

B' : результат измерения фактически занимаемой ширины полосы (или региональная статистика);

S' : результат измерения фактической зоны покрытия (или региональная статистика);

T' : результат измерения фактического времени работы (или региональная статистика).

Администрации в области радиосвязи могут получить три вышеуказанных параметра посредством измерений и статистики, собранной с помощью их собственных средств мониторинга. В случае региональной статистики можно использовать, например, среднее арифметическое результатов для каждого субрегиона.

Затем SUE можно выразить как:

$$SUE = \frac{U'}{U} = \frac{B' \cdot S' \cdot T'}{B \cdot S \cdot T}. \quad (2c)$$

3 Относительная спектральная эффективность (RSE)

Концепция относительной спектральной эффективности (RSE) может использоваться для сравнения спектральной эффективности двух подобных типов радиосистем, обеспечивающих одну и ту же службу.

Относительная спектральная эффективность определяется как отношение двух спектральных эффективностей, одна из которых может быть эффективностью системы, принимаемой для сравнения за стандарт. Тогда:

$$RSE = SUE_a / SUE_{std}, \quad (3)$$

где:

- RSE : относительная спектральная эффективность (отношение двух SUE);
- SUE_{std} : эффективность использования спектра "стандартной" системы;
- SUE_a : эффективность использования спектра рассматриваемой системы.

Наиболее вероятными кандидатами на стандартную систему могут быть:

- теоретически наиболее эффективная система;
- система, которая понятна и легко определяема;
- система, которая широко применяется, – фактический промышленный стандарт.

RSE выражается положительным числом со значением от нуля до бесконечности. Если за стандартную систему принята теоретически наиболее эффективная система, то значение RSE лежит в пределах от нуля до единицы.

Как пример, теоретически наиболее эффективная система может быть охарактеризована в соответствии с принципами теории информации. Пропускная способность канала связи, по которому абонент или слушатель получает полезное сообщение, определяется формулой:

$$C_0 = F_0 \ln (1 + \rho_0),$$

где:

- F_0 : ширина полосы передаваемого сообщения;
- ρ_0 : отношение сигнал/шум на выходе приемника.

Если отношение сигнал/шум на входе приемника равно защитному отношению ρ_s , а полоса частот канала, по которому передаются сигналы, равна F_m , то пропускная способность будет равна $C_p = F_m \ln (1 + \rho_s)$. Она должна превышать или быть по крайней мере равной пропускной способности канала, по которому абонент получает передаваемое ему сообщение, то есть $C_p \geq C_0$. Следовательно, минимальная возможная величина защитного отношения ρ_s , при котором абонент получит сообщение с отношением сигнал/шум, равным ρ_0 , может быть рассчитана по формуле:

$$\rho_s = (1 + \rho_0)^{F_0/F_m} - 1. \quad (4)$$

Главным преимуществом непосредственного вычисления относительной спектральной эффективности (RSE) является то, что ее часто легче вычислить, чем рассчитывать эффективности использования спектра (SUE). Поскольку системы обеспечивают одну и ту же службу, они имеют много общих факторов (включая даже физические компоненты). В результате многие факторы "сокращаются" при расчетах еще до того, как они будут вычислены в действительности. Зачастую это значительно снижает сложность вычислений.

Некоторые примеры расчета RSE можно найти в Приложении 2 и в Главе 8 Справочника по национальному управлению использованием спектра (Женева, 2005 г.).

4 Сравнение спектральных эффективностей

Как было показано в предыдущих разделах, величины SUE могут быть вычислены для некоторых различных систем и, конечно, могут быть сравнены для получения относительной эффективности систем. Однако такие сравнения нужно проводить с осторожностью. Например, SUE, рассчитанные для сухопутной подвижной радиосистемы и для радиолокационной системы, весьма различны. Скорость передачи информации, передатчики и приемники в этих двух системах настолько различны, что две SUE несоизмеримы. Пытаться сравнивать их бесполезно. Следовательно, сравнение спектральной эффективности может делаться только между подобными системами, обеспечивающими идентичные службы радиосвязи. Может быть полезным проведение сравнения спектральной эффективности для одной и той же системы в течение времени, чтобы пронаблюдать, имеется ли улучшение в определенной изучаемой области.

Нужно также отметить, что, хотя спектральная эффективность является важным фактором, поскольку она позволяет разместить в радиоспектре максимальное количество служб, она не должна быть единственным фактором, подлежащим рассмотрению. При выборе технологии или системы должны быть учтены и другие факторы, такие как стоимость, доступность оборудования, его совместимость с существующим оборудованием и техникой, надежность системы и ее эксплуатационные особенности.

Приложение 2

Примеры использования спектра различными службами

1 Использование спектра сухопутными подвижными радиосистемами

1.1 Спектральная эффективность внутренней пикосотовой радиосистемы

В случае внутренней пикосотовой системы в диапазоне частот от 900 МГц до 60 ГГц спектральная эффективность может быть также рассчитана по формуле (2). Исходя из этой формулы, спектральная эффективность пикосотовой радиосистемы может быть определена как:

$$\text{Эрланги} / (\text{ширина полосы} \times \text{площадь}), \quad (5)$$

где эрланги – это общий речевой обмен, обеспечиваемый пикосотовой системой; ширина полосы – это общий объем спектра, используемого системой; а площадь – общая площадь обслуживания, покрываемая системой. Поскольку пикосотовая система должна применяться в многоэтажном здании, при расчете спектральной эффективности используется общая площадь помещений этого здания. Число каналов, требующееся на одну ячейку, может быть рассчитано с помощью таблиц Эрланга "B" для заданного количества абонентов на этаже и величины обмена на одного абонента.

1.1.1 Пикосотовая система, охватывающая здание

Для того чтобы рассчитать общую ширину полосы, требующуюся для всего здания, необходимо знать расстояние повторного использования по вертикали, выраженную в этажах. Этот параметр зависит от межэтажных потерь и различен для различных типов зданий.

Общее число полудуплексных каналов, требующееся для здания, может быть рассчитано и будет равно:

$$2 \times \text{число каналов на ячейку} \times \text{число ячеек на этаж} \times \text{число этажей для развязки частот.}$$

Для расчета числа каналов, необходимого для двустороннего обмена, нужен коэффициент 2.

Спектральная эффективность, $SUE_{\text{здания}}$, системы, обеспечивающей охват здания, может быть рассчитана исходя из формулы (5):

$$SUE_{\text{здания}} = \frac{\text{Общий обмен, ведущийся во всем здании}}{\text{Общее число каналов} \times \text{ширина полосы канала} \times \text{общая площадь этажа}}. \quad (6)$$

Пример:

В заданной внутренней системе, работающей на 900 МГц

Ширина канала (полудуплекс)	25 кГц
Число каналов на ячейку	10
Число ячеек на этаж	4
Число этажей для развязки частот	3
Общее число требуемых каналов	120

При степени обслуживания 0,5% обмен, проходящий на одном этаже = $T_f = 16$ Э или $2 T_f$ при учете как базовых, так и подвижных станций.

$$SUE_{\text{здания}} = \frac{16 \times \text{количество этажей}}{120 \times 0,025 \times \text{общая площадь этажа}}. \quad (7)$$

Если площадь этажа $25 \text{ м} \times 55 \text{ м}$, $SUE_{\text{здания}} = 3880 \text{ Э/МГц/км}^2$.

1.1.2 Пикосотовая система, охватывающая деловой центр города

Подобным же образом может быть рассчитана ширина полосы, требующаяся для всей центральной части города, если известно горизонтальное расстояние повторного использования частот. Опять же, этот параметр зависит от материала зданий и потерь распространения сигнала при его входе и выходе из здания. Расстояние повторного использования частот непосредственно влияет на число зданий, которые могут быть объединены в группу (или группу помех).

В этом случае общее число полудуплексных каналов, требующихся для делового центра города, равно:

$$2 \times \text{число каналов на здание} \times \text{число зданий в группе}.$$

Для расчета количества каналов, необходимых для двустороннего обмена, снова нужен коэффициент 2.

Спектральная эффективность, $SUE_{\text{района}}$, для системы, обеспечивающей покрытие всего центра города, может быть вычислена с использованием формулы (5):

$$SUE_{\text{района}} = \frac{\text{Общий обмен, ведущийся на обслуживаемой площади}}{\text{Общее число каналов} \times \text{ширина полосы канала} \times \text{общая площадь обслуживания}}. \quad (8)$$

Здесь общая площадь обслуживания – это общая поэтажная площадь всех зданий, охватываемых пикосотовой системой.

Пример:

В заданной внутренней системе, работающей на 900 МГц:

Число каналов на здание	120
Число зданий в группе	4
Ширина полосы канала (полудуплекс)	25 кГц
Общее число требующихся каналов	480

$$SUE_{\text{района}} = \frac{16 \times \text{количество этажей} \times \text{количество зданий}}{120 \times 4 \times 0,025 \times \text{общая поэтажная площадь зданий}} = 970 \text{ Э/МГц/км}^2. \quad (9)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительная информация может быть получена в:

CHAN, G. and HACHEM, H. [September, 1991] Spectrum efficiency of a pico-cell system in an indoor environment. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec City, Canada.

HATFIELD, D.N. [August, 1977] Measures of spectral efficiency in land mobile radio. IEEE Trans. *Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 3, 266-268.

1.2 Относительная спектральная эффективность (RSE) сухопутной подвижной радиосистемы

Величины RSE для сухопутных подвижных радиосистем, использующих различные методы модуляции, были сравнены с теоретически наиболее эффективной системой (см. пункт 3 и формулу (4) в Приложении 1).

В целях упрощения и для получения законченных аналитических выражений расчеты были произведены для простой модели сети в форме идеального прямоугольника и при условиях распространения радиоволн, типичных для диапазона УВЧ. Однако для более сложных моделей реальных сетей и при более сложных и детальны условиях распространения будут иметь место те же основные закономерности.

Модель сети строится на основе квадратных зон равной площади с центральной (базовой) станцией, расположенной в центре квадрата (см. рисунок 1). Считаем, что размеры зоны обслуживания (радиус r) заданы. В зонах на рисунке 1, помеченных одинаковыми цифрами, используются одинаковые наборы частотных каналов при условии, что разнос R между этими зонами обеспечивает достаточное подавление помех. Считаем, что антенны базовых станций не обладают направленностью в горизонтальной плоскости и используют только один вид поляризации.

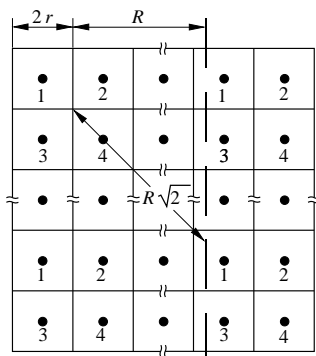
В принятой модели передатчики всех базовых станций имеют одинаковые мощности, стабильные частоты и не создают каких-либо внеполосных или паразитных излучений, а приемники обладают идеальной избирательностью.

Результаты расчетов RSE для нескольких конкретных типов модуляции при различных отношениях сигнал/шум на выходе приемника (ρ_0) представлены на рисунке 2. Рассматривались следующие виды модуляции:

- однополосная амплитудная модуляция (АМ-ОБП);
- частотная модуляция (ЧМ);
- 4(8)-уровневая фазовая манипуляция (4(8)-ФМН);
- 16-позиционная квадратурная амплитудная модуляция (16-КАМ).

РИСУНОК 1

Модель сети



Как видно из рисунка 2, сухопутная подвижная система с ЧМ имеет наименьшую RSE, поскольку при использовании такого метода модуляции для развертывания сети необходима ширина полосы приблизительно в пять раз больше, чем в случае теоретически наиболее эффективной системы (MTES). С другой стороны, метод модуляции, который наиболее близок к MTES при всех защитных отношениях от шумов, является 16-КАМ. Для удовлетворительного развертывания сети такая система требует полосу частот лишь в 1,5 раза большую, чем для MTES. Если требования в отношении качества приема не очень высоки, то в этом случае наиболее близкой к MTES является АМ-ОБП. Однако RSE для АМ-ОБП значительно понижается по мере увеличения требований к качеству приема, в особенности если учитывать влияние нестабильности частот реальных передатчиков.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительную информацию можно найти в Приложении IV к Отчету 662-3 (Дюссельдорф, 1990 г.).

1.3 Эффективность использования спектра (SUE) сухопутных подвижных радиосистем

Для обычной диспетчерской сухопутной подвижной радиосистемы SUE может быть рассчитана по формуле (2) следующим образом:

$$SUE = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} = \frac{Occ}{B \cdot S}, \quad (10)$$

где:

- B : рассматриваемая суммарная полоса частот в полосах частот сухопутной подвижной службы;
- S : площадь рассматриваемой зоны;
- Occ : суммарная занятость зоны;
 = занятость на 1 передатчик \times число передатчиков в зоне;
 = переданная информации/время передачи.

Суммарная занятость в коэффициенте площади:

$$Occ = \frac{M}{T}, \quad (11)$$

где:

- M : передаваемая информация;
- T : время передачи.

Для обычных диспетчерских сухопутных подвижных радиосистем географическую зону покрытия можно представить как матрицу значений ячеек (представленных в виде матрицы $i \times j$ размером m). Каждая ячейка определяется как область S_0 . И в этой географической области имеется n станций. Таким образом, Occ определяется уравнением:

$$Occ = \sum_0^m F_n = \sum_0^{i \times j} F_n(i, j), \quad (12)$$

где:

- m : размер матрицы ($i \times j$);
- $F_n(i, j)$: суммарная занятость ячейки (области матрицы единичной площади).

В зависимости от характеристик передачи и распространения передаваемый сигнал будет охватывать определенную область, в данном случае – определенное количество ячеек. Ячейка считается занятой, если доля зоны покрытия в ячейке достигает заданного порогового значения. Следовательно,

$$\eta = \frac{\sum_1^n S_n}{S_0} \quad (n \geq 1), \quad (13)$$

где:

S_0 : площадь ячейки;

S_n : зона покрытия текущей станции в ячейке.

И при $n = 0$, $\eta = 0$.

В общем случае, если зона покрытия занимает более 10% площади ячейки, она считается занятой. Суммарная занятость ячейки:

$$F_n(i, j) = \frac{M_n}{T_n} (\eta \geq 0, 1), \quad (14)$$

где:

M_n : информация, передаваемая станцией;

T_n : время передачи в ячейке.

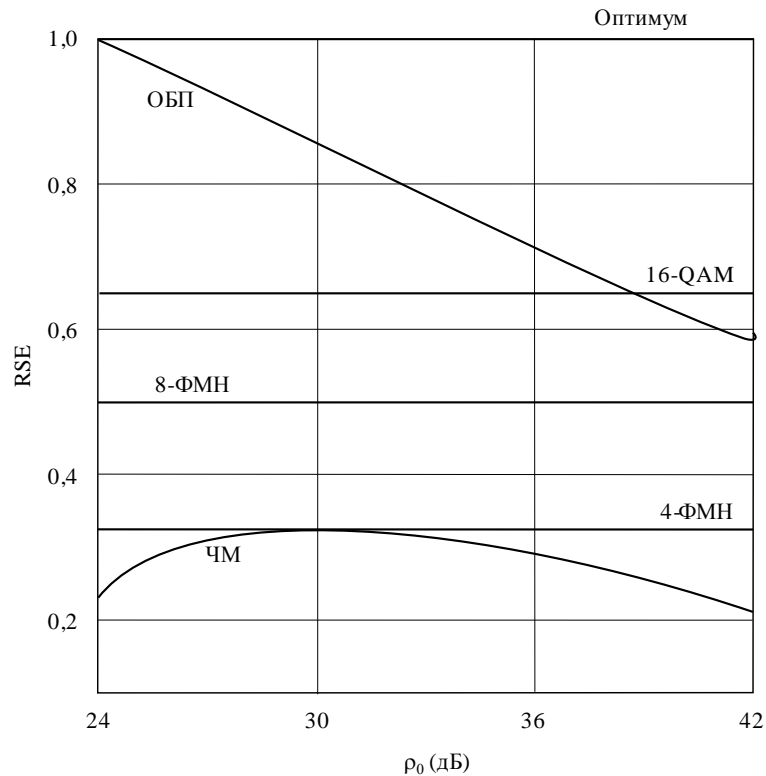
Показатель SUE ячейки определяется как суммарная занятость ячейки всеми n станциями в данной географической области, деленная на общий размер рассматриваемого спектра B и площадь ячейки S_0 . Таким образом, средний показатель SUE географической области можно получить, разделив суммарную занятость на территории города на общий размер рассматриваемого спектра и общую площадь S .

$$\text{Показатель ячейки} = \frac{F_n}{B \cdot S_0} \quad (15)$$

$$\text{Средний показатель} = \frac{O_{cc}}{B \cdot S}. \quad (16)$$

Основной задачей, таким образом, является расчет суммарной занятости зоны. В данной методике это делается путем подразделения зоны на соты, в каждой из которых расположена базовая станция. В зависимости от мощности передатчика и условий распространения радиоволн передаваемый сигнал покрывает определенную площадь, в данном случае несколько сот. Таким образом, суммируя площади сот, покрытых данным сигналом, может быть вычислена занятость, получаемая в результате данной передачи. Однако, если несколько станций используют одну и ту же частоту, занятость следует поделить на число таких станций. При определении суммарного количества передач следует учитывать все станции.

РИСУНОК 2
RSE сети при различных методах модуляции



SM.1046-02

Например, географическая зона размерами 76 км × 76 км в целях расчета разбита на сотовую матрицу. Каждая сота представляет собой площадь 2 км × 2 км. Сота считается занятой, если круговая зона покрытия, характеризующаяся параметром d (определяемым в следующем разделе), занимает более 10% площади данной соты. Суммарная занятость соты определяется с учетом каждой имеющей силу лицензии или станции в рассматриваемой полосе частот.

1.3.1 Вычисление индекса занимаемого и исключенного спектра

При данном анализе производится расчет индекса занимаемого спектра и комплексных индексов занимаемого и исключенного спектра. Первый из этих индексов представляет собой меру, определяющую, как данная часть спектра используется, в то время как два других индекса являются показателями того, как спектр используется и насколько при этом исключается его использование другими пользователями.

Как было сказано в предыдущем разделе, для расчета индекса необходимо сначала определить величину расстояния покрытия, d , которая определяется уравнением:

$$L(d, f, h_t, h_r) = P_t + G_r - P_{ibm} - \text{OCR}(\Delta f), \quad (17)$$

где:

$L(d, f, h_t, h_r)$: модель распространения;

P_t : э.и.и.м. (дБВт);

G_r : усиление приемной антенны (дБи);

P_{ibm} : средняя мощность сигнала, принятого подвижной станцией (дБВт);

OCR : ослабление сигналов вне полосы пропускания;
 f : частота передачи (МГц);
 h_t : высота антенны базовой станции (м);
 h_r : высота антенны подвижной станции (м).

Чтобы получить индекс для занятого спектра, нужно приравнять OCR (Δf) нулю.

Для расчета d для различных значений частотного разнеса необходимо использовать разные значения OCR (Δf).

Например, на основе модели распространения Окумура-Хата из Рекомендации МСЭ-R P.529 d в пределах 20 км можно рассчитать следующим образом:

$$d = \text{anti log} \left[\frac{P_t + G_r - P_{ibm} - \text{OCR}(\Delta f) - 26,16 \log f + 13,82 \log h_t + (1,1 \log f - 0,7) h_r - (1,56 \log f - 0,8)}{44,9 - 6,55 \log h_t} \right]. \quad (18)$$

Будем считать, что антенна базовой станции ненаправленная. При анализе также используются координаты базовой станции, которые определяют положение центра круговой зоны покрытия в сотовой матрице.

Для получения индекса занимаемого спектра надо взять P_{ibm} , равное -128 дБВт, и OCR (Δf), равное нулю.

В отношении сухопутной подвижной радиосистемы интерес представляет не только индекс занимаемого спектра, но и индекс исключенного спектра. Исключенный спектр определяется на базе того факта, что соседние каналы присвоенных частиц не могут использоваться в пределах определенных расстояний разнеса от базовых станций, поскольку при этом будут иметь место помехи. Это расстояние зависит от нескольких параметров, в том числе от частотного разнеса. Для вычисления этого расстояния при различных частотных разнесах следует взять P_{ibm} , равное -145 дБВт, и соответствующие различные величины OCR (Δf).

На основе формы (маски) спектра внеполосного излучения величины используемого коэффициента OCR (дБ) при расстройке каналов по частоте на Δf (кГц) составляют:

Δf	0	± 25	± 50	± 75	± 100
OCR	0	57,1	58,6	58,6	58,6

Используя эти величины, можно получить расстояния, сравнимые с расстояниями при реальных условиях распространения; при одном из комплексов данных и в соответствии с расчетами расстояний покрытия получаем занимаемое расстояние, равное 21,9 км. Соответствующие величины исключенного расстояния для $\Delta f = 0, \pm 25$ кГц, ± 50 кГц и далее составляют соответственно 69,2 км, 1,5 км и 1,3 км.

1.3.2 Результаты

Для иллюстрации данной методики расчета SUE приведены результаты таких расчетов для площадей 5776 км² вокруг центров 10 больших канадских городов для полосы 138–174 МГц. В таблицу 1 включены индекс занимаемого спектра и индекс исключенного и занимаемого спектра.

Данные, использованные для определения суммарной занятости, извлечены из базы данных Канадской системы присвоения и лицензирования.

Рассматриваемые в данном исследовании полосы частот сухопутной подвижной службы включают как полосу 138–174 МГц в диапазоне ОВЧ, так и полосы 406–430 МГц и 450–470 МГц в диапазоне УВЧ. Разнос каналов в полосах ОВЧ составляет 30 кГц, в полосах УВЧ – 25 кГц.

ТАБЛИЦА 1

Индексы занимаемого и исключенного спектра (138–174 МГц)

$\text{Э/кГц/км}^2 \times 10^{-3}$	Индексы занимаемого и исключенного спектра	Индекс занимаемого спектра
Торонто	4,19	1,33
Оттава	4,54	1,30
Виндзор	3,68	0,87
Монреаль	3,56	0,88
Сент-Джон	3,24	0,65
Галифакс	3,32	0,68
Ванкувер	3,20	0,62
Виннипег	3,31	0,74
Калгари	3,05	0,73
Эдмонтон	2,99	0,60

Кроме того, представлены графические результаты для Ванкувера, в той же полосе 138–174 МГц. На рисунке 3 представлено трехмерное изображение матрицы величин, в данном случае для исключенного и занимаемого спектра. Эта матрица наложена на карту города для иллюстрации использования информации с учетом картографических подробностей. Такое представление в значительной мере повышает возможности по интерпретации этой информации. Как видно из рисунка 4, максимальная величина занимаемого спектра в соте в центре города составляет $1,7 \times 10^{-3}$ э/кГц/км². Максимальная величина занимаемого и исключенного спектра в соте в этой полосе частот составляет $4,9 \times 10^{-3}$ э/кГц/км², причем эта величина наблюдается как раз в северной и западной частях центра города, как это видно из рисунка 5. Эта зона соответствует району высокой деловой активности центра города Ванкувер.

РИСУНОК 3

Трехмерное представление индекса занимаемого и исключенного спектра для Ванкувера

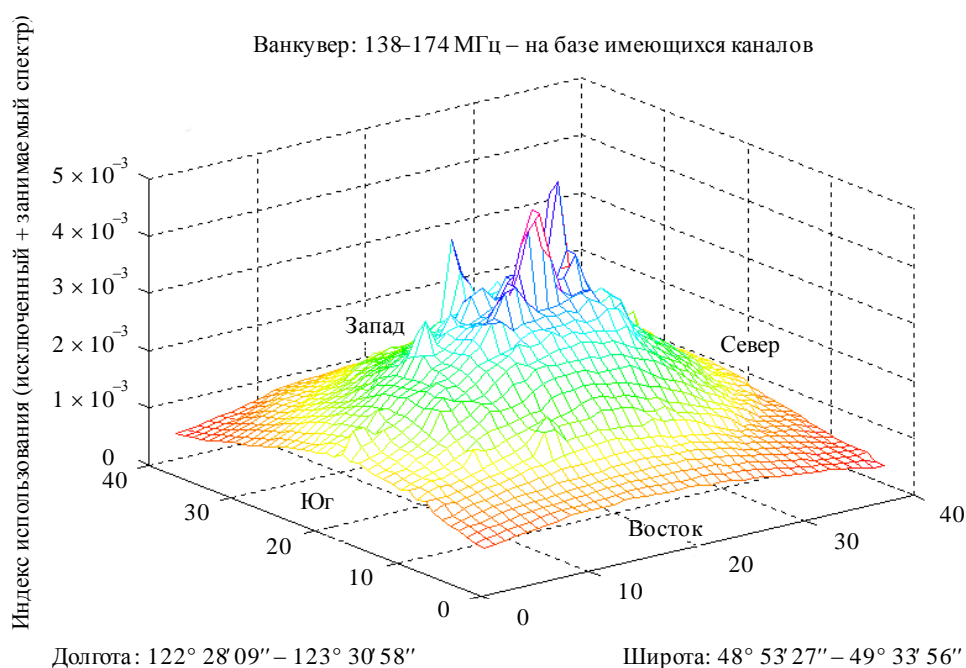
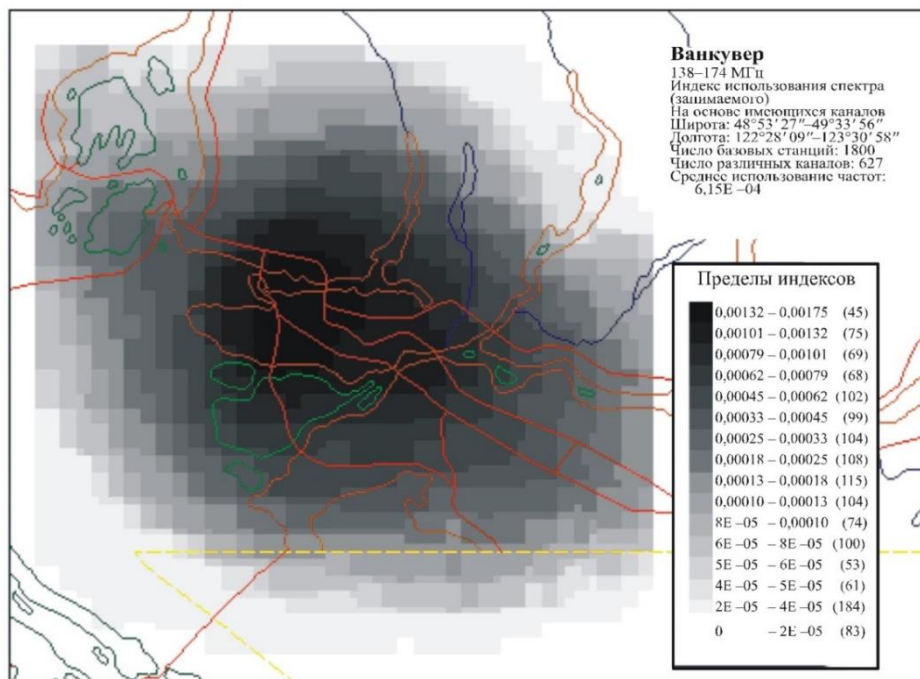


РИСУНОК 4

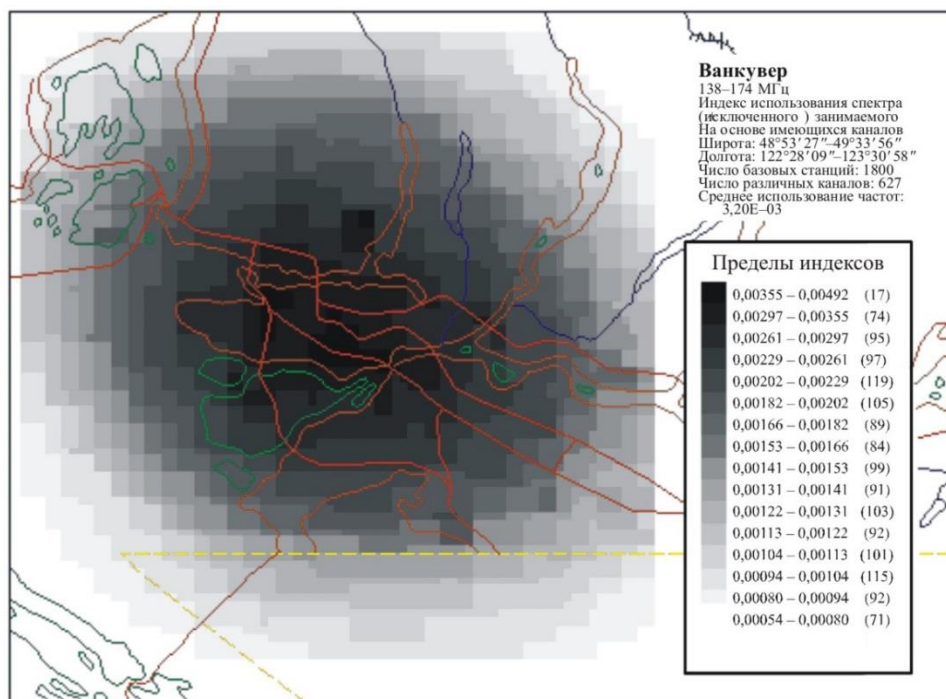
Двухмерное изображение индекса занимаемого спектра для Ванкувера



SM.1046-04

РИСУНОК 5

Двухмерное изображение индекса занимаемого и исключенного спектра для Ванкувера



SM.1046-05

1.4 SUE сухопутных подвижных радиосистем (метод измерения)

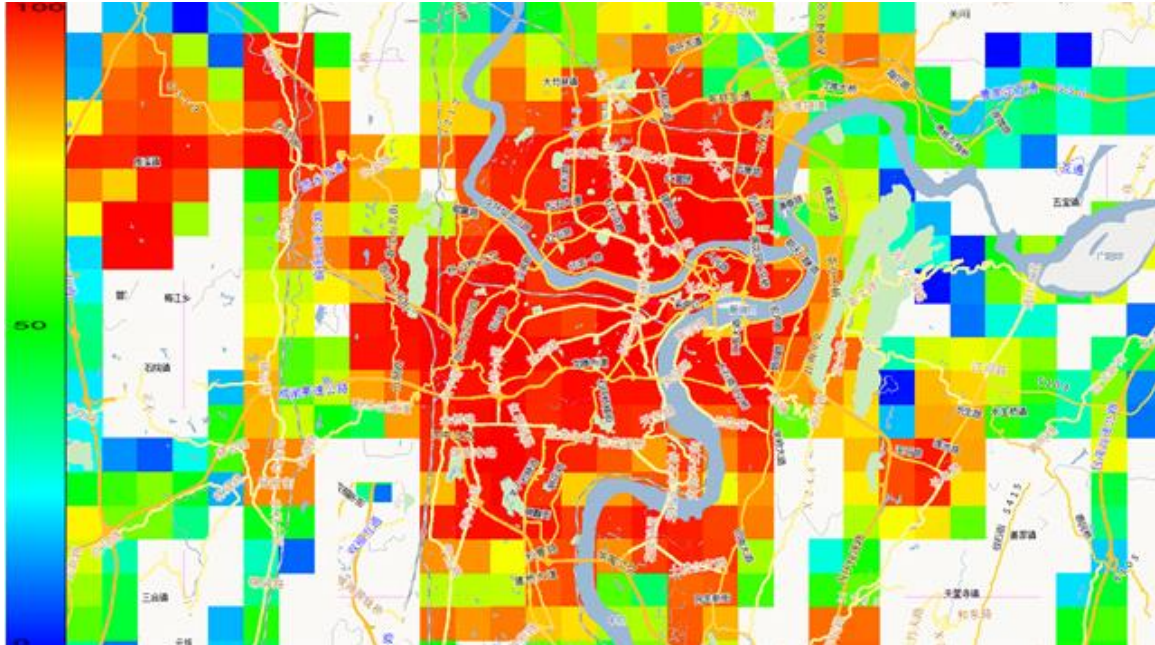
Возьмем в качестве примера Чунцин (Китай) и воспользуемся методом измерения, описанным в Приложении 1, пункт 2. SUE' для полосы частот 1860–1875 МГц можно рассчитать по фактически измеренным значениям B' , S' и T' .

Фактический результат измерения B'/B в этой полосе частот показан ниже.

РИСУНОК 6

Фактический результат измерения B'/B в полосе частот 1860–1875 МГц в городе Чунцин

Дата измерений: с 29.08 по 25.09 2016 года



SM.1046-06

Региональная статистика B'/B в этой полосе составляет 65,58%.

Аналогично, значения S'/S и T'/T в этой полосе составляют соответственно 90,25% и 92,13%.

Следовательно, можно рассчитать SUE' для полосы частот 1860–1875 МГц:

$$SUE_{1860-1875 \text{ МГц}} = 65,58\% \times 90,25\% \times 92,13\% = 54,53\%.$$

1.5 SUE сухопутных подвижных радиосистем (альтернативный метод)

1.5.1 Введение

Рассмотрим случай, когда в данном географическом районе развернута система подвижной радиосвязи конкретного стандарта, включающая J подвижных станций, работающих на фиксированных частотах. В общем случае эффективность использования спектра задается комплексным параметром:

$$SUE = \{M, U\}, \quad (19)$$

где:

- M : полезный эффект, полученный с помощью рассматриваемой системы связи;
- U : коэффициент использования спектра для этой системы.

1.5.2 Определение полезного эффекта

Полезность системы подвижной радиосвязи определяется способностью пользователей отправлять и принимать информацию при нахождении в некоторой произвольной точке внутри географического района. Полезный эффект возрастает с ростом объема информации, который может быть передан в

данное время (или объема трафика в пределах зоны обслуживания) и с расширением зоны, которая фактически доступна. Полезный эффект лучше всего характеризуется двумя величинами: общим трафиком, созданным в пределах зоны обслуживания E , и относительным размером зоны обслуживания, задаваемым соотношением $S_r = S_s/S$, где S_s и S – это соответственно зона обслуживания рассматриваемой системы и общая площадь рассматриваемого географического района. Полезный эффект может быть задан уравнением:

$$M = E \cdot S_r. \quad (20)$$

Ясно, что в тех случаях, когда значение S_s значительно меньше, чем S ($S_r \approx 0$), полезность рассматриваемой (подвижной) системы будет очень низка. Услуги, предоставляемые такой системой, не будут существенно отличаться от услуг, предоставляемых системой фиксированной связи.

Общий трафик, создаваемый в пределах зоны обслуживания E , может быть определен с использованием подсистем оплаты абонентских услуг системы подвижной связи, в базах данных которых содержатся длительно хранящиеся записи времен начала и окончания связи. Общая зона обслуживания может быть рассчитана как объединение зон обслуживания базовых станций подвижной связи, или $S_s = \cup S_j$, где S_j – зона обслуживания j -й базовой станции.

В некоторых случаях, когда отсутствуют необходимые данные для расчета объема трафика, создаваемого в зоне обслуживания, или если требуется проверить потенциал системы подвижной связи, можно рассчитать полезный эффект, взяв уравнение (20) и заменив переменную общего трафика, E , относительным числом абонентов системы подвижной связи $N_r = N_a/N$, где N_a и N соответственно являются числом абонентов и общей численностью населения в рассматриваемом географическом районе. Тогда выражение для полезного эффекта становится следующим:

$$M = N_r \cdot S_r. \quad (21)$$

Данный показатель имеет интуитивную физическую интерпретацию. При некоторых условиях результат равен вероятности того, что любой данный житель рассматриваемого географического района, находящийся в любом его данном местоположении, может использовать услуги системы подвижной связи. Он также указывает цель развития систем подвижной связи: показатель достигает значения, равного единице, если все жители района ($N_a = N$) имеют доступ к обслуживанию в любом месте района ($S_s = S$). В этом случае полезный эффект достигает своего максимального значения, равного единице ($M = 1$).

1.5.3 Определение коэффициента использования спектра

Использование спектра определяется путем рассмотрения того, какие ограничения налагают существующие радиостанции на использование новых станций. Для базовой станции, расположенной в некоторой географической точке i района, таким ограничением может быть общее число запрещенных из-за несоответствия требованиям ЭМС полос частот K_i или пропорция $U_i = \frac{K_i}{K}$, где

K – общее число полос частот, разрешенных для использования системами подвижной связи рассматриваемого типа. Считается, что условия ЭМС не выполняются на данной частоте, если передатчик одной или более базовых станций (из общего числа J базовых станций) создает неприемлемые помехи для приемника подвижной станции, поддерживающего связь с новой базовой станцией, или если передатчик новой базовой станции создает неприемлемые помехи приемнику, поддерживающему связь с любой из существующих базовых станций.

Условия определения того, является ли доля спектра запрещенной в направлении базовой станции подвижной связи, аналогичны. Поскольку ограничения зависят от положения теоретической новой базовой станции, получается несколько результатов. Они могут быть упрощены, если взять ограничения, получающиеся для различных частей рассматриваемой территории, и выполнить соответствующий расчет. Лучше всего рассчитать взвешенное среднее значение, взяв в качестве взвешивающего коэффициента долю населения, которое проживает в каждой части района. Таким образом, этот коэффициент использования спектра может быть определен с использованием уравнения:

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i, \quad (22)$$

где:

- I : число элементов области в географическом районе;
- $\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: доля общей части населения, проживающей в i -м элементе района;
- n_i : число жителей в i -м элементе района;
- U_i : доля полос частот, запрещенных для базовой станции, находящейся в центре i -го элемента района, из-за несоответствия требованиям ЭМС.

1.5.4 Проведение расчета эффективности использования спектра

Для оценки эффективности использования спектра системами подвижной связи, использующими частотное разделение, рекомендуются следующие шаги:

- разделить географический район на элементы со стороной от 1 до 4 км;
- определить радиус зоны обслуживания для существующих станций подвижной связи R_j ;
- определить расстояния R_{ij} , отделяющие центр каждого элемента района i от местоположений существующих базовых станций;
- определить путем сравнения R_j и R_{ij} для каждого элемента зоны, принадлежит ли он зоне обслуживания одной или нескольких базовых станций;
- определить размеры зоны обслуживания для рассматриваемой системы подвижной связи путем объединения всех элементов района, попадающих в зону обслуживания одной или нескольких базовых станций;
- получить показатель полезного эффекта с помощью уравнения (20) или (21);
- определить долю α_i общей численности населения, проживающей в пределах границ i -го элемента района;
- определить радиус зоны обслуживания новой базовой станции, расположенной в центре каждого i -го элемента района;
- рассчитать отношения сигнал/шум на входах приемников подвижных станций, поддерживающих связь с существующими базовыми станциями и с новой базовой станцией, предполагая, что последняя расположена в центре i -го элемента;
- определить, какие полосы частот не будут разрешены для использования новой базовой станцией в центре i -го элемента;
- обобщить результаты оценки использования спектра, полученные для отдельных элементов района, и применить уравнение (22) для расчета коэффициента использования спектра.

1.5.5 Плотность настройки спектра (альтернативный метод расчета коэффициента использования спектра)

Для расчета SUE, описанного в пунктах 1.5.1–1.5.3, требуется полное деление всей области, и он включает большой объем вычислений, зависящий от количества сеток деления. В качестве альтернативного метода с целью упрощения вычисления SUE в этом разделе предлагается метод плотности настройки спектра (SSD). Его можно использовать при равномерном развертывании базовых станций по всей зоне обслуживания.

Вместо деления всей области на небольшие сетки метод SSD учитывает настройки спектра в сухопутной подвижной системе в плане объема реализованной полосы пропускания на квадратный километр. Если система реализована с малой полосой пропускания, то реализованная полоса пропускания на квадратный километр будет малой. В противном случае реализованная полоса пропускания на квадратный километр для переноса трафика абонентов в этом районе будет большой. Это основная идея метода SSD.

Для его реализации следует рассмотреть два аспекта: плотность спектра несущей и коэффициент повторного использования спектра.

Плотность спектра несущей (CSD) можно рассматривать как способ оценки реализованной полосы пропускания в системе без учета повторного использования спектра. То есть CSD можно рассчитать следующим образом:

$$CSD = \frac{B_{carrier} \times F_{TN}}{N_C \times S}, \quad (23)$$

где:

$B_{carrier}$: ширина полосы несущей;

F_{TN} : общее количество реализованных несущих на всей территории;

N_C : коэффициент покрытия сухопутной подвижной системы на всей территории с одним и тем же значением S_r из уравнения (20);

S : площадь всей области – та же, что и в уравнении (20).

CSD учитывает только число реализованных несущих на 1 км². Однако в смежных областях сухопутной подвижной системы один и тот же диапазон частот обычно используется повторно, если базовые станции, использующие одну и ту же частоту, не мешают друг другу. В этом заключается идея повторного использования спектра. Для количественного отражения условия повторного использования спектра используется коэффициент повторного использования спектра. Метод вычисления коэффициента повторного использования спектра для данной области иллюстрируется следующим уравнением.

$$M(f_i) = \frac{C_T}{C_i}, \quad (24)$$

где:

C_T : число полных ячеек во всей области;

C_i : число ячеек, использующих несущую f_i , во всей области.

Следует отметить, что коэффициент повторного использования спектра рассчитывается отдельно для каждой несущей. В области может использоваться несколько несущих, и SSD должна учитывать общий эффект от повторного использования спектра. SSD можно вычислить следующим образом:

$$SSD = CSD \times \frac{1}{F_{DN}} \times \sum_{i=1}^N \frac{1}{M(f_i)}, \quad (25)$$

где:

SSD : плотность настройки спектра для всей области;

CSD : плотность спектра несущих для всей области;

F_{DN} : число разных несущих, используемых по всей области;

$M(f_i)$: средний коэффициент повторного использования спектра f_i по всей области.

Например, возьмем область площадью 11,44 км². Предположим, что в этой области реализована система LTE с коэффициентом покрытия 96,4%. Реализованы 640 несущих с полосой 20 МГц на несущую. Тогда CSD будет равна:

$$CSD_{e.g.} = \frac{B_{carrier} \times F_{TN}}{N_C \times S} = \frac{20MHz \times 640}{96,4\% \times 11,44km^2} = 1161,86MHz / km^2. \quad (26)$$

Используются две разные несущие частоты, и для покрытия каждой ячейки используется только одна несущая. Значения коэффициента повторного использования спектра для каждой несущей равны соответственно 1,797 и 2,254.

Затем рассчитаем SSD этой области в соответствии с уравнением (25). SSD равна:

$$SSD_{e.g.} = 1161,86 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{1,797} + \frac{1}{2,254} \right) = 581,01 \text{ MHz} / \text{km}^2. \quad (27)$$

Общая пропускная способность (общий трафик) в этой области, определенная методом, описанным в пункте 1.5.2, составит 12 316 ГБ в течение 24 часов.

Таким образом, SUE в этом примере вычисляется следующим образом:

$$EUE_{e.g.} = \frac{12316 \times 8 \text{ GBit} / 24 \text{ h} / 11,44 \text{ km}^2}{581,01 \text{ MHz} / \text{km}^2} = 617,65 \text{ Mbit} / \text{MHz} / \text{h} / \text{km}^2. \quad (28)$$

1.5.6 Степень использования спектра

Чтобы оценить степень использования спектра соответствующей полосы частот, присвоенной сетям, определяется степень использования спектра одним пользователем λ как средняя полоса пропускания для каждого из M пользователей сети.

В общем сценарии предполагается, что в сети существует N частотных полос. Если все частоты работают постоянно во всех географических зонах, то среднюю полосу пропускания для каждого из M пользователей сети можно определить по формуле:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i}{M}, \quad (29)$$

где B_i – ширина полосы несущей i .

При развертывании сети для некоторых географических областей, сценариев и интервалов времени можно установить свой диапазон частот, с тем чтобы исключить помехи между различными системами и динамически распределять спектр. Учитывая это, значение λ можно определить по формуле:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\Pi_{pmt,i}}{\Pi_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \vartheta}{M}, \quad (30)$$

где $\Pi_{pmt,i}$ – часть зоны покрытия сети, в которой разрешено работать несущей i ; $\Pi_{max,i}$ – максимальная площадь зоны покрытия сети, в которой разрешено работать несущей i (обычно вся зона покрытия сети); $T_{pmt,i}$ – интервал времени в течение суток, когда разрешено работать несущей i ; $T_{max,i}$ – максимальный период времени в течение суток, когда разрешено работать несущей i (обычно все 24 часа); ϑ – коэффициент, учитывающий влияние некоторых других факторов (таких, как сценарий), значение которого находится между 0 и 1. Например, если несущей разрешено работать только внутри здания, то ϑ может отражать уменьшение полосы пропускания для одного пользователя, вызванное ограничением, зависящим от распределения пользователей в сети.

Основываясь на определении средней ширины полосы в конкретном сценарии, степень использования спектра можно определить как степень использования спектра одним пользователем, степень использования спектра одним пользователем, зависящую от географического нормирования, и степень использования спектра одним пользователем, зависящую от нормирования численности населения.

Принимая во внимание фактически используемую область, определим степень использования спектра одним пользователем в зависимости географического нормирования по формуле:

$$\xi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\Pi_{pmt,i}}{\Pi_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \mathcal{G}}{\sum_{i=0}^N \left(\frac{\Pi_{act,i}}{\Pi_{pmt,i}} \times M \right) / N}, \quad (31)$$

где $\Pi_{act,i}$ – площадь фактически используемой области. Если фактически используемая область совпадает с допустимой используемой областью, то степень использования спектра одним пользователем, зависящая от географического нормирования, будет равна степени использования спектра одним пользователем.

В частности, некоторые области являются разрешенными областями использования, но покрытие в них отсутствует – например, пустыня Гоби.

Эти области уменьшают справочное значение географического нормирования полосы пропускания для одного пользователя. Поэтому вместо площади будем использовать населенность области и определим степень использования спектра одним пользователем в зависимости от нормирования численности населения по следующей формуле:

$$\psi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} B_i \times \frac{\Pi_{pmt,i}}{\Pi_{max,i}} \times \frac{T_{pmt,i}}{T_{max,i}} \times \mathcal{G}}{\sum_{i=0}^N \left(\frac{\Gamma_{act,i}}{\Gamma_{pmt,i}} \times M \right) / N}, \quad (32)$$

где $\Gamma_{act,i}$ – численность населения в фактически используемой области для несущей i , а $\Gamma_{pmt,i}$ – численность населения в разрешенной области использования несущей i . Аналогично, если фактически используемая область совпадает с допустимой используемой областью, то степень использования спектра одним пользователем, зависящая от нормирования численности населения, равна степени использования спектра одним пользователем.

2 Использование спектра радиорелейной системой

2.1 Введение

Для радиорелейной линии, работающей непрерывно, фактором времени можно пренебречь. В соответствии с формулой (2) эффективность использования спектра (SUE) можно выразить так:

$$SUE = \frac{C}{B \cdot S_{\alpha}}, \quad (33)$$

где:

- C : величина пропускной способности, например в телефонных каналах или бит/с;
- S_{α} : геометрическая мера, например площадь или угол между ответвляющимися линиями в узле.

2.2 SUE для протяженных магистралей с ответвляющимися линиями в узлах

Нормализованная пропускная способность, которая определяет SUE в наземной радиорелейной системе связи, определяется как:

$$SUE = \frac{N \cdot A}{B_c}, \quad (34)$$

где:

N : допустимое количество ответвлений (то есть дуплексных радиостволов) на одну ретрансляционную станцию;

A : пропускная способность (например, количество телефонных каналов) в одном радиоканале;

B_c : необходимая ширина полосы по РЧ на один радиоканал.

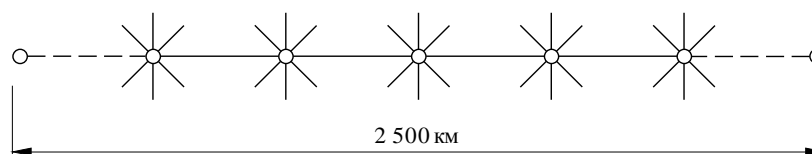
Эта формула включает геометрическую меру N (N зависит от допустимого угла между ответвляющимися линиями).

Эффективность использования спектра для наземной радиорелейной системы может быть рассчитана для телефонной передачи с использованием приведенной выше формулы.

Расчет делается исходя из следующих условий:

- передается телефонный сигнал;
- вероятность замирания в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.530;
- длина линии 2500 км; модель линии приведена на рисунке 7;

РИСУНОК 7
Модель линии



SM.1046-07

- требуемое отношение несущая/шум, C/N , выражается формулой:

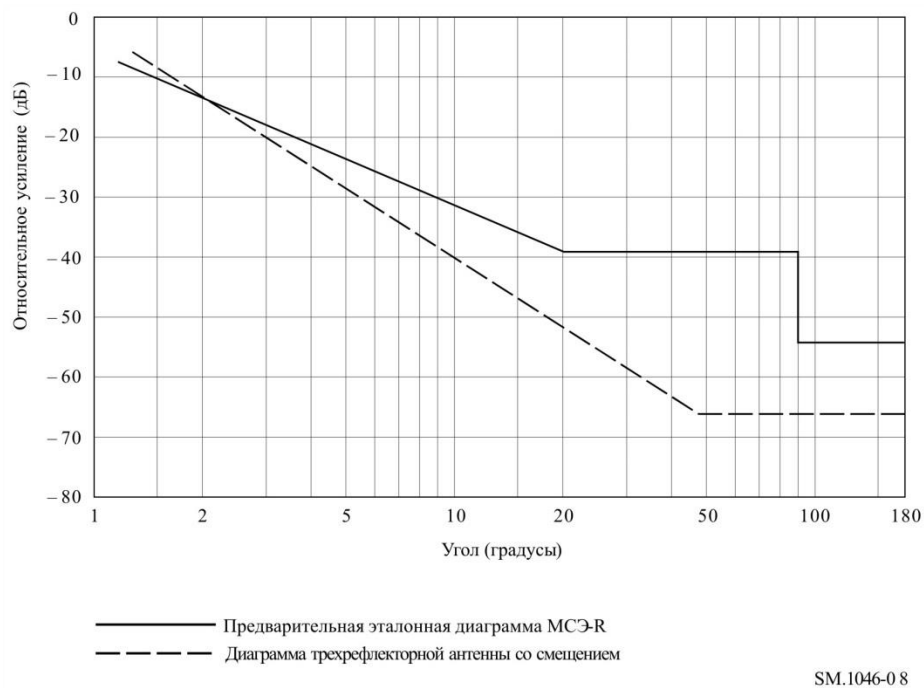
$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11,8 \quad \text{дБ}, \quad (35)$$

где n – число позиций в n -позиционной КАМ;

- одна десятая общего уровня шума всей радиорелейной линии длиной 2500 км выделяется на шум от помех для стволов других направлений;
- помехи со стволов других направлений имеют ту же самую частоту, что и полезный сигнал;
- используются эталонная диаграмма направленности для круговой антенны в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.699 и трехрефлекторная антенна с двойным смещением облучателя, используемая в Японии для цифровой СВЧ-радиосвязи; их диаграммы приведены на рисунке 8;
- линии с произвольными углами ответвления.

РИСУНОК 8

Диаграммы направленности антенн



Нормализованные значения пропускной способности линий связи, рассчитанные для этих двух типов антенн, приведены на рисунке 9. Характеристики круговой антенны из Рекомендации МСЭ-R F.699 недостаточны для оценки эффективности использования спектра при работе с системами модуляции высших уровней. Поскольку результаты зависят от характеристик антенны, то при применении антенны с высокими характеристиками будет эффективным использование модуляции более высокого уровня, такой как 256-QAM.

2.3 SUE в произвольно расположенных радиорелейных линиях

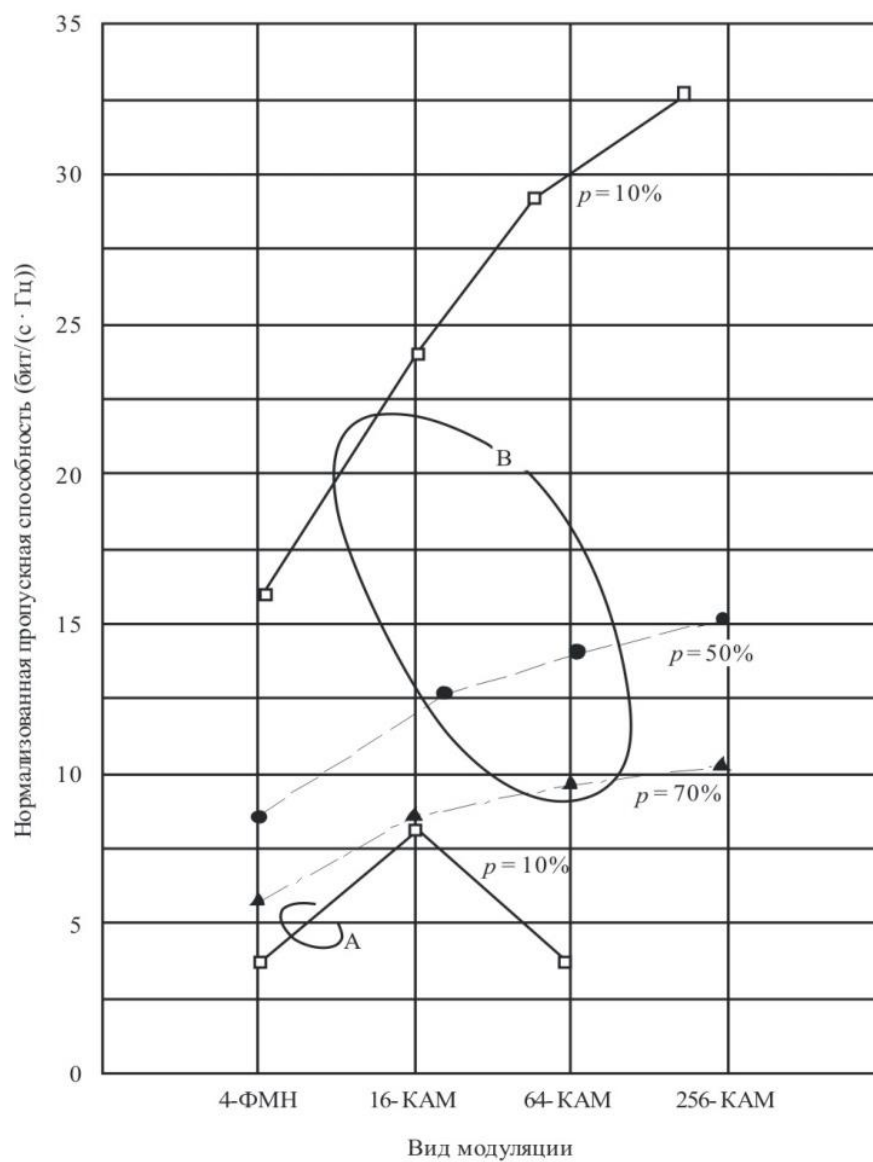
2.3.1 Формулы

На рисунке 10 показана радиорелейная линия связи X–Y с другой радиостанцией Z, работающей на той же частоте. Станция Z расположена произвольно на окружности вокруг станции Y.

Станция Y принимает полезный сигнал с частотой f_1 от станции X. Станция Z передает сигнал на той же частоте f_1 в произвольном направлении.

РИСУНОК 9

Нормализованная пропускная способность



Запас на замирание: 20 дБ

Интервал между ретрансляторами: 50 км

Пропускная способность канала: 64 кбит/с

Доля уровня шума в ответвлениях: 10%

 p – вероятность помехи

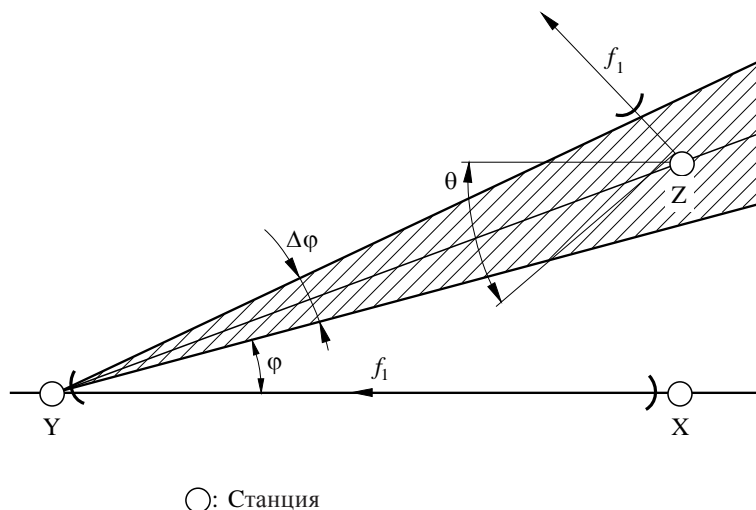
А – предварительная эталонная диаграмма антенны МСЭ-R

В – диаграмма направленности трехрефлекторной антенны со смещением облучателя

SM.1046-09

РИСУНОК 10

Произвольное расположение станций



SM.1046-10

Нормализованная пропускная способность линии связи, которая характеризует эффективность использования спектра, определяется как:

$$\text{SUE} = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p} \cdot A}{p \cdot B_c}, \quad (36)$$

где:

- N : число радиолиний, которые могут использовать одну и ту же частоту: $N \approx \bar{p} / p$;
- A : пропускная способность на радиоканал.

Вероятность p того, что станция Y примет помеху, превышающую допустимый предел, рассчитывается с учетом комбинации диаграмм направленности антенн станций Y и Z ; \bar{p} – максимально допустимая вероятность помехи.

Хотя накопление помехи от двух или более станций незначительно, при реальном применении должен быть предусмотрен некоторый запас.

2.3.2 Пример: спектральная эффективность радиорелейной системы в диапазоне 2 ГГц

Эффективность использования спектра для малоканальной наземной радиорелейной линии между двумя пунктами, работающей в диапазоне 2 ГГц, была рассчитана для телефонной передачи с помощью приведенной выше формулы.

Относительная эффективность использования спектра для антенн диаметром 1,8 м была рассчитана с использованием допустимого отношения сигнал/помеха и соответствующей эффективности для каждого вида модуляции, приведенного в таблице 2. Результаты расчетов приведены на рисунке 11.

Цифровая система имеет преимущество перед аналоговой при меньшей глубине замирания. В данном исследовании ослабление из-за замираний такое же, как и ухудшение отношения уровня полезного сигнала к уровню мешающего сигнала (W/U), вызванное помехой. При использовании метода пространственного разнесения необходимый запас на замирание уменьшается. Вообще, цифровая система позволяет получить большую эффективность использования спектра.

При цифровой модуляции переход с 2-фазной на многофазную или многопозиционную модуляцию требует меньшей ширины полосы, но эффективность использования спектра может оказаться ниже, если высок уровень помех. Точное значение зависит от характеристик антенны и т. д., но система с 4-фазной ФМН может быть оптимальной в обобщенном смысле в случаях, когда другие радиолинии, работающие вокруг ретрансляционной станции, расположены в зоне произвольным образом.

ТАБЛИЦА 2

Параметры различных видов модуляции в диапазоне 2 ГГц

Вид модуляции		Допустимое отношение сигнал/шум S/N или коэффициент ошибок	Коэффициент ослабления помех (IRF)		Допустимое отношение полезного сигнала к мешающему сигналу W/U	Параметры, относящиеся к B		Разнос между соседними каналами, B	Количество каналов, A	$A/B^{(1)}$ (каналы/кГц)
Аналоговая передача	ЧМ	58 дБ	20 дБ		38 дБ	Девияция частоты для испытательного тонального сигнала (среднеквадратичное значение): 100 кГц		520 кГц	24	0,046
	ОБП	58 дБ	9,5 дБ		48,5 дБ	Самая высокая частота в групповой полосе: 108 кГц Коэффициент фильтра: $\times 2$ Неточность частоты: 20 кГц		236 кГц	24	0,1
Цифровая передача			Несущая/шум	Уменьшение		Тактовая частота	Коэффициент фильтра			
	2-фазная ФМН	10^{-6}	10,7 дБ	5,5 дБ	16,2 дБ	1 544 кГц	$\times 1,3$	2 МГц	24	0,012
	4-фазная ФМН	10^{-6}	13,7 дБ	5,5 дБ	19,2 дБ	772 кГц	$\times 1,4$	1,1 МГц	24	0,022
	8-фазная ФМН	10^{-6}	19,1 дБ	5,5 дБ	24,6 дБ	515 кГц	$\times 1,5$	0,77 МГц	24	0,031
	КМЧО	10^{-6}	16,8 дБ	5,5 дБ	22,3 дБ	722 кГц	$\times 1,1$	0,85 МГц	24	0,028
	16-позиционная КАМ	10^{-6}	21,4 дБ	5,5 дБ	26,9 дБ	386 кГц	$\times 1,6$	0,62 МГц	24	0,039

⁽¹⁾ Собственная эффективность для каждого вида модуляции.

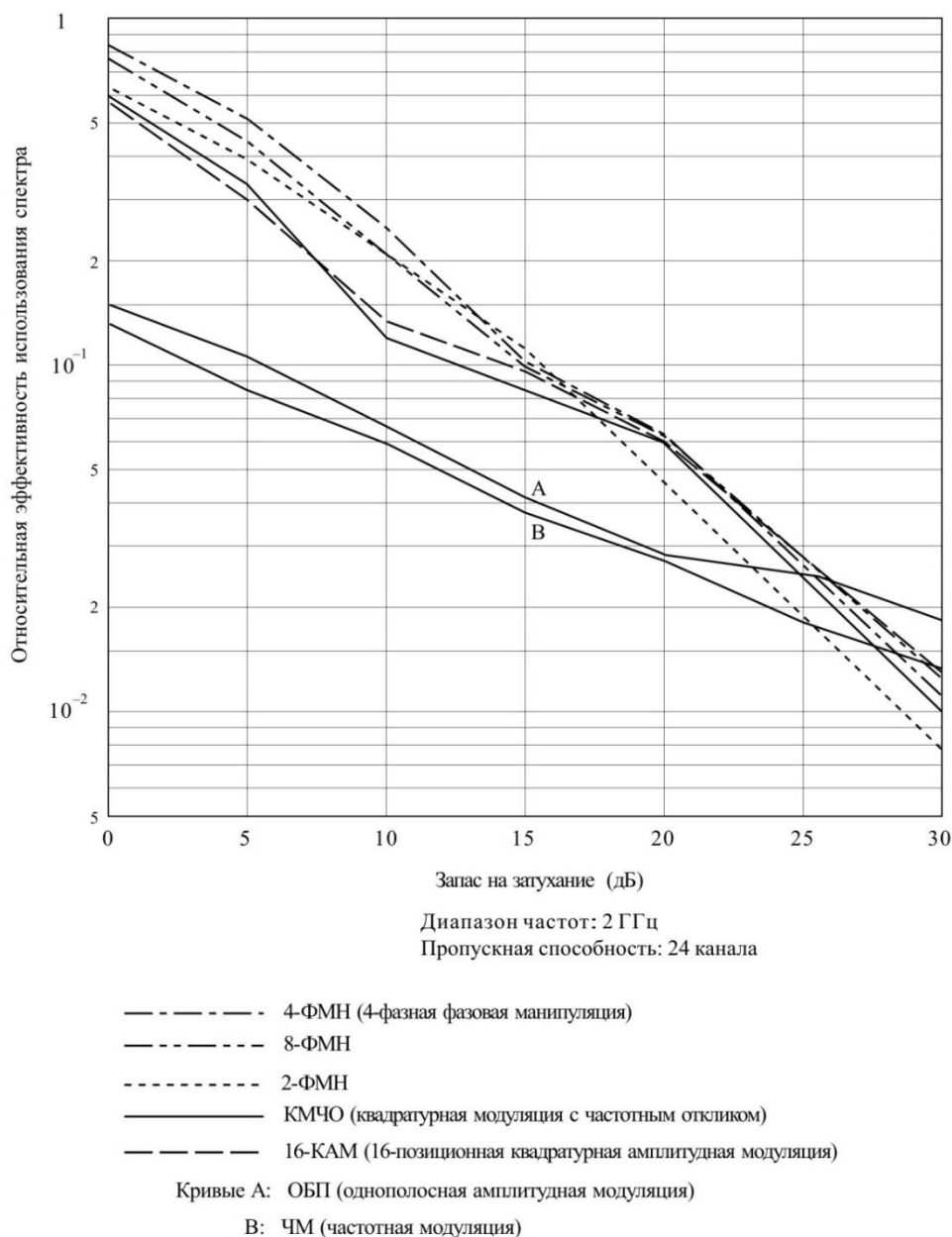
КМЧО: Квадратурная модуляция с частотным откликом.

Использованы следующие предположения:

- приемлемая помеха и спектральная эффективность для каждого вида модуляции даны в таблице 1. 80% всех шумов линии приходится на помехи;
- расстояния между станцией, подверженной помехе (станция Y), и мешающими станциями приняты одинаковыми; это предположение вносит небольшую ошибку в расчет эффективности, поскольку даже при различии в длине линии в два раза разница в потерях в свободном пространстве составит только 6 дБ;
- замирания полезного и мешающего сигналов предполагаются некоррелированными;
- диаграмма направленности антенны соответствует эталонной диаграмме, приведенной в Рекомендации МСЭ-R F.699;
- все станции имеют одинаковую выходную мощность передачи;
- предел вероятности помехи $\bar{p} = 0,1$.

РИСУНОК 11

Эффективность использования спектра при произвольном расположении



SM.1046-1 1

2.3.3 SUE произвольной узловой сети

Для того чтобы провести объективное сравнение методов модуляции, можно предположить план перемежающихся частот с разносом каналов, который соответствует заданному ухудшению рабочих характеристик, вызванному помехами по соседнему каналу. В таблице 3 приведены предварительные значения нормализованного разноса каналов X , определенного в Отчете 608 бывш. МККР (Киото, 1978 г.), и соответствующая спектральная эффективность в (бит/(с · Гц)). Даже если результаты получаются различными при вычислении на основе других исходных предположений, нужно отметить, что расчетные данные из таблицы 3 достаточно близки к значениям, которые можно получить при определенном размещении каналов, как это предложено Рекомендациями МСЭ-R (например, 140 Мбит/с при модуляции 16-КАМ и разносом 40 МГц между каналами с ортогональной поляризацией). Измеренные значения могут отличаться от этих расчетных значений.

ТАБЛИЦА 3

Метод модуляции	Нормализованный разнос каналов, X	Спектральная эффективность (бит/(с · Гц))
4-ФМН	1,88	2,13
8-ФМН	2,16	2,77
16-КАМ	2,23	3,59

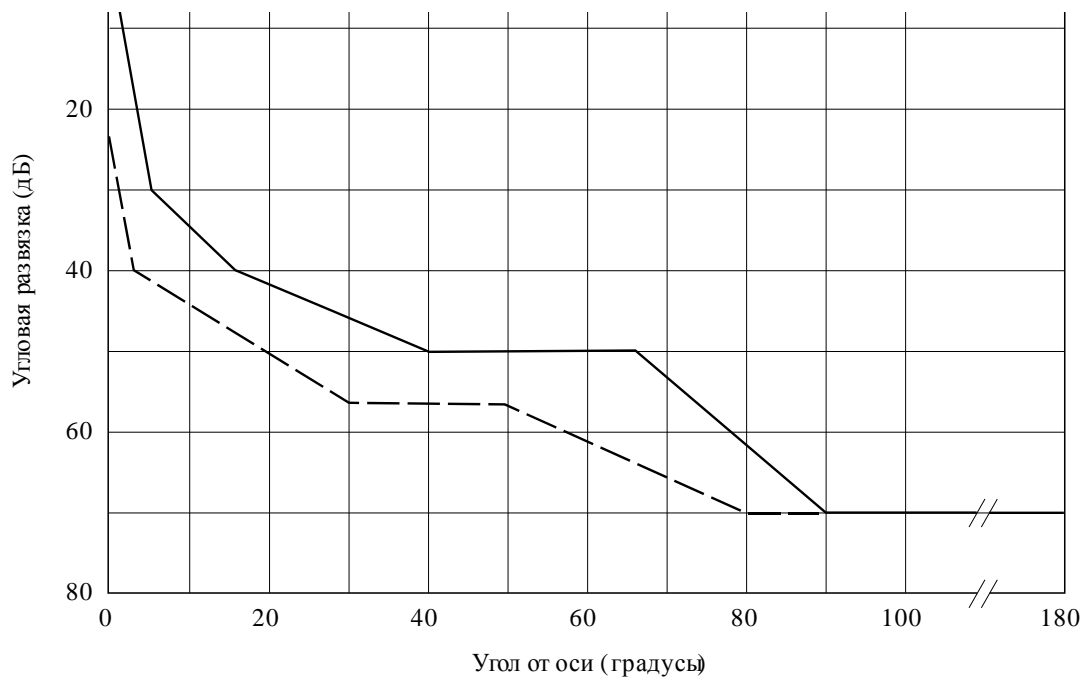
ПРИМЕЧАНИЕ 1.

- Ухудшение за счет помехи по соседнему каналу: 0,5 дБ.
- Фильтры канала: с увеличивающейся косинус-квадратичной крутизной (0,5).
- Развязка между ортогонально поляризованными стволами (с учетом деполяризации в атмосфере (XPD)): 12 дБ.

Диаграмма направленности антенны, использованная при анализе, приведена на рисунке 12; это типичная параболическая антенна. Предполагается, что ухудшение характеристик (и коэффициента ошибок по битам, равного 1×10^{-3}), обусловленное помехами в том же канале от других линий, не превышает 1 дБ. Предполагается также, что линия связи, которая испытывает помеху, находится в пороговом режиме с запасом на замирание 40 дБ, в то время как линия связи, создающая помехи, принимает сигнал с его номинальным значением.

РИСУНОК 12

Маски излучения антенны

Параболическая антенна, $D/\lambda = 75$

- Совпадающая поляризация
 - - - Ортогональная поляризация

SM.1046-12

Нормализованная плотность сети γ определяется формулой:

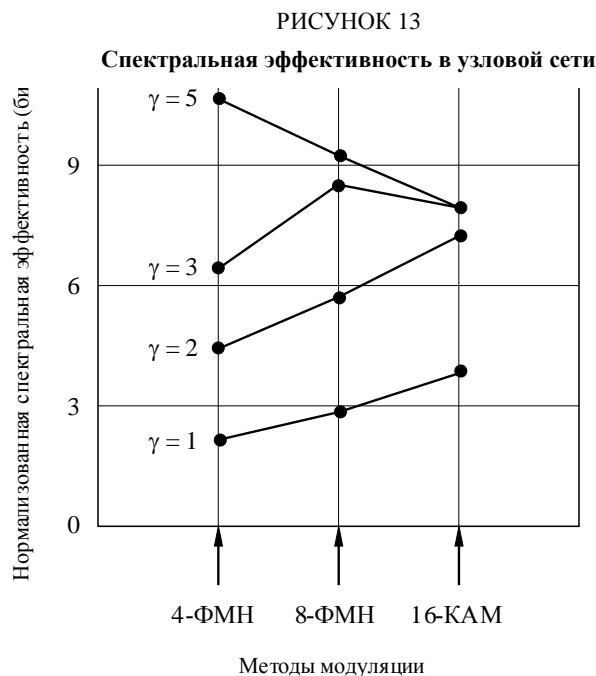
$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{Общая площадь, охватываемая сетью}}, \quad (37)$$

где:

N : число узлов в сети;

ρ : длина скачка.

Результаты, приведенные на рисунке 13, показывают, что при высокой плотности сети наивысшая эффективность достигается при применении 4-ФМН модуляции. Однако, когда плотность сети ниже, становятся предпочтительнее методы модуляции 8-ФМН или даже 16-КАМ. Таким образом видно, что эффективность использования спектра при данных методах модуляции зависит от помеховой обстановки.



Маска излучения антенны дана на рисунке 12.

Ухудшение качества за счет повторного использования частот: 1 дБ

SM.1046-13

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительная информация может быть получена в:

DODO, J., KUREMATSU, H. and NAKAZAWA, I. [8-12 June, 1980] Spectrum use efficiency and small capacity digital radio-relay system in the 2 GHz band. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, WA, United States of America.

TILLOTSON, L. C. et al. [1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. Proc. IEEE, 61, 4.

2.4 Оценка способности экономии спектра новых технологий цифровых радиорелейных систем

2.4.1 Введение

Для оценки способности экономии спектра различных факторов проектирования или различных технологических вариантов была разработана специальная компьютерная модель. При этом должна производиться численная оценка относительных SUE, которые могут быть достигнуты. Концепция SUE может быть расширена и определена следующим образом:

$$SUE = VC/(T \cdot A \cdot B), \quad (38)$$

где:

- VC : число телефонных каналов;
 T : доля времени, в течение которого система используется (для данного анализа равна 1);
 A : площадь исключенной зоны (км²);
 B : занимаемая ширина полосы частот (МГц).

Формула (38) была выбрана потому, что при оценке способности системы экономить спектр в ней учитываются как спектральные, так и пространственные зоны исключения. Зона исключения – это такая зона, в которой другая система не может работать без ухудшения своих качественных характеристик работы ниже определенного установленного уровня качества. Размеры зоны исключения зависят от характеристик диаграмм направленности антенн, выходной мощности передатчиков и порогового уровня помех приемника.

Алгоритм, использованный для расчета зоны исключения, включает сегментацию (квантование) диаграммы направленности передающей антенны на некоторое количество сегментов, угловых секторов, которые достаточно точно описывают диаграмму направленности антенны. Диаграмма направленности передающей антенны является основным исходным элементом модели, которая вычисляет зону исключения путем суммирования площадей каждого сегмента. Геометрически каждый сегмент представляет собой угловой сектор, площадь которого может быть вычислена по следующей формуле:

$$\text{Площадь углового сектора} = \pi R^2 \theta / 360, \quad (39)$$

где:

- R : радиусы секторов (R_1, R_2, \dots, R_n);
 θ : углы при вершинах секторов ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$);
 n : число угловых секторов.

Радиус R_n каждого сектора рассчитывается исходя из следующего соотношения:

$$L(R) = P_t + G_t(n) + G_r - I_{\max}, \quad (40)$$

где:

- $L(R)$: необходимые потери при распространении (дБ);
 P_t : выходная мощность передатчика (дБм);
 $G_t(n)$: усиление передающей антенны для сектора n (дБи);
 G_r : усиление приемной антенны –10 дБи;
 I_{\max} : максимально допустимый уровень помех (дБм).

Затем, используя обратную модель распространения радиоволн для плоской Земли, определяется расстояние R , соответствующее величине необходимых потерь. Это облегчает определение исключаемой зоны для каждого углового сектора (см. формулу (39)).

Для того чтобы применить формулу (38) к магистральным радиорелейным системам, необходимо установить характеристики эталонной системы между двумя станциями микроволновой связи. Эти характеристики включают протяженность трассы, потери при распространении на трассе, усиление антенны, дополнительные потери, запас на замирания и усиление системы. Необходимо установить также некоторые модуляционные характеристики для рассматриваемых видов модуляции. При данном исследовании рассматривались 16-КАМ, 64-КАМ и 256-КАМ. Характеристики, используемые при данном анализе для цифровых радиорелейных систем, основываются на Североамериканском стандарте и имеют следующие значения:

Параметры цифровой радиорелейной системы (см. Примечание 1)

–	Число телефонных каналов:	1344 для 16-КАМ 2016 для 64-КАМ 2688 для 256-КАМ
–	Скорость передачи:	90 Мбит/с для 16-КАМ 135 Мбит/с для 64-КАМ 180 Мбит/с для 256-КАМ
–	BER:	1×10^{-6}
–	Шумфактор приемника, F :	4 дБ
–	Усиление системы, G_s :	103 дБ.

Для обеспечения объективного сравнения различных видов модуляции при анализе использовались теоретическая эффективность передачи и уровни отношений сигнал/шум на входе $(C/N)_i$.

Далее рассматриваются возможности применения формулы (38) для наиболее широко используемых при проектировании характеристик антенн, видов модуляции и методов обработки сигналов.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Используемые при этом анализе системные параметры были выбраны таким образом, чтобы продемонстрировать единую методику анализа эффективности системы при различных рассматриваемых условиях. Как таковые, эти параметры могут быть не характерными для реализуемых на практике систем, в особенности систем, использующих схемы модуляции высокого порядка. Таким образом, результаты анализа имеют характер иллюстрации концепции спектральной эффективности радиорелейных систем, и администрации при любом анализе эффективности использования спектра должны использовать параметры, характерные для их систем.

2.4.2 Антенны

Пространственное исключение – основной фактор при рассмотрении степени сохранения спектра. Одной из наиболее значительных компонент системы радиосвязи, влияющей на пространственное исключение, является ее антенна. За последние годы значительные достижения в области проектирования антенн в части поляризационной развязки и подавления боковых лепестков повысили возможность улучшения спектральной эффективности при магистральной микроволновой радиосвязи.

Повторное использование частот может быть обеспечено применением методов сохранения спектра за счет специального конструирования антенн. Пространственное исключение может быть снижено за счет подавления боковых лепестков. Диаграмма направленности антенны, а следовательно и распределение боковых лепестков меняются в зависимости от типа антенн. При магистральной микроволновой связи наиболее широко используются следующие три типа антенн:

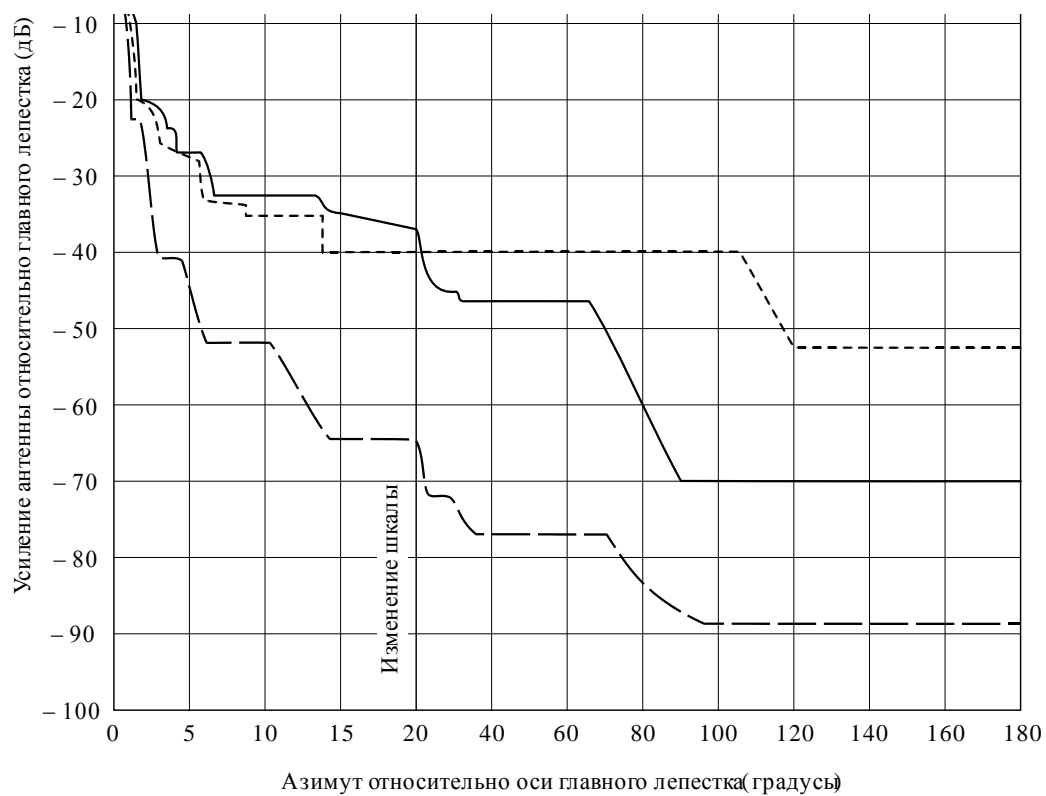
- стандартная параболическая (STD);
- параболическая, защищенная кожухом (SHD);
- коническая рупорно-рефлекторная (CHR).

Типичные диаграммы направленности таких антенн при усилении 43 дБи представлены на рисунке 14. При моделировании использовались характеристики диаграмм направленности антенн, изображенных на рисунке 14.

На рисунке 15 для трех указанных типов антенн представлены кривые зависимости размеров исключаемой зоны от выходной мощности передатчика при пороге помех приемника, равном $-102,5$ дБм. Несмотря на то что усиление главного лепестка у всех трех антенн одинаковое, результаты, представленные на рисунке 15, показывают, что антенна CHR создает исключаемую зону меньшего размера, чем две другие антенны. Кроме того, разница в размерах исключаемой зоны для всех трех антенн невелика, если мощность передатчика не превышает 30 дБм. Это легко объяснить, поскольку вклад в исключаемую зону за счет характеристик боковых и задних лепестков антенны невелик при мощности передатчика менее 30 дБм. При повышении мощности передатчика выше 30 дБм разница в размерах исключаемых зон становится существенной. Размеры исключаемой зоны зависят также от порога помех приемника.

РИСУНОК 14

Типичные диаграммы направленности антенн STD, SHD и CHR

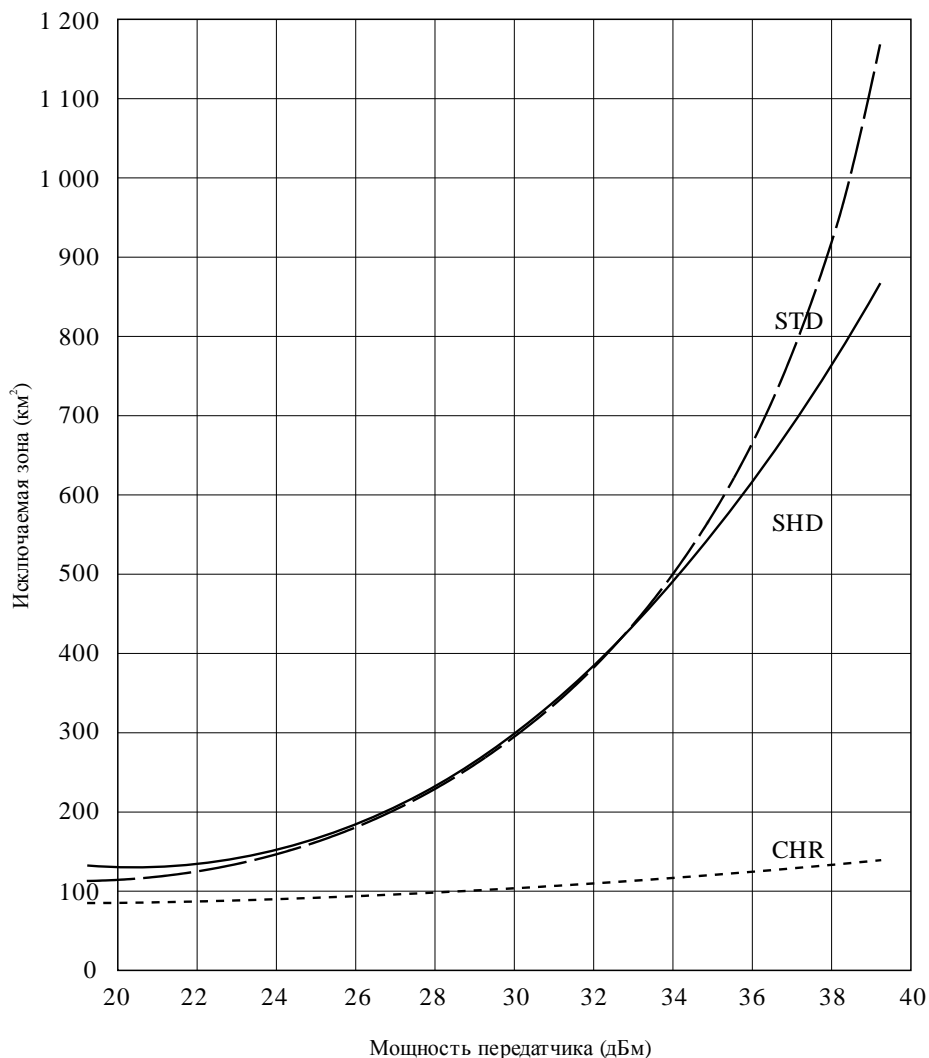


----- Антенна CHR
----- Антенна SHD
----- Антенна STD

SM.1046-14

РИСУНОК 15

Площадь исключаемой зоны в зависимости от типа антенны и выходной мощности передатчика



Расчеты основаны на возвышении передающей и приемной антенн над гладкой земной поверхностью, равном 50 м.

- ☐ $I_{max} = -102,5$ дБм
- ☐ G_r (главный лепесток) = 43 дБи
- ☐ $G_r = -10$ дБи

SM.1046-15

Поскольку размеры исключаемой зоны для всех трех типов антенн зависят от P_t и I_{max} , то степень сохранения спектра для этих трех типов антенн должна также зависеть от вида модуляции в системе. В связи с этим возможности повышения эффективности использования спектра для антенн STD, SHD и CHR будут рассмотрены в разделе, посвященном модуляции.

2.4.3 Модуляция

Оценка возможностей сохранения спектра при различных видах модуляции – это очень сложный процесс, поскольку как спектральное, так и пространственное исключение зависят от используемого в системе вида модуляции. Вообще говоря, такие системные параметры, как занимаемая ширина полосы частот, необходимое отношение несущая/шум на входе приемника $(C/N)_i$ и I_{max} , – все являются функциями вида модуляции и непосредственно касаются эффективности использования спектра.

Для обеспечения объективного сравнения данный анализ базируется на теоретической эффективности системы и на отношении $(C/N)_i$ приемника при различных видах модуляции. Для оценки возможностей сохранения спектра при различных видах модуляции для каждого из них были рассчитаны занимаемая полоса частот, B , и необходимая величина P_t . Эти параметры представлены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4
Параметры цифровых систем

Вид модуляции	Эффективность передачи (бит/(с · Гц))	Занимаемая ширина полосы, B (МГц)	Необходимое отношение несущая/шум на входе, $(C/N)_i$ (дБ)	Уровень шума (дБм)	Минимальный уровень несущей (дБм)	Мощность на выходе передатчика, P_t (дБм)
16-КАМ	4	22,5	21,0	−96,5	−75,5	27,5
64-КАМ	6	22,5	27,0	−96,5	−69,5	33,5
256-КАМ	8	22,5	33,0	−96,5	−63,4	39,5

Занимаемая ширина полосы частот B при цифровой модуляции определяется следующим соотношением:

$$B \text{ (МГц)} = \text{Битовая скорость (Мбит/с)} / \text{эффективность передачи (бит/(с · Гц))}, \quad (41)$$

где битовая скорость (см. параметры цифровых систем) и эффективность передачи (см. таблицу 4) зависят от вида модуляции.

Для расчета необходимой величины P_t для каждого вида модуляции было определено необходимое отношение $(C/N)_i$ в приемнике при заданных критериях качества передачи. В качестве такого критерия была взята частота битовых ошибок 1×10^{-6} , а теоретически необходимое отношение $(C/N)_i$ было взято из технической литературы.

Уровень шума на входе приемника N_i , приведенный в таблице 4 (−96,5 дБм), был определен исходя из ширины полосы приемника, равной 22,5 МГц, при шумфакторе приемника, равном 4 дБ. Необходимый минимальный уровень несущей (C_{\min}) на входе приемника был затем определен по формуле:

$$C_{\min} \text{ (дБм)} = (C/N)_i + N_i. \quad (42)$$

Необходимый уровень мощности передатчика P_t , приведенный в таблице 4, был определен по формуле:

$$P_t \text{ (дБм)} = C_{\min} + G_s, \quad (43)$$

где G_s – усиление системы, которое было взято равным 103 дБ.

Исключаемая площадь зависит также от I_{\max} приемника, испытывающего помеху. I_{\max} приемника для каждого соответствующего вида модуляции было определено исходя из предположения, что приемник, испытывающий помеху, использует тот же вид модуляции, что и мешающий передатчик. При данном анализе I_{\max} было определено на основе критериев, установленных Ассоциацией промышленности электросвязи (ТИА) в Бюллетене систем электросвязи № 10-Е. Для цифровых систем в качестве критерия качества передачи было взято увеличение частоты битовых ошибок от 1×10^{-6} до 1×10^{-5} , что приблизительно соответствует увеличению уровня шума приемника на 1 дБ. Это эквивалентно отношению помеха/шум на входе приемника $(I/N)_i = -6$ дБ (то есть $I_{\max} = -96,5$ дБм − 6 дБ = −102,5 дБм для 16-КАМ, 64-КАМ и 256-КАМ).

В таблице 5 представлены расчетные величины SUE, полученные исходя из ширины полосы и мощности на выходе передатчика, которые представлены в таблице 4, и на основе $I_{\max} = -102,5$ дБм. Величины SUE в таблице 5 относятся к трем различным видам модуляции и к трем типам антенн. С точки зрения использования спектра системы, обладающие более высоким SUE, являются более эффективными. Следует особо отметить, что, как это ясно видно из расчетных результатов, SUE значительно меняется в зависимости от используемого типа антенны. К примеру, SUE для 64-КАМ

равна 0,201 при антенне STD, в то время как она равна 0,212 и 0,811 соответственно для антенн SHD и CHR. Таким образом, результаты, представленные в таблице 5, четко указывают на то, что SUE может быть оптимизирована лишь в том случае, если будут совместно рассмотрены влияния как антенны, так и вида модуляции.

ТАБЛИЦА 5
Эффективность использования спектра

Уровень качества	SUE для антенн различного типа		
	STD	SHD	CHR
1	16-KAM (0,307)	16-KAM (0,282)	256-KAM (0,841)
2	64-KAM (0,201)	64-KAM (0,212)	64-KAM (0,811)
3	256-KAM (0,112)	256-KAM (0,144)	16-KAM (0,709)

Кроме того, результаты анализа показывают, что SUE для 64-KAM выше, чем для 256-KAM при антеннах типа STD и SHD, но не для CHR. Таблица 6 позволяет объяснить, почему 64-KAM более эффективно использует спектр, чем 256-KAM, при антеннах SHD, обладающих очень высокими качественными характеристиками. Исходные параметры для моделирования представлены в таблице. Количество передаваемых телефонных каналов (VC) составляет 2016 для 64-KAM и 2688 для 256-KAM. Необходимая ширина полосы частот, B , одинакова как для 64-KAM, так и для 256-KAM ($B = 22,5$ МГц). Однако необходимая P_t для 256-KAM значительно выше, чем для 64-KAM (39,6 дБм по сравнению с 33,5 дБм). Поскольку мощность передатчика значительно влияет на размеры площади, исключаемой для использования другими пользователями (см. рисунок 15), то исключаемая площадь для 256-KAM значительно превышает аналогичную площадь для 64-KAM, что делает 64-KAM более эффективной с точки зрения использования спектра, чем 256-KAM.

ТАБЛИЦА 6
Сравнение SUE для 64-KAM и 256-KAM при антеннах типа SHD

Параметр	64-KAM	256-KAM
VC	2 016	2 688
B (МГц) (см. таблицу 4)	22,5	22,5
P_t (дБм) (см. таблицу 4)	33,5	39,5
I_{\max} (дБм)	-102,5	-102,5
A (км ²) (см. рисунок 12)	421	830
SUE (см. таблицу 5)	0,212	0,144

Однако возможности сохранения спектра любой системы зависят от многих факторов проектирования, каждый из которых должен учитываться при оценке эффективности использования спектра данной системой. То есть никто не может сказать, что данная система с конкретным видом модуляции является более экономно использующей спектр, чем какая-либо другая система с другим видом модуляции, не рассмотрев при этом все прочие факторы проектирования системы (например, антенна, обработка сигнала, фильтрация по РЧ и т. д.).

Таблица 5 может быть также использована для определения сравнительного улучшения сохранения спектра при использовании антенн типа SHD и CHR по сравнению с STD. Как было указано ранее, степень улучшения сохранения спектра для антенн типа SHD и CHR зависит от используемого вида модуляции. Это объясняется тем, что размеры исключаемой площади, создаваемой системой с определенным типом антенны, зависят от P_t , которая в свою очередь зависит от используемого вида

модуляции (см. рисунок 15). В таблице 7 показана в процентах степень повышения SUE при различных видах рассматриваемой модуляции на основе данных по SUE, представленных в таблице 5. Для цифровой модуляции наибольшее улучшение имеет место при модуляции 256-KAM, составляющее 28% и 533% при использовании антенн SHD и CHR соответственно.

ТАБЛИЦА 7

Улучшение SUE в зависимости от модуляции при антеннах типа SHD и CHR

Вид модуляции	Улучшение SUE	
	Антенна SHD	Антенна CHR
16-KAM	–8%	130%
64-KAM	6%	338%
256-KAM	28%	533%

2.4.4 Обработка сигнала

В фиксированных радиорелейных системах обработка сигнала производится как на передающей, так и на приемной стороне. Обработка сигнала заключается в электрическом воздействии на сигнал с целью придания ему определенных желаемых свойств. Обработка сигнала влияет на такие его параметры, как амплитуда, частота, фаза, уровень и надежность. Использование методов обработки сигналов может повысить усиление системы, позволяя использовать более низкие уровни P_t при заданных качественных характеристиках сигнала на выходе приемника. Таким образом, с помощью обработки сигнала P_t может быть снижена, уменьшая при этом пространство (площадь), исключаемую для других пользователей. Следует отметить, однако, что различные методы обработки сигнала используются проектировщиками микроволновых линий связи для повышения надежности линии и, в общем случае, не рассматриваются ими в целях сохранения спектра.

2.4.5 Кодирование с коррекцией ошибок

Упреждающая коррекция ошибок (FEC) представляет собой некоторый метод улучшения качества работы цифровых микроволновых систем благодаря снижению уровня ошибок в канале связи (BER). Использование методов FEC позволяет исправить некоторую часть битовых ошибок на приемной стороне посредством специального кодирования и использования соответствующих программных (или аппаратных) средств на обоих концах цепи. Такое снижение BER может быть использовано для уменьшения необходимого отношения $(C/N)_i$ в приемнике при заданной выходной BER, что приводит к уменьшению площади, исключенной для использования другими системами. Такое уменьшение $(C/N)_i$ называют выигрышем за счет кодирования. Действие методов кодирования описывается через выигрыш за счет кодирования и через скорость кодирования. Скорость кодирования, однако, влияет на ширину занимаемой полосы частот системы, что приводит к исключению спектра для других его пользователей.

Для демонстрации влияния кодирования на сохранение спектра для анализа выбрана 64-KAM. Были выбраны четыре типа кодов FEC. В таблице 8 представлены следующие параметры: скорость кодирования, коэффициент расширения полосы частот ($1/\text{скорость кодирования}$), занимаемая ширина полосы частот после кодирования, получаемое уменьшение $(C/N)_i$ при BER 1×10^{-6} и необходимая P_t после учета получаемого уменьшения $(C/N)_i$. Величины ширины полосы частот и мощности из таблицы 8 были использованы в качестве исходных данных в модели расчета SUE с целью оценки кодирования как средства для сохранения спектра. В таблице 9 представлены SUE для антенн типа STD, SHD и CHR. В таблице 9 показаны также SUE для 64-KAM без кодирования, чтобы иметь основу для сравнения систем с кодированием и без кодирования.

ТАБЛИЦА 8

Кодирование с коррекцией ошибок (64-КАМ)

Обработка сигнала	Скорость кодирования	Коэффициент расширения полосы частот	Занимаемая полоса, B (МГц)	Снижение C/N (дБ)	Выходная мощность передатчика, P_t (дБм)
Кодирование с коррекцией ошибок	1/2	2	45,00	6,0	27,5
	3/4	1,333	30,00	3,5	30,0
	7/8	1,142	25,70	2,0	31,5
	18/19	1,055	23,74	3,0	30,5

Таким образом, величины SUE, приведенные в таблице 9, показывают, что такие методы обработки сигналов, как кодирование с коррекцией ошибок, которые используют снижение C/N за счет расширения полосы частот по РЧ, обеспечивают значительное улучшение сохранения спектра и большие значения SUE только при использовании высокоэффективного кодирования (то есть при методах кодирования с высокой скоростью кодирования и выигрышем за счет кодирования). Кроме того, относительное улучшение сохранения спектра оказывается большим, когда в системе используется антенна STD, а не SHD или CHR. Это объясняется тем фактом, что уменьшение исключаемой площади получается большим для антенн STD благодаря их более высоким характеристикам подавления боковых и задних лепестков.

ТАБЛИЦА 9

SUE при кодировании с коррекцией ошибок (64-КАМ)

Вид обработки сигнала		SUE для антенн различных типов		
		STD	STD	STD
Без обработки сигнала		0,201	0,212	0,811
Кодирование с коррекцией ошибок	Скорость кодирования			
	1/2	0,230	0,211	0,532
	3/4	0,249	0,240	0,673
	7/8	0,235	0,237	0,754
	18/19	0,294	0,285	0,838

2.4.6 Адаптивный/трансверсальный корректор

Адаптивный/трансверсальный корректор улучшает работу цифровых систем при замираниях в случае многолучевого распространения, линейных искажениях и при одновременном их действии. Корректор может бороться только с дисперсностью многолучевого замирания. Адаптивные корректоры изменяют форму импульсов таким образом, чтобы уменьшить межсимвольные помехи. С помощью корректора, устанавливаемого в приемнике 64-КАМ, можно добиться улучшения запаса на суммарное затухание примерно на 4–6 дБ. Основным недостатком адаптивных корректоров является их дороговизна. Имеется модель такого корректора для системы с полосой 22,5 МГц и P_t 29,5 дБм (уменьшение P_t на 4 дБ для 64-КАМ). В таблице 10 представлены величины SUE для трех типов антенн. Показаны также величины SUE при отсутствии адаптивных корректоров, позволяющие произвести сравнение со случаем применения адаптивных корректоров.

ТАБЛИЦА 10

Улучшение SUE с адаптивным корректором (64-KAM)

Вид обработки сигнала	SUE для антенн различных типов		
	STD	SHD	CHR
Без обработки	0,201	0,212	0,811
Адаптивный корректор	0,355	0,337	0,930

При 64-KAM применение адаптивного корректора может дать улучшение способности сохранения спектра приблизительно от 15% до 75%, причем большее улучшение достигается при использовании антенн типа STD.

2.4.7 Кодирование с коррекцией ошибок и адаптивные корректоры

В некоторых цифровых системах для улучшения качества работы системы используются одновременно и кодирование с коррекцией ошибок, и адаптивные корректоры. При 64-KAM использование кодирования с коррекцией ошибок (скорость кодирования 18/19) и адаптивного корректора может дать уменьшение необходимого отношения $(C/N)_i$ на 7 дБ при $BER = 1 \times 10^{-6}$. Результаты применения модели SUE для занимаемой ширины полосы 23,74 МГц и P_t 26,5 дБм (снижение P_t на 7 дБ для 64-KAM) представлены в таблице 11. В таблице 11 показано, что использование кодирования с коррекцией ошибок совместно с адаптивным корректором может привести к улучшению сохранения спектра на 30–50% при большем улучшении при использовании параболических антенн.

ТАБЛИЦА 11

SUE при использовании кодирования с коррекцией ошибок совместно с адаптивным корректором (64-KAM)

Вид обработки сигнала	SUE для антенн различных типов		
	STD	SHD	CHR
Без обработки	0,201	0,212	0,811
Кодирование с коррекцией ошибок и корректор	0,503	0,441	1,066

2.4.8 Выводы

2.4.8.1 Способность системы к сохранению спектра зависит от нескольких проектных факторов, каждый из которых должен быть учтен при оценке SUE системы. Таким образом, никто не может сказать, что какая-либо система с конкретной модуляцией сохраняет спектр в большей степени, чем другая система с другой модуляцией, не рассмотрев всех прочих проектных факторов, таких как антенна, обработка сигнала, фильтрование по РЧ и т. д.

2.4.8.2 Системы с цифровой модуляцией более высокого порядка (модуляция с более высокой эффективностью передачи, бит/(с · Гц)) требуют и более высокого уровня P_t . Следовательно, при определении использования спектра и эффективности, которые включают рассмотрение исключаемой зоны, может оказаться, что виды модуляции, обладающие высокой эффективностью передачи, не обязательно при этом обладают и большей способностью сохранять спектр. Таким образом, эффективность передачи при цифровой модуляции может оказаться недостаточной для ее использования в качестве показателя эффективного использования спектра.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительную информацию можно найти в:

HINKLE, R.L. and FARRAR, A.A., [May 1989] "Spectrum-conservation techniques for fixed microwave systems". NTIA Report TR-89-243. National Telecommunication and Information Administration. US Dept. of Commerce, United States of America.

2.5 RSE для однопролетных сельских радиорелейных линий

Величины RSE для однопролетных сельских радиорелейных систем "пункт – многие пункты", использующих различные виды модуляции, были сравнены с MTES (см. пункт 3 и формулу (4) в Приложении 1).

В модели, принятой для такой сети, каждая центральная станция имеет конкретную зону обслуживания, в пределах которой она обеспечивает связь однопролетными линиями с четырьмя местными станциями, расположенными в различных точках в сельской местности.

RSE такой сети по отношению к MTES рассматривалась как функция большого числа параметров: используемая полоса частот, тип частотного и поляризационно-пространственного планирования сети, высота установки антенны и диаметр антенны при различных видах и параметрах модуляции (ЧМ и импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) с многоуровневой ФМН).

В таблице 12 представлены некоторые из результатов этих расчетов в случае работы сети в диапазоне 8 ГГц, при высоте установки антенны 45 м, при диаметре антенны D , равном 1,5 м и 3,0 м, при 2- или 4-частотной работе ($K = 2$ и $K = 4$ соответственно) и при двух видах плана поляризации – с одной (1P) и двумя (2P) поляризациями. Для ИКМ результаты приведены при 2-уровневой ФМН ($M = 2$), 4-уровневой ФМН ($M = 4$) и при величине (M_{\max}), обеспечивающей максимум RSE. Прочерки в таблице 12 указывают на то, что при таких сочетаниях параметров нормы на качественные характеристики передачи не удовлетворяются. Как видно из таблицы 12, использование ИКМ с ФМН дает выигрыш для RSE только при оптимальных условиях модуляции ($M_{\max} \geq 8$) и при диаметре антенны 3 м.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительную информацию можно найти в: Приложение IV к Отчету 662-3 (Дюссельдорф, 1990 г.).

ТАБЛИЦА 12
RSE для однопролетной сельской радиорелейной линии

Модуляция	Частотный план	Параметры модуляции	RSE			
			$D = 1,5 \text{ м}$		$D = 3,0 \text{ м}$	
			1P	2P	1P	2P
ЧМ	$K = 2$		0,27	0,3	0,285	0,285
	$K = 4$		0,2	0,25	0,25	0,25
ИКМ	$K = 2$	$M = 2$	–	–	0,055	0,049
		$M = 4$	–	–	–	–
		M_{\max}	–	–	0,055	0,055
	$K = 4$	$M = 2$	0,125	0,0625	0,0625	0,0625
		$M = 4$	0,125	0,125	0,125	0,125
		M_{\max}	0,25	0,25	0,25	0,5

2.6 Использование спектра системами связи "из пункта в пункт" (СПП)

2.6.1 Введение

В общем случае эффективность использования спектра для системы СПП задается комплексным параметром:

$$SUE = \{M, U\}, \quad (44)$$

где:

- M : полезный эффект, получаемый от рассматриваемой системы СПП;
 U : коэффициент использования спектра для этой системы.

2.6.2 Определение полезного эффекта для системы СПП

Полезный эффект системы СПП может быть применен к аналоговым и цифровым системам. В качестве отправной точки для определения полезного эффекта аналоговой системы можно было бы просто принять число переданных телефонных каналов. Однако в СПП интересно учитывать общее расстояние, на которое передается информация. Следовательно, для аналоговых СПП полезный эффект может быть определен как:

$$M = n_{vc} \cdot D, \quad (45)$$

где:

- M : полезный эффект, получаемый от аналоговой системы СПП;
 n_{vc} : число телефонных каналов, переданных по линии;
 D : расстояние, на которое передается информация.

Для конкретной линии используемым расстоянием D является протяженность реальной линии. Однако при оценке типичной системы применяются типичные значения D в соответствии с рабочей частотой системы.

В цифровых системах полезный эффект может измеряться скоростью передачи, умноженной на общее расстояние, на которое передается информация.

В информации, передаваемой цифровой системой, полезные данные сопровождаются большим объемом агрегированных данных (заголовков). Этот заголовок включает протоколы управления, коды обнаружения и коррекции ошибок и информацию, относящуюся к управлению системой. Общую скорость передачи системы определяют заголовок и полезные данные. Для измерения объема переданной полезной информации предлагается использовать коэффициент заголовка.

$$M = T_{TR} \cdot O_F \cdot D, \quad (46)$$

где:

- M : полезный эффект, получаемый от рассматриваемой системы СПП;
 T_{TR} : общая скорость передачи системы;
 O_F : коэффициент заголовка, принимающий значения между 0 и 1;
 D : расстояние, на которое передается информация.

Если известна скорость передачи сообщений пользователя, то использование коэффициента заголовка может быть заменено эффективной скоростью передачи.

$$M = E_{TR} \cdot D, \quad (47)$$

где:

- M : полезный эффект, получаемый от рассматриваемой системы СПП;
 E_{TR} : эффективная скорость передачи системы;
 D : расстояние, на которое передается информация.

В случаях, когда невозможно определить общую или эффективную скорость передачи, можно принять минимальную требуемую скорость передачи для радиочастот оборудования.

2.6.3 Определение коэффициента использования спектра для систем СПП

Коэффициент использования спектра для системы СПП можно определить с помощью следующего уравнения:

$$U = B \cdot S \cdot T, \quad (48)$$

где:

- U : коэффициент использования спектра для системы СПП;
- B : запрещенная полоса радиочастот;
- S : запрещенное геометрическое пространство (область);
- T : запрещенное время, принимающее значения между 0 и 1.

Шириной полосы радиочастот B является маска, определяемая в конкретном регламентарном положении, касающемся радиочастот. Можно также использовать ширину канала в ситуациях, когда информация о маске отсутствует.

При расчете запрещенного геометрического пространства S должна учитываться как запрещенная область передатчика, так и запрещенная область приемника, основанные на реальных параметрах линии. Запрещенным геометрическим пространством A_S будет сумма запрещенных областей сектора вокруг передатчика и приемника. В случаях, когда запрещенная область передатчика включает общую запрещенную область приемника, нет необходимости рассчитывать запрещенную область приемника. В ином случае для получения общей запрещенной области S нужно добавить долю области приемника, не входящую в область передатчика, к области передатчика.

Для расчета запрещенной области вокруг передатчика или приемника следует учитывать диаграмму направленности антенны. Запрещенная область может быть рассчитана как сумма областей угловых секторов, в которых усиление антенны может считаться приблизительно постоянным.

$$S = \sum_{i=1}^n A_{Si}, \quad (49)$$

где:

- S : запрещенное геометрическое пространство (км²);
- A_{Si} : запрещенная область в i -м секторе (км²);
- n : число секторов.

Области секторов A_S могут быть рассчитаны с помощью выражения:

$$A_S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta}{360}, \quad (50)$$

где:

- A_S : область сектора (км²);
- R : радиус сектора (км);
- θ : ширина сектора (градусы).

В принципе, как правило, для получения запрещенной области будет анализироваться вся окружность (все 360°) вокруг передатчика. Практические результаты, безусловно, продемонстрируют, что соответствующими будут только определенные значения ширины секторов с конкретной ориентацией (азимутом). Таким образом, во многих случаях для огибающей диаграммы направленности излучения рассматриваемой антенны можно учитывать лишь один сектор с шириной, равной ширине луча антенны по половинной мощности. При таком упрощении запрещенное геометрическое пространство S может быть рассчитано с помощью выражения:

$$S = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \theta_{HP}}{360}, \quad (51)$$

где:

S : запрещенное геометрическое пространство (км²);

R : радиус сектора (км);

θ_{HP} : ширина луча антенны по половинной мощности (градусы).

При расчете радиуса сектора для запрещенной зоны передатчика считается, что в направлении ширины луча каждого сектора имеется приемник, который наведен на передатчик. Аналогичным образом, при расчете радиуса сектора для запрещенной зоны приемника считается, что в направлении ширины луча каждого сектора имеется передатчик, который наведен на приемник. Радиус сектора может быть рассчитан с помощью выражения:

$$R = 10^{A/20}. \quad (52)$$

$$A = P_{TX} - L_{C\,TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{C\,RX} - I_{RX} - 20 \log(f) - 32,44 - A_D, \quad (53)$$

где:

P_{TX} : мощность передачи (дБм);

$L_{C\,TX}$: ослабление в цепях передачи (дБ);

G_{TX} : усиление антенны передатчика в центре ширины луча сектора (дБи);

G_{RX} : усиление антенны приемника в направлении передатчика (азимут) (дБи);

$L_{C\,RX}$: ослабление в цепях приемника (дБ);

I_{RX} : пороговый уровень помех приемника (дБм);

f : центральная рабочая частота (МГц);

A_D : дополнительное ослабление из-за дифракции (дБ).

Для дифракционных линий дополнительное затухание из-за дифракции A_D задается выражением:

$$A_D = 10 - \frac{20h}{F_1}, \quad (54)$$

где:

A_D : дополнительное затухание из-за дифракции (дБ);

h : расстояние между наихудшим препятствием и точкой прямой видимости (h отрицательна, если точка прямой видимости заслонена) (м);

F_1 : первый радиус эллипсоида Френеля как функция расстояния h (м).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для принятого дополнительного затухания из-за дифракции учитывается только одно наихудшее препятствие. В целях достижения большей реалистичности могут также быть приняты другие модели.

Моделью распространения, принятой для анализа типичной системы, было свободное пространство. Если местоположение системы известно, то могут быть также приняты другие менее консервативные модели распространения.

Пороговый уровень помех в приемнике, I_{RX} , может быть рассчитан двумя различными методами.

Метод А

Если известно максимальное значение отношения несущая/помеха приемника системы, испытывающей помехи, то можно считать, что сигнал C , принятый приемниками линии, которые испытывают помехи, равен чувствительности приемного оборудования, и непосредственно получить I_{RX} :

$$I_{RX} = C - C/I_{MAX}, \quad (55)$$

где:

I_{RX} : пороговый уровень помех в приемнике (дБм);

C : уровень сигнала, принятого приемниками, задаваемый чувствительностью приемного оборудования (дБм);

I_{MAX} : максимальный уровень помех в приемнике.

Метод В

Если значение C/I_{MAX} неизвестно, то для осуществления расчета I_{RX} должен быть определен минимально необходимый запас в приемнике. В таком случае:

$$I_{RX} = 10 \log \left[10^{(D + I_{EQ})/10} - 10^{I_{EQ}/10} \right]; \quad (56)$$

$$D = D_M - D_S; \quad (57)$$

$$D_M = M_C - M_M, \quad (58)$$

где:

I_{RX} : пороговый уровень помех в приемнике (дБм);

I_{EQ} : базовый уровень помех, рассчитанный исходя из отношения C/I_{MAX} для испытывающего помехи приемника, в котором уровень сигнала C приравнен к чувствительности приемника (дБм);

D : максимальное ухудшение, которое может создаваться анализируемым передатчиком (дБ);

D_M : максимальное ухудшение, допускаемое приемником (дБ);

D_S : ожидаемое ухудшение, появляющееся в приемнике (дБ);

M_M : минимально допустимый запас (дБ);

M_C : расчетный запас системы (дБ).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В случае типичной системы, для которой невозможно точно определить необходимый запас, значение M_C является желательным запасом системы.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Ожидаемое ухудшение D_S должно определяться путем расчета суммарных помех от других передатчиков вблизи от анализируемого приемника.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Если отсутствует информация о других системах, испытывающих помехи, принимается значение ухудшения, равное 3 дБ.

2.6.4 Проведение расчета SUE для систем СПП

В этом примере представлен анализ системы СПП с учетом того, что запрещенная область передатчика полностью включает запрещенную область приемника. В ситуациях, когда запрещенная область передатчика не включает полную запрещенную область приемника, доля области приемника, не входящая в область передатчика, должна быть прибавлена к области передатчика для получения общей запрещенной области S . Расчет запрещенной области приемника аналогичен расчету для передатчика.

В таблице 13 представлены характеристики цифровой системы, которые должны быть использованы в качестве примера расчета SUE для систем СПП. Полезный эффект может также быть рассчитан на основе этих параметров.

ТАБЛИЦА 13

Скорость передачи и коэффициент заголовка

Полоса радиочастот (ГГц)	Общая скорость передачи (Мбит/с)	O_F системы
8,5	17 (8 линий E1)	0,9035

Полезным эффектом для приводимой в качестве примера системы является эффективная скорость передачи, которая является произведением общей скорости передачи на коэффициент заголовка (уравнения (46) и (47)). В таблице 14 представлено рассчитанное значение эффективной скорости передачи, M .

ТАБЛИЦА 14

Эффективная скорость передачи, M

Эффективная скорость передачи (Мбит/с)
15,36

В таблице 15 представлена типичная протяженность тракта, D , для линий, работающих в конкретной полосе частот.

ТАБЛИЦА 15

Расстояние, на которое передается информация

Расстояние (км)
20,1

В таблице 16 представлена ширина полосы радиочастот, запрещенная вокруг системы.

ТАБЛИЦА 16

Ширина полосы радиочастот

Ширина полосы радиочастот (МГц)
7

В данном примере расчета считается, что система является постоянно действующей. Следовательно, предполагается, что значение параметра времени, T , в уравнении (48) равно 1.

В следующих таблицах представлены результаты расчета, необходимые для определения запрещенного геометрического пространства около передатчика и приемника систем СПП. Для лучшей организации последовательность предусматриваемых шагов разбита на пункты.

а) Ширина сектора, θ

Для различных полос частот используются антенны с конкретными характеристиками. Следовательно, параметр θ принимает различные значения для каждой полосы. В таблице 17 представлены ширина сектора и число секторов, принятых для примерной системы.

ТАБЛИЦА 17

Ширина сектора (θ)

Ширина сектора (градусы) ⁽¹⁾	Число принятых секторов ⁽²⁾
10	3

⁽¹⁾ Приблизительно соответствует ширине луча антенны по половинной мощности для огибающей диаграммы направленности излучения рассматриваемой антенны.

⁽²⁾ Число учитываемых секторов.

б) Радиус сектора, R

В таблице 18 представлены значения для параметров, которые могут быть непосредственно определены исходя из технических характеристик системы без какого-либо дополнительного расчета.

ТАБЛИЦА 18

Центральная частота и параметры радиосистемы

P_{TX} (дБм)	$L_{C\ TX}$ (дБ)	$L_{C\ RX}$ (дБ)	G_{RX} (дБи)	$f^{(1)}$ (ГГц)
24,5	4,4	4,2	36,7	8,45

⁽¹⁾ Центральная частота в верхней полосе радиочастот.

с) Усиление антенны передатчика, G_{TX}

G_{TX} — это усиление антенны передатчика в центре ширины конкретного сектора. В таблице 19 представлены рассчитанные значения G_{TX} для каждой ширины сектора θ , определенной в таблице 17.

ТАБЛИЦА 19

Усиление антенны передатчика для каждой ширины сектора* (дБи)

Ширина сектора θ_1	Ширина сектора $\theta_2^{(1)}$	Ширина сектора θ_3
$G_{TX\ 1}$	$G_{TX\ 2}$	$G_{TX\ 3}$
14,7	36,7	14,7

* Получено исходя из огибающей диаграммы направленности.

¹ Ширина сектора θ_2 располагается в центре главного лепестка антенны. Значения ширины луча θ_1 и θ_3 являются соседними с θ_2 .

В соответствии с уравнениями (52) и (53) каждое значение G_{TX} будет соответствовать одному значению R , учитывая, что в каждом выбранном секторе будет изменяться только усиление антенны передатчика.

д) Пороговый уровень помех приемника, I_{RX}

Было предложено два метода расчета порогового уровня помех приемника: непосредственный расчет исходя из отношения C/I_{MAX} приемника или расчет на основе минимально необходимого запаса в приемнике. Поскольку при втором методе требуется больше шагов, он будет использован для иллюстрации расчета.

В таблице 20 представлены типичные значения C/I_{MAX} и I_{EQ} , полученные на основании технических характеристик оборудования. Эти значения используются в уравнении (56).

ТАБЛИЦА 20

Значения C/I_{MAX} и I_{EQ}

C/I_{MAX} (дБ)	I_{EQ} системы ⁽¹⁾ (дБм)
17,0	-105,0

⁽¹⁾ Эти величины были получены с учетом C , равного пороговому уровню помех.

е) **Максимальное ухудшение, D**

В таблице 21 приведены параметры D_M , D_S , M_C и M_M для примерной системы и рассчитанное значение максимального ухудшения D (уравнения (57) и (58)), являющегося конечным интересующим параметром, который должен использоваться в уравнении (56).

ТАБЛИЦА 21
Параметры ухудшения

Рассчитанный или желательный запас, M_C (дБ)	Минимальный запас, M_M (дБ)	Максимальное ухудшение, D_M (дБ)	Ожидаемое ухудшение, $D_S^{(1)}$ (дБ)	Максимальное создаваемое ухудшение, D (дБ)
35,8	30,1	5,7	3,0	2,7

⁽¹⁾ Ожидаемое ухудшение, D_S , должно быть значением, полученным в условиях концентрации мешающих систем вблизи анализируемой системы. При отсутствии такой информации используется $D_S = 3$ дБ.

Используя значение D в уравнении (56), можно получить значение I_{RX} для системы.

При определении дополнительного ослабления из-за дифракции A_D , необходимого для расчета общего ослабления, в уравнении (54) для отношения h/F_1 было произвольно выбрано значение -2 . Это значение было установлено с учетом наличия кривизны Земли и создания дополнительного ослабления из-за дифракции, совместимого с практическими наблюдениями. Это утверждение можно проверить, просмотрев полученные радиусы секторов, которые представлены в таблице 22 и которые соответствуют значениям пределов помех, используемых для этих полос радиочастот.

После определения I_{RX} и A_D может быть рассчитан радиус R в уравнении (52).

На этом этапе может быть рассчитана запрещенная зона сектора. В таблицах 22 и 23 представлены соответствующие параметры.

ТАБЛИЦА 22
Параметры помех и радиусы секторов

I_{RX} (дБм)	Ширина луча θ_1		Ширина луча θ_2		Ширина луча θ_3	
	A_1 (дБм)	R_1 (км)	A_2 (дБм)	R_2 (км)	A_3 (дБм)	R_3 (км)
-105,6	12,0	4,0	34,0	49,9	12,0	4,0

ТАБЛИЦА 23
Зоны сектора и запрещенное геометрическое пространство

Ширина луча θ_1	Ширина луча θ_2	Ширина луча θ_3	Запрещенное геометрическое пространство, S (км ²)
A_{S1} (км ²)	A_{S2} (км ²)	A_{S3} (км ²)	
1,4	217,6	1,4	220,3

Суммируя запрещенные области сектора для каждого сектора, получаем запрещенное геометрическое пространство (S), являющееся конечным параметром при определении SUE. В таблице 24 приводятся окончательные результаты для данного примера.

ТАБЛИЦА 24
SUE для системы СПП

SUE (Мбит/с.км.МГц)
0,2

3 Использование спектра системами телевизионного и аудиорадиовещания

3.1 Введение

Предположим, что система телевизионного или аудиорадиовещания расположена в данном географическом районе с J передатчиками. В общем случае эффективность использования спектра задается комплексным параметром:

$$SUE = \{M, U\}, \quad (59)$$

где:

M : полезный эффект, получаемый от рассматриваемой системы радиовещания;

U : коэффициент использования спектра для этой системы.

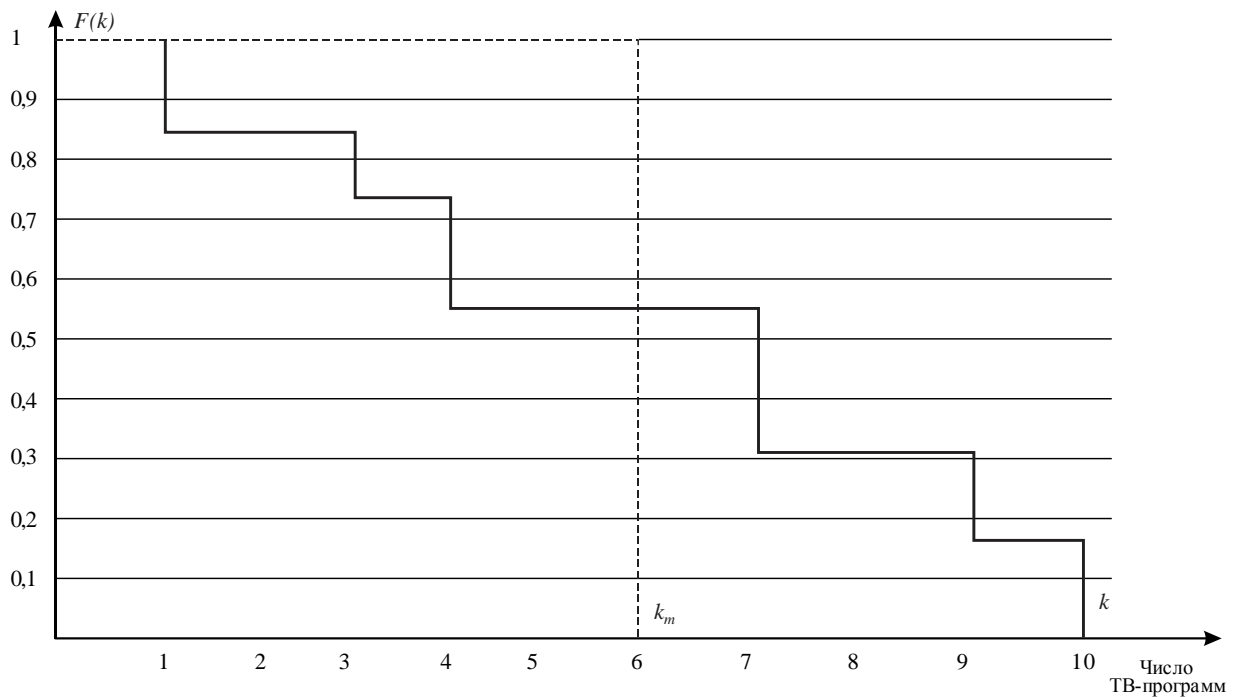
3.2 Определение полезного эффекта для системы телевизионного радиовещания

Полезность телевизионных радиопередач определяется числом пользователей (населением), способных принимать радиопередачи, как правило, в месте их проживания.

Полезный эффект системы телевизионного радиовещания должен изменяться в зависимости от плотности населения в различных частях рассматриваемого географического района и числа телевизионных программ, которые могут быть приняты. Доступность ТВ-программ для населения можно проиллюстрировать с использованием функции распределения, показанной на рисунке 16.

РИСУНОК 16

Доступность ТВ-программ для населения с использованием кумулятивной функции распределения



SM.1046-16

На рисунке 16 $F(k)$ — это доля пользователей, имеющих возможность принимать по крайней мере k телевизионных программ. Наибольшее значение функции представляет собой число пользователей, которым доставляется самое большое число программ и, как результат, — полезный эффект системы ТВ-радиовещания в данном географическом районе. Функция $F(k)$ дает достаточно полную характеристику полезного эффекта и отражает его структуру. Однако с практической точки зрения $F(k)$ не вполне подходит, в частности, для проведения оценки эффективности использования спектра системами телевизионного радиовещания. Более удобный подход состоит в использовании одномерного показателя, функционально зависящего от $F(k)$. Зная, что полезный эффект увеличивается с ростом $F(k)$, простой показатель может быть получен путем проведения расчета площади под кривой или основания эквивалентного прямоугольника k_m , имеющего ту же площадь (показанного на рисунке 16 пунктирной линией). Последнее соответствует среднему числу ТВ-программ, которые могут быть получены любым данным пользователем. Это число может быть использовано в качестве простого показателя полезного эффекта, создаваемого системами ТВ-радиовещания. Выражение для показателя полезного эффекта в аналитической форме приобретает вид:

$$M = k_m = \sum_{i=1}^I \alpha_i k_i, \quad (60)$$

где:

- I : число элементов, на которые разделен географический район;
- $\alpha_i = \frac{n_i}{N}$: доля населения, проживающего в пределах i -го элемента района;
- n_i : число жителей, проживающих в пределах i -го элемента района;
- k_i : число ТВ-программ, которые могут быть приняты в i -м элементе района;
- N : численность населения в географическом районе.

Примерный расчет полезного эффекта

Рассмотрим район с населением $N = 250\,000$ человек с числом отдельных элементов района $I = 9$. Разбивка населения и доступность ТВ-программ по элементам области (n_i и k_i , соответственно) приведены в таблице 25.

ТАБЛИЦА 25

Распределение населения и доступность ТВ-программ по элементам района

Элемент района	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_i , тысячи	20	10	60	0	100	10	40	10	0
k_i (вариант 1)	4	2	8	1	10	2	6	4	1
k_i (вариант 2)	1	2	4	1	4	8	10	6	2

Полезный эффект для первого варианта в таблице может быть рассчитан исходя из представленных данных с использованием уравнения (60), которое дает следующее:

$$M = \frac{20 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 8}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{40 \cdot 6}{250} + \frac{10 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} = 7,52 \text{ (программы)}$$

Если распределение полос частот осуществлено согласно второму варианту, при котором распределение населения не учитывается в полной мере, то полезный эффект рассчитывается следующим образом:

$$M = \frac{20 \cdot 1}{250} + \frac{10 \cdot 2}{250} + \frac{60 \cdot 4}{250} + \frac{0 \cdot 1}{250} + \frac{100 \cdot 4}{250} + \frac{10 \cdot 8}{250} + \frac{40 \cdot 10}{250} + \frac{10 \cdot 6}{250} + \frac{0 \cdot 2}{250} = 4,88 \text{ (программы)}$$

Этот пример показывает, что предлагаемый показатель полезного эффекта является точным показателем для выработки стратегий развития систем ТВ-радиовещания в рассматриваемом географическом районе.

3.3 Определение коэффициента использования спектра для систем ТВ-радиовещания

Использование спектра определяется путем учета ограничений, которые налагаются существующими ТВ-станциями на использование новых станций. Для ТВ-станции, расположенной в центре элемента зоны i , такими ограничениями могут быть общее число ТВ-каналов, K_i , или относительное число $U_i = \frac{K_i}{K}$, где K – общее число ТВ-каналов. Считается, что условия ЭМС не выполняются в данном

ТВ-канале, если вредные помехи, создаваемые одним или несколькими ТВ-передатчиками, препятствуют нормальной работе приемников, работающих с новым ТВ-передатчиком, или если новый ТВ-передатчик, передающий сигналы на частоте этого канала, создает неприемлемые помехи для приемников, осуществляющих связь с существующими телевизионными передатчиками, включая те передатчики, которые работают на некоторых других ТВ-каналах. Помехи могут учитываться в совмещенном, соседнем, гетеродинном и зеркальном каналах.

Поскольку ограничения зависят от положения теоретического нового передатчика, получается несколько результатов. Их можно упростить, взяв ограничения, получаемые для различных местоположений на рассматриваемой территории, и выполнив соответствующий расчет. Лучше всего рассчитать взвешенное среднее значение ограничений во всех теоретических местоположениях нового передатчика, взяв в качестве взвешивающего фактора долю населения, проживающего в районе каждого местоположения. Такой способ, во-первых, позволяет доказать, что величина спектра, выделенного телевизионным системам, увеличивается с ростом плотности населения. Во-вторых, при этом согласуются два показателя M и U , которые применяются для того, чтобы охарактеризовать использование спектра. Таким образом, коэффициент использования спектра может быть определен с использованием уравнения:

$$U = \sum_{i=1}^I \alpha_i U_i, \quad (61)$$

где:

$U_i = \frac{K_i}{K}$: доля полос частот, запрещенных для использования теоретическим новым ТВ-передатчиком, расположенным в центре i -го элемента области.

3.4 Проведение расчета SUE для систем ТВ-радиовещания

Для оценки эффективности использования спектра системами ТВ-радиовещания рекомендуются осуществить следующие шаги:

- разделить географический район на элементы площадью от 3 до 5 км²;
- определить долю α_i от общего населения, проживающего в i -м элементе района;
- определить длины радиусов зон обслуживания R_s существующих передатчиков ТВ-систем на основе их технических характеристик;
- рассчитать расстояния R_{ij} от центра каждого элемента района i до передатчиков существующих систем;
- определить число существующих ТВ-передатчиков для каждого элемента района, в зону обслуживания которых он попадает, путем сравнения R_s и R_{ij} ;
- обобщить полученные результаты для отдельных элементов района и рассчитать полезный эффект с использованием уравнения (60);
- провести моделирование передатчика новой системы и рассчитать отношения S/N на входах приемников, осуществляющих связь с существующим и новыми ТВ-передатчиками;
- определить полосы частот, в которых не соблюдается ЭМС между новым ТВ-передатчиком и осуществляющими с ним связь приемниками, с одной стороны, и между существующими ТВ-передатчиками и их приемниками, с другой стороны;
- обобщить результаты, полученные для отдельных элементов района, и использовать уравнение (61) для расчета коэффициента использования спектра.

Результаты оценки могут быть представлены в виде географической карты, на которой показаны значения полезного эффекта и коэффициента использования спектра в рассматриваемом районе (см. рисунок 17), или путем проведения расчета среднего значения для всего района.

3.5 Примечания в отношении оценки SUE для систем звукового радиовещания

Природа использования спектра системами звукового радиовещания и системами ТВ-радиовещания во многих отношениях аналогична. Некоторые различия имеют место из-за того, что значительное число относительно активных пользователей систем звукового радиовещания состоит из владельцев частных автомобилей и пассажиров. Поэтому при проведении расчета полезного эффекта и коэффициента использования спектра было бы полезно учесть тот факт, что большая доля пользователей услуг радиовещания находится на главных автодорогах и магистралях.

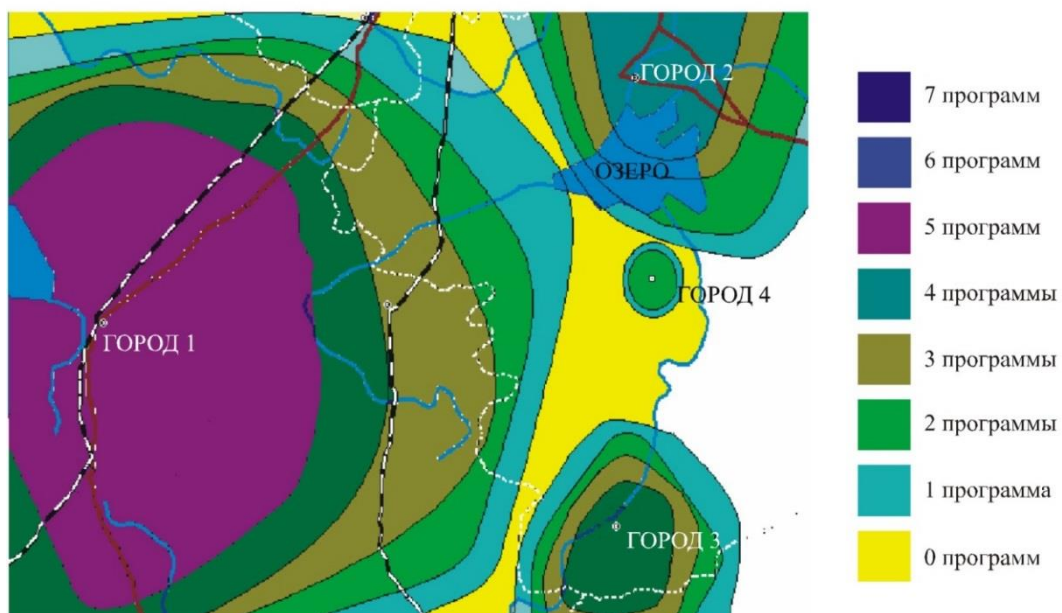
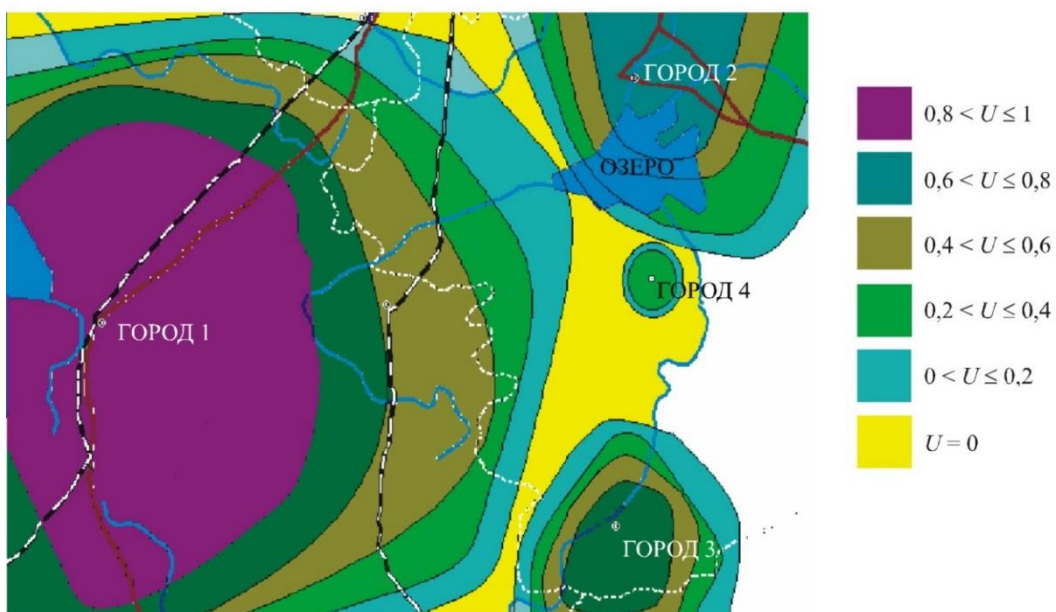
Как и в случае ТВ-систем, предлагается рассчитывать полезный эффект как среднее число k_m программ звукового радиовещания, которые пользователь может принимать в данном районе. Коэффициент использования спектра рассчитывается аналогичным образом как среднее число ожидаемого числа полос частот, запрещенных для использования данной новой системой звукового радиовещания из-за несоблюдения условий ЭМС для существующих систем.

Проведение оценки коэффициента использования спектра для системы звукового радиовещания зависит от следующих конкретных условий:

- Элементы района, содержащие главные автодороги, сравнимы с городскими районами (ввиду наличия пользователей услуг звукового радиовещания), и коэффициенты α_i определяются для них соответствующим образом.
- При определении коэффициента использования спектра учитываются сочетания несовместимых полос частот, типичные для системы звукового радиовещания; следовательно, необходимо учитывать тот факт, что системы звукового радиовещания могут работать в общей полосе частот без помех в гетеродинном и зеркальном каналах.

РИСУНОК 17

Оценка использования радиочастотного спектра

Карта полезного эффекта, M Карта коэффициента использования спектра, U Обобщенный показатель: $SUE = (M = 3,2 \text{ программы}, U = 0,4)$

SM.1046-17