

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Северо-Кавказский филиал  
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»

**А.Г. ЖУКОВСКИЙ, В.И. ЮХНОВ**

Методические указания  
по выполнению контрольной работы  
по дисциплине

**СЕТИ И СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ**

Направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи.

Профиль «Инфокоммуникационные системы и сети»

Ростов-на-Дону  
2022

Методические указания  
по выполнению контрольной работы  
по дисциплине  
СЕТИ И СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ

Составители: А.Г. Жуковский, проф. каф. «ИТСС»,  
В.И. Юхнов зав. кафедрой ИТСС

Рассмотрено и одобрено  
на заседании кафедры ИТСС  
Протокол от «19» 12 2022 г., № 5.

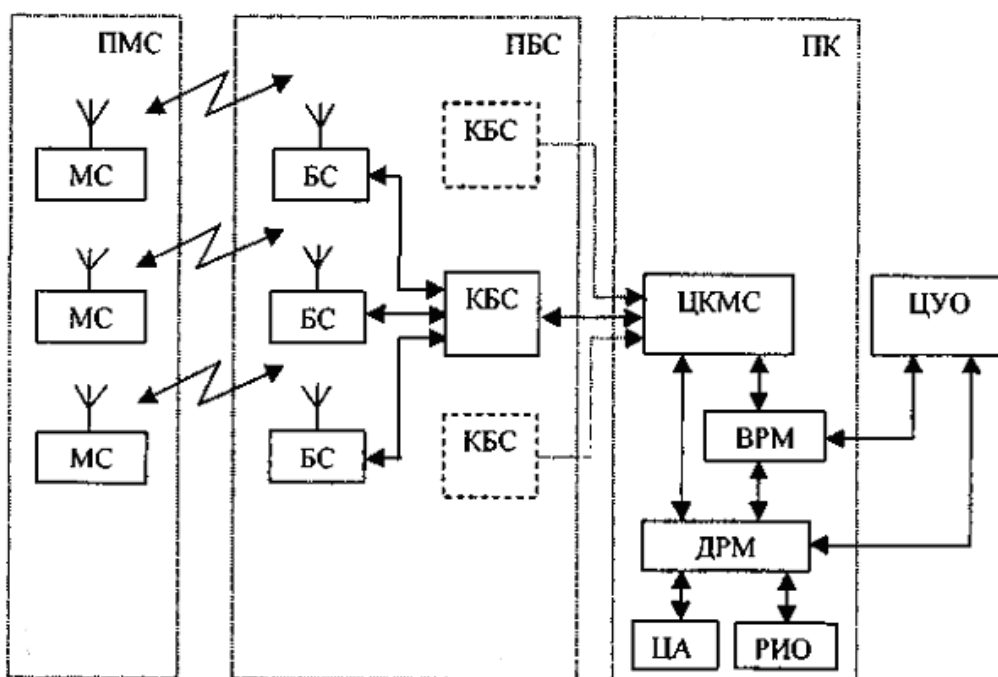
## СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие сведения о построении систем сотовой связи .....	4
2 Расчет зоны покрытия радиосигналом базовой станции на основе использования моделей предсказания уровня сигнала .....	6
2.1 Цель задания .....	6
2.2 Общие положения .....	6
2.3 Модель Окамуры .....	7
2.4 Модель Ли .....	13
2.5 Модель Хата .....	18
2.6 Контрольное задание .....	20
3 Расчет отношения сигнал/интерференция .....	22
3.1 Цель задания .....	22
3.2 Деление обслуживаемой территории на соты .....	22
3.3 Расчет отношения сигнал – интерференция .....	24
3.4 Контрольное задание .....	26
Список источников .....	28

## 1 Общие сведения о построении систем сотовой связи

Хотя сотовые системы разных стандартов имеют значительные отличия в деталях, интегральное их описание с помощью некоторой обобщенной модели возможно и полезно. В качестве подобного обобщения выберем схему ССМС, приближенную к стандарту GSM, как наиболее отчетливо структурированную. Функциональное построение ССМС иллюстрируется схемой на рис. 2. В приведенной схеме условно можно выделить четыре основных компонента - центр управления и обслуживания (ЦУО) (иначе *operations and maintenance center*- OMC) и три подсистемы:

- подсистема мобильных станций ПМС (*mobile station subsystem* MSS);
- подсистема базовых станций ПБС (*base station subsystem* BSS);
- подсистема коммутации ПК (*switching subsystem* SSS), -функциональное сопряжение которых описывается рядом интерфейсов.



ЦУО является центральным элементом ССМС, который обеспечивает управление другими компонентами системы, а также контроль качества функционирования. Подсистема мобильных станций объединяет оборудование, обеспечивающее доступ абонентов в систему, главным звеном в архитектуре ССМС является подсистема коммутации, которая включает в себя центр коммутации мобильной связи ЦКМС (*mobile switching center* MSC), визитный (гостевой) регистр местоположения ВРМ (*visited location register* VLR), домашний регистр местоположения ДРМ (*home location register* HLR), центр

аутентификации ЦА (*authentication center AUC*) и регистр идентификации оборудования РИО (*equipment identity register EIR*). В подсистему базовых станций входят базовые приемо-передающие станции БС (*base transceiver station BTS*) и контроллеры базовых станций КБС (*base station controller BSC*).

Центр коммутации мобильной связи обслуживает группу сот и обеспечивает все виды соединений, в которых нуждается в процессе работы мобильная станция, т.е. коммутацию мобильных абонентов друг с другом, с абонентом ТФОП и др. На ЦКМС возлагаются также функции коммутации каналов, к которым относятся "передача обслуживания" (или "эстафетная передача") и переключение каналов в соте при появлении сильных помех и неисправностей, если только это не является обязанностью КБС. Помимо коммутационных задач ЦКМС, управляет процедурами слежения за мобильными станциями с помощью домашнего и визитного регистров местоположения для обеспечения доставки вызова, а также процедурами аутентификации и идентификации абонентов с помощью ЦА и РИО.

Блоки ДРМ и ВРМ по своей сути представляют собой базы данных. Первый содержит сведения о постоянно приписанных к данному ЦКМС абонентах и о видах услуг, которые им могут быть оказаны, второй содержит информацию об абонентах, временно находящихся в зоне обслуживания данного ЦКМС. Центр аутентификации обеспечивает возможность проведения процедуры аутентификации абонентов и шифрования передаваемых сообщений, РИО содержит сведения об эксплуатируемых мобильных станциях на предмет их исправности и санкционированного использования.

Контроллер базовых станций осуществляет управление несколькими БС, которые обеспечивают связь с МС через радиointерфейс, а также производит упаковку информации, передаваемой в ЦКМС, и ее распаковку при передаче в обратном направлении. К числу операций, производимых КБС, относятся передача обслуживания при переходе МС между сотами, контролируемыми одним и тем же КБС, передача вызовов между МС, находящимися в зонах действия разных БС, но одного и того же контроллера (в противном случае первичное управление возлагается на ЦКМС). Под управлением КБС осуществляются радиоизмерения в каналах связи, регулируется мощность передатчиков мобильных и базовых станций.

## 2 Расчет зоны покрытия радиосигналом базовой станции на основе использования моделей предсказания уровня сигнала

### 2.1 Цель задания:

1. Закрепить теоретические знания по моделям предсказания мощности принимаемого сигнала.
2. Изучить методику и получить практические навыки по исследованию возможностей применения данных моделей.
3. Привить навыки по эксплуатации информационных технологий, связанных с применением компьютеров при проведении расчетов.

### 2.2 Общие положения

В системах радиосвязи дальность радиогоризонта зависит от высот подвеса антенн. Как правило, высота антенны БС ( $h_{БС}$ ) составляет десятки - сотни метров, высота антенны МС - несколько метров. В этом случае дальность радиогоризонта  $d_{гр} = 25 \text{ км}; 35 \text{ км}; 50 \text{ км}$  при  $h_{БС} = 50; 100; 200 \text{ м}$ . В городских условиях здания практически исключают возможность прямой видимости между антеннами БС и МС и мощность принятого сигнала оказывается значительно ниже, чем в свободном пространстве. В среднем, дополнительное ослабление в городе на частоте  $f = 900 \text{ МГц}$  составляет 20...30 дБ при протяженности трассы  $R = 1 \dots 10 \text{ км}$ . Это ослабление вызвано в основном отражением и рассеянием энергии сигнала на крупных строениях. Принимаемый сигнал имеет многолучевую структуру и подвержен глубоким замираниям

Существует большое число моделей для прогнозирования уровня радиосигнала в СПР.

Рельеф местности существенно влияет на уровень сигнала. Известны два основных метода для учета его влияния: детерминированный и статистический. Первый позволяет рассчитать множитель ослабления по конкретному профилю пролета. Он применим, для линий связи по схеме "от пункта к пункту", например, РРЛ. В этом случае медианное значение мощности сигнала в точке приема - это то, которое превышает в течение 50% времени наблюдения (например, месяца). В сотовых системах, где БС должна обеспечить связь на территории соты, часто применяют статистический метод, при котором параметры рельефа (высота препятствий, их форма и взаимное расположение, наклон местности и т.п.) считаются случайными величинами. Характер рельефа местности в соте оценивают параметрами, усредненными на участках трассы протяженностью 5... 10 км.

Выбор энергетических параметров в сотовых системах радиосвязи должен обеспечить уверенный прием в зоне обслуживания БС. В точках приема на границе соты уровень сигнала будет различаться вследствие неодинакового влияния застройки и рельефа местности. Поэтому в сотовых системах радиосвязи путем усреднения по двум параметрам: по времени и по местоположению (по числу точек приема) определяют усредненную медианную мощность сигнала (УММС). УММС - это такое значение, которое превышает в течение 50 % времени месяца и в 50% точек приема, находящихся на расстоянии  $R$  от передающей станции.

### 2.3 Модель Окамуры

Модель для квазигладкой местности. Трасса протяженностью в несколько километров, на которой средняя высота неровностей не превышает 20 м определена в модели Окамуры как "квазигладкая". В модели Окамуры приняты базовые значения высоты антенны МС  $h_{MC}=3$  м и эффективной высоты антенны БС  $h_{BC}=200$  м, причем последняя определяется, как высота над средним уровнем квазигладкой поверхности. Уровень УММС для квазигладкой местности:

$$p_M(R) = p_0(f, R) - A_M(f, R) + H(h_{BC}, R) + H(h_{MC}, f) \quad (1)$$

где  $R$  - протяженность трассы;

$f$  - рабочая частота;

$p_0(f, R)$  - уровень мощности сигнала в точке приема при распространении в свободном пространстве определяется как:

$$p_0(f, R) = 10 \log(P_{BC}) + g_{BC} - 20 \log\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{R}{\lambda}\right) + g_{MC},$$

где  $P_{BC}$  - мощность передатчика БС, мВт;

$g_{BC}$  - коэффициент усиления антенны БС, дБ;

$g_{MC}$  - коэффициент усиления антенны МС, дБ;

$$\lambda = c/f.$$

Длина волны

$A_M(f, R)$  - дополнительное ослабление сигнала в городе (медианное значение) определенное для квазигладкого городского района при  $h_{MC}=3$  м и  $h_{BC}=200$  м;

$H(h_{BC}, R)$  - коэффициент «высота - усиление антенны БС», учитывающий, что высота антенны БС может отличаться от значения 200 м;

$H(h_{MC}, f)$  - коэффициент "высота - усиление антенны МС", учитывающий влияние реальной высоты антенны МС. Все названные величины представлены в литературе в виде графиков.

Дополнительное ослабление сигнала в городе  $A_M(f, R)$  представлено в виде функции аргумента  $f$ , при параметре  $R$ . Для построения таких зависимостей рекомендуем воспользоваться таблицей 1.

Таблица 1

$f, \text{ МГц}$	$A_M(f, R), \text{ дБ при}$							
	$R=1 \text{ км}$	$5 \text{ км}$	$10 \text{ км}$	$20 \text{ км}$	$30 \text{ км}$	$40 \text{ км}$	$50 \text{ км}$	$100 \text{ км}$
100	15	22	25	28	31	35	38	51
1000	20	27	30	33	37	41	46	61
3000	25	34	35	40	44	48	54	70

Влияние высоты антенны БС зависит от расстояния между МС и БС и практически не зависит от частоты в диапазоне 200... 2000 МГц. При  $R \leq 10 \text{ км}$  мощность принимаемого сигнала изменяется пропорционально квадрату высоты антенны, а при  $R \geq 30 \text{ км}$  - пропорционально кубу высоты, так что:

$$H(h_{BC}, R) = 20 \lg(h_{BCm}/200), \text{ при } R < 10 \text{ км}; \quad (2,а)$$

$$H(h_{BC}, R) = 30 \lg(h_{BCm}/200), \text{ при } R > 30 \text{ км}; \quad (2,б)$$

где  $h_{BCm}$  - высота антенны БС в метрах.

По формулам (2,а) и (2,б) вычисляют значения коэффициента "высота - усиление антенны БС" при  $R = 10 \text{ км}$  и  $R = 30 \text{ км}$ , и строят вспомогательный график, для определения этого коэффициента при других значениях  $R$ , не превышающих дальность радиогоризонта. При  $R > d_{PG}$  сигнал на входе приемника определяет дифракционная составляющая электромагнитного поля. При этом подъем антенны БС повышает уровень сигнала.

Влияние высоты антенны МС не зависит от протяженности трассы, поскольку эти антенны расположены ниже уровня городской застройки, а при  $h_{MC} < 3 \text{ м}$  оно одинаково на всех частотах и не зависит от характера застройки. Коэффициент "высота - усиление антенны МС"

$$H(h_{MC}, f) = 10 \lg(h_{MCm}/3) \quad (3)$$

где  $h_{MCm}$  - высота антенны МС в метрах.

При установке антенны МС выше 3 м значение коэффициента  $H(h_{MC}, f)$  становится зависимым от характера застройки. Для среднего города этот коэффициент зависит от частоты. Для средних городов при  $h_{MCm} > 3$ ,

$$H(h_{MC}, f) = 20 \lg(h_{MCm}/3), \text{ при } f=400 \text{ МГц} \quad (4)$$

$$H(h_{MC}, f) = 30 \lg(h_{MCm}/3), \text{ при } f=2000 \text{ МГц} \quad (5)$$

Он не зависит от частоты для крупных городов. При  $h_{MCm} < 3$  на всех частотах применима формула (3).

### Реальные трассы.

Модель Окамуры позволяет для местности, которая не относится к квазигладкой, путем введения поправочных коэффициентов в формулу (1) рассчитывать ожидаемый уровень медианной мощности сигнала с учетом



характера местности:

$$p_{MZ}(R) = p_M(R) + K_{ZO} + K_{ZH} + K_{Z3M} + K_{ZX}, \quad (6)$$

где

$K_{ZO}$  - поправочный коэффициент для пригородной зоны и открытой местности;

$K_{ZH}$  - поправочный коэффициент "для земной поверхности с наклоном";

$K_{Z3M}$  - поправочный коэффициент для участка "земля-море",

$K_{ZX}$  - поправочный коэффициент для холмистой местности.

В пригородной зоне потери сигнала при распространении меньше, чем в городе, поскольку в ней ниже здания и меньше препятствий. Как установил Окамура, эти потери уменьшаются с ростом частоты, или коэффициент  $K_{ZO}$  растет.

Его значения можно определить из таблицы 2.

Таблица 2

$f$ , МГц	400	1000
$K_{ZO}$ , дБ для пригородной зоны	8	10
$K_{ZO}$ , дБ в открытых местностях	24	30

Под "земной поверхностью с наклоном" подразумевают трассы, на которых рельеф плавно понижается (или повышается) на расстоянии 5 км и более. Для нее определяют средний угол наклона  $Y$  (рисунок 1, а). Угол считается отрицательным, если МС расположена на нижнем участке трассы. (рисунок 1, б). В этом случае нужно учитывать дополнительные потери мощности сигнала при распространении. (рисунок 2).

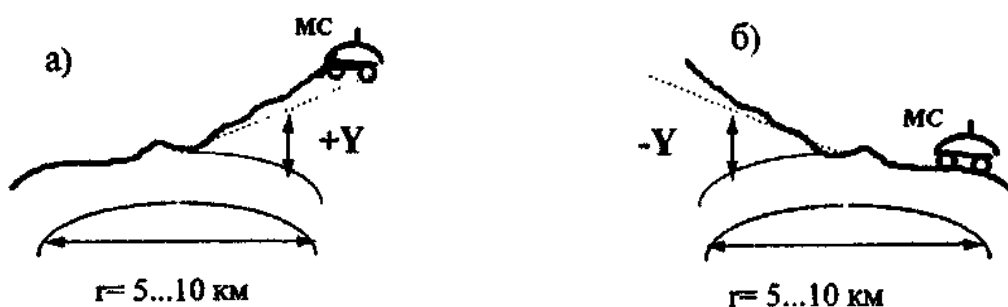


Рисунок 1

Медианная мощность сигнала возрастает, если трасса пересекает водную поверхность. Коэффициент  $K_{Z3M}$  зависит от отношения  $b = \Gamma_M/R$ , (рисунок 3), где  $\Gamma_M$  - протяженность трассы над водой. Кривая 1 на рисунке 3 для случая, когда водная поверхность ближе к приемной станции, 2 - к передающей.

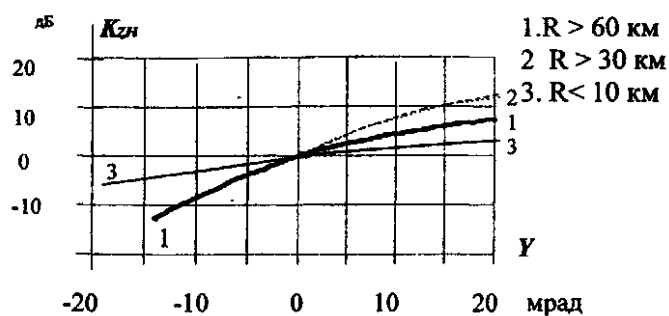


Рисунок 2

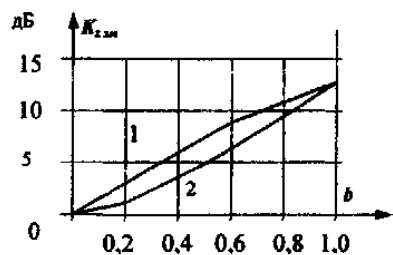


Рисунок 3

При распространении сигнала над холмистой поверхностью потери распространения увеличиваются по сравнению со случаем квазигладкой местности. Значение  $K_{zx}$  зависит от  $dh$  - средней высоты неровностей, которая может быть определена по рисунку 4, а как разность между высотами  $h$  (90%) и  $h$  (10%). Здесь  $h$  (90%),  $h$  (10%) - это значения высот местности на трассе протяженностью около 10 км, превышаемые в 90% и 10% точек профиля соответственно.

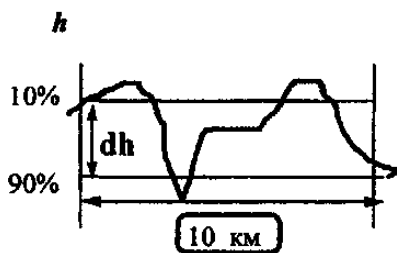


Рисунок 4,а

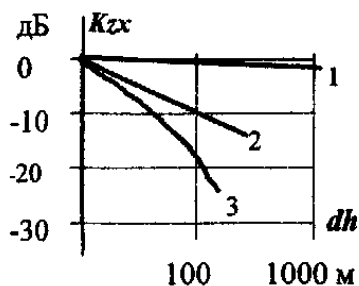


Рисунок 4,б

На рисунке 4.б кривая 1 соответствует случаю, когда МС находится у вершины холма, кривая 3 - у основания, а кривая 2 соответствует промежуточному положению и используется в расчетах. Значения  $dh$  определяют по таблице 3. При  $dh > 20$  м следует учитывать влияние холмистости, так как нарушается условие квазигладкой местности.

Таблица 3

Тип местности	$dh, м$	Тип местности	$dh, м$
1. Слегка холмистая равнина	20...40	4. Горы	150 ...300
2. Холмистая равнина	40 ...80	5. Высокие горные массивы	300...700
3. Холмы	80...150	6. Очень высокие горные массивы	свыше 700

Дополнительные факторы, которые могут влиять на значение уровня сигнала в конкретных ситуациях - это ориентация улиц и близость лесных массивов.

Влияние ориентации улиц и дорог. При радиальном расположении городских улиц относительно БС возможно возникновение волноводного эффекта, в результате которого может происходить усиление принимаемого сигнала. Принятые на МС сигналы, направления распространения которых параллельны направлениям улиц, имеют уровень мощности на 10...20 дБ выше, чем сигналы, приходящие с других направлений. На частотах ниже 1 ГГц этот эффект значительно ослаблен.

Влияние листвы. На распространение сигналов в лесной зоне влияют параметры деревьев (размер ствола, размер ветвей, плотность листвы, расстояние между деревьями, высота и др.). В тропических районах с очень густыми лесами сигнал может не проходить через лесной массив, и распространяется только за счет огибания верхушек деревьев и отражения от них. Некоторые сосновые леса сильно поглощают энергию сигнала, поскольку размеры иголок соответствуют примерно половине длины волны сигнала.

Зависимость от длины трассы. При решении ряда задач в процессе проектирования систем подвижной радиосвязи удобно пользоваться аналитической зависимостью между мощностью принимаемого сигнала ( $P_c$ ) и расстоянием между БС и МС. В общем виде такая зависимость имеет вид

$$P_c = K_o R^{-n} \quad (7)$$

Для свободного пространства  $n=2$ . В городских условиях ослабление сигнала гораздо больше и показатель  $n$ , полученный на основании обработки результатов измерений Окамуры, зависит от расстояния и высоты антенны БС, как показано на рисунке 5.

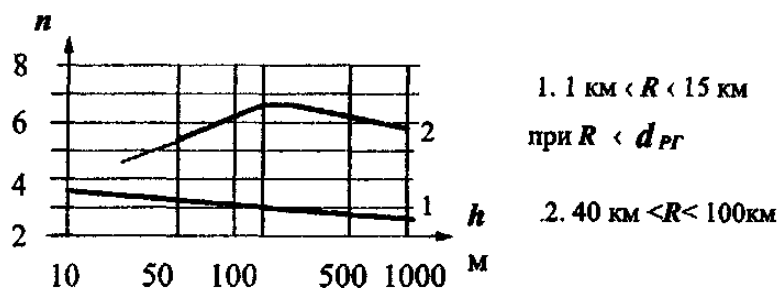


Рисунок 5

Если расстояние между БС и МС не превышает 15 км, то показатель степени  $n=4$  при малой высоте антенны БС, а при больших высотах значение близко  $n=2,5$ , т.е. близко к значению в свободном пространстве. Если же  $R>40$  км то сигнал резко затухает с увеличением расстояния. В большинстве задач принимают  $n=4$  в условиях городской застройки

На МС медианная мощность принимаемого сигнала

$$P_M(R) = 10^{0,1 P_M(R)} \quad (8),$$

где

$P_M(R)$  следует вычислять по (1) либо по (6).

Запишем (7) для медианной мощности сигнала,

$$P_M(R) = K_o R_{km}^{-4}, \quad (9)$$

где

$$K_o = P_M^{(1)} \quad (10)$$

- медианная мощность сигнала на расстоянии 1 км от БС, можно рассчитать по (8) и (1), либо (8) и (6);

$R$  - расстояние между БС и МС, выраженное в километрах.

Формула (9) справедлива в тех случаях, когда можно принять  $n=4$ , в остальных случаях используется общая формула (7).

Влияние рабочей частоты. С ростом рабочей частоты сигнал в городе затухает больше, чем в свободном пространстве. Можно представить

$$P_M(f) = K_F f^{-(2+m)} \quad (11)$$

где  $K_F$  - коэффициент пропорциональности, значение которого можно определить при энергетическом расчете;

$m$  - показатель, установленный экспериментальным путем.

Для свободного пространства  $m=0$ . В остальных случаях он определяется по рисунку 6. где кривые сняты при разных значениях частоты:

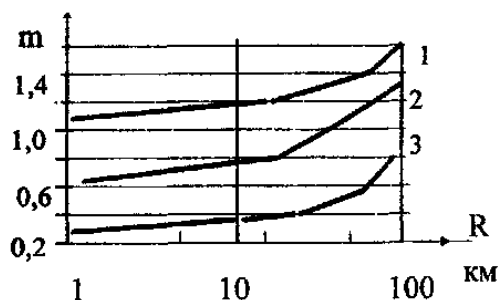


Рисунок 6

1)  $f=1...2$  ГГц,

2)  $f=0,5...1$  ГГц,

3)  $f=100$  МГц.

При  $R=1...10$  км, значение  $m$  практически определяет только частота, при  $R>10$  км ослабление сигнала с ростом частоты увеличивается и зависит от  $R$ .

## 2.4 Модель Ли

Модели Ли позволяют прогнозировать в диапазоне СВЧ уровень сигнала на входе приемника БС с учетом характера местности.

Местность классифицируют по двум признакам:

- 1) по структуре, сформированной человеком (характер застройки): открытая территория; пригородная зона; городская застройка
- 2) по естественным свойствам (характер трассы): гладкая трасса, холмистая, трасса над водной поверхностью, трасса через лиственные леса.

Первая модель Ли предсказания уровня сигнала - это модель "от зоны к зоне". На ее базе построена универсальная модель Ли "от пункта к пункту".

Модель "от зоны к зоне" создана на основании анализа экспериментальных измерений уровня сигнала (локального среднего), опубликованных разными авторами для зон с различным характером застройки. В ее основе два следующих экспериментальных параметра модели:

$P_1$  - уровень сигнала в точке, отстоящей от БС на 1 милю (или 1 км);

$\gamma$  - наклон кривой потерь распространения. Численно равен ослаблению сигнала при увеличении длины трассы в 10 раз; единица измерения - дБ на декаду (дБ/дек)

Согласно модели Ли, уровень мощности сигнала на входе приемника МС

$$p_c = p_1 + \alpha_1 - \gamma \lg R_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5, \quad (12)$$

где  $R_1$  - протяженность трассы в английских милях (1 миля = 1,6 км.);

$p_1$  и  $\gamma$  - параметры модели, определенные при типовых энергетических параметрах аппаратуры, указанных в таблице 4;

$\alpha_1 \dots \alpha_5$  - поправочные коэффициенты. Вводятся в случае, когда технические параметры радиointерфейса отличаются от типовых. Определяются по формулам таблицы 4. При этом влияние высот антенн учитывается также, как и в модели Окамуры.

Таблица 4

Параметры	стандартные значения	поправочные коэффициенты
Уровень мощности передатчика БС - $P_{BS}$	$P_{BS}^* = 40$ дБм	$\alpha_1 = P_{BS} - 40$
Высота антенны БС - $h_1$	$h_1^* = 100$ фут (30м)	$\alpha_2 = 20 \lg(h_1/h_1^*)$
Коэффициент усиления антенны БС - $g_1$	$g_1^* = 6$ дБ	$\alpha_3 = g_1 - 6$
Высота антенны МС - $h_2$	$h_2^* = 10$ фут (3м)	$\alpha_4 = 10 \lg(h_2/h_2^*)$
Коэффициент усиления антенны МС - $g_2$	$g_2^* = 0$ дБ	$\alpha_5 = g_2$

Для определения параметров модели использованы результаты измерения мощности сигнала на трассах. Зависимости уровня мощности сигнала, измеренные для этих трасс показаны на рисунке 7. Эти результаты получены при определенных стандартных параметрах, указанных в таблице 4.

Таблица 5

номер кривой на рисунке 7	трасса	$P_1$ , дБм	$\gamma$ , дБ/дек
1	открытая	-49	43,5
2	типовая пригородная	-61,7	38,4
3	Филадельфия	-70	36,8
4	Токио	-84	30,5
5	Нью Йорк Сити	-77	48
нет	свободное пространство	-45	20

Подставив в (12) параметры модели Ли для трассы "типовая пригородная" и выражение для  $\alpha_1$  из таблицы 4, записывают уровень мощности сигнала на входе приемника МС

$$p_c = -61,7 + (p_{BS} - 40) - 38,4 \lg R_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 \quad (13)$$

Поправка при подстановке протяженности трассы (  $R$  ) в километрах (1 миля = 1,6 км.):  $Z_1 = 38,4 \lg (R/1,6) = 38,4 \lg R - 7,84$

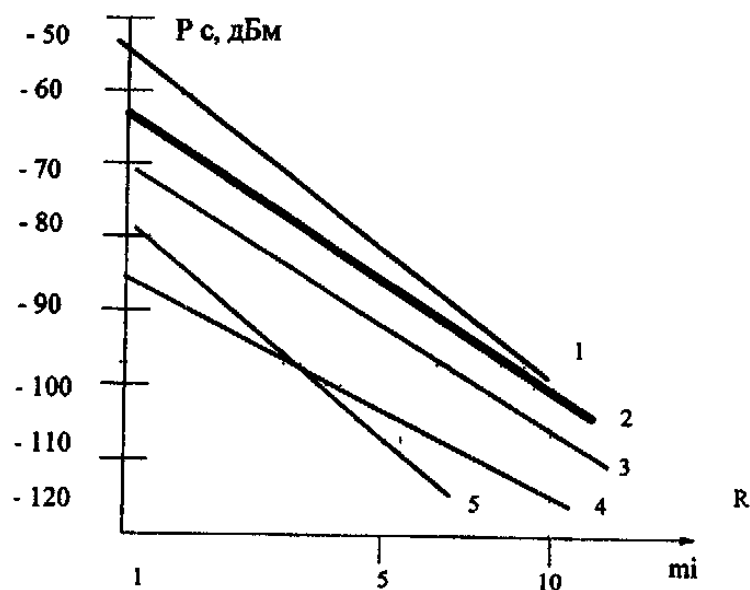


Рисунок 7

При стандартных параметрах, указанных в таблице 5, уровень мощности сигнала на расстоянии 1 км от БС равен

$$p_c(1) = -61,7 + 7,84 = -54 \text{ дБм}$$

Подставив величины  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$  в (13), находим

$$P_c = P_{BS} - 134,31 - 38,4 \lg R + 201g(h_1) + 10 \lg(h_2) + g_1 + g_2, \quad (14)$$

здесь  $R$  выражено в км, а  $h_1$  и  $h_2$  - в м.

Окончательно в модели Ли для трассы "типовая пригородная" принят наклон  $\gamma = 40 \text{ дБ/дек}$ , и контрольная точка на расстоянии  $R = 10 \text{ м}$  в которой поддерживается уровень мощности сигнала равным - 100 дБм, как показано на рисунке 7.

Расчетная формула по модели Ли

$$P_c = P_{BS} - 132,7 - 40 \lg R + 201g(h_1) + 10 \lg(h_2) + g_1 + g_2, \text{ дБм} \quad (15)$$

где  $R$  - в км,  $h$  - в м.

В модели Ли так объяснен физический смысл формулы (15)

слагаемое формулы	физический смысл
$p_{BS} - 132,7 = p_c^*(1)$	уровень мощности сигнала на расстоянии 1 км от БС при стандартных условиях, дБм
$- \gamma \lg R$	учитывает влияние сформированной структуры, $\gamma = 40 \text{ дБ/дек}$ для трассы "типовая пригородная"
$+ 201g(h_1)$	фактор, учитывающий естественные свойства трассы
$10 \lg(h_2) + g_1 + g_2$	фактор, учитывающий отклонение технических параметров от стандартных, указанных в таблице 4.

Дополнительные факторы, которые могут влиять на значение уровня сигнала в конкретных ситуациях - это ориентация улиц и близость лесных массивов.

Для того, чтобы установить характер зависимости уровня сигнала от расстояния, (15) представляют

$$p_c(R) = k_1 - 40 \lg R, \quad (16)$$

где

$$k_1 = p_c(1) = p_{BS} - 132,7 + 201g(h_1) + 10 \lg(h_2) + g_1 + g_2, \text{ дБм} \quad (17)$$

уровень мощности сигнала в точке приема на расстоянии 1 км от БС, для трассы "типовая пригородная", в диапазоне СВЧ. Мощность сигнала при этих

условиях:

$$p_c(1) = K_1 = 10^{0,1k_1} \text{ мВт}; \quad (18)$$

Мощность сигнала в точке приема на расстоянии  $R$  км от БС, с застройкой типа "типовая пригородная", в диапазоне СВЧ

$$p_c(R) = K_1 R^{-4} \text{ мВт}. \quad (19)$$

Связь между высотой антенны БС и характером трассы проявляется в следующем. При малой высоте антенны первая зона Френеля будет экранироваться естественными препятствиями и уровень сигнала может падать. Этот фактор является существенным для модели "от точки к точке".

В общем виде вместо (19) можно записать мощность сигнала в точке приема на расстоянии  $R$  км от БС, с застройкой любого типа

$$p_c(R) = K_i R^{-n}, \quad (20)$$

где  $K_i$  - мощность сигнала в точке приема на расстоянии 1 км от БС, для трассы с данным ( $i$  - тым) типом застройки, в диапазоне СВЧ;

$n$  - показатель затухания, зависит от типа застройки. Значения  $K_i$  и  $n$  можно найти на основании данных таблицы 5, а также (17) и (18). При расчете реальных трасс следует сравнить рассматриваемую территорию с подходящей структурой из таблицы 5. Поскольку все пригородные зоны похожи, то для них используют (19). Для городов показатели затухания существенно отличаются. Так для Токио  $n = 3$ , а для центральной части Нью-Йорка  $n = 5$ . В модели Ли указано, что в случае необходимости для конкретных трасс могут быть проведены простые измерения уровня сигнала на расстоянии 1 мили и 10 миль от БС. В каждой точке должно быть выполнено по 5-7 измерений и их результаты усреднены и локальные средние значения могут быть подставлены в формулу (20). В общем виде вместо (7) можно записать

$$p_c(R) = p_c(R_0) - \gamma \lg \frac{R}{R_0} + 20 \lg \frac{h_1}{h_1^*} + \alpha, \quad (21)$$

где

$p_c(R_0)$  - уровень мощности сигнала в точке приема на расстоянии  $R_0$  от БС при типовых энергетических параметрах аппаратуры, указанных в таблице 4;

$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5$  - суммарный поправочный коэффициент.

Модель "от пункта к пункту". Для модели Ли "от пункта к пункту" в качестве основной принята формула (21), которая может быть уточнена и распространена на следующие случаи:

1) открытая трасса

$$p_c(R) = p_c(R_0) - \gamma \lg \frac{R}{R_0} + 20 \lg \frac{h'_{1e}}{h_1^*} + \alpha \quad (22)$$



2) закрытая трасса

$$p_c(R) = p_c(R_0) - \gamma \lg \frac{R}{R_0} + 20 \lg \frac{h_{1e}''}{h_1^*} + L + \alpha \quad (23)$$

3) пролет БС - МС над водной поверхностью. Справедлива формула для свободного пространства.

В (22) и (23) обозначено:

$h_{1e}'$  - эффективная высота антенны БС на открытой трассе;

$h_{1e}''$  - условная эффективная высота антенны БС на закрытой трассе;

$L$  - дифракционные потери.

Эффективная высота антенны определяется также, как и на открытых пролетах РРЛ. Условную эффективную высоту антенны БС на закрытой трассе часто нельзя определить (не существует). Поэтому в (23) часто можно принять  $h_{1e}'' = h_1^*$ . Значение дифракционных потерь зависит от просвета на трассе и может быть найдено по дифракционной формуле или графикам также, как и на РРЛ.

Рассчитанные по (12) ... (23) значения могут быть скорректированы с учетом таких обстоятельств, как ориентация дорог и наличие лиственных лесов. В случае, когда БС расположена у дороги, уровень сигнала на МС, движущихся вдоль этой дороги будет ~ на 10 дБ выше, чем на МС, движущихся в перпендикулярном направлении, в радиусе около двух миль.

Если траектория радиосигнала пересекает лиственный лес, то нужно учитывать дополнительные потери из-за рассеяния его листвой. Эти потери могут добавляться в каждом конкретном случае. В ряде экспериментальных исследований было показано, что листва дает постоянное значение потерь, зависящее от протяженности трассы, (для трасс длиннее одного км). Поскольку параметры лесных массивов меняются, то и значение потерь изменяется от зоны к зоне. Поэтому в моделях принято потери в листве учитывать с помощью коэффициента погонных потерь, который измеряется в дБ на декаду, либо в дБ/м для коротких участков леса.

Теоретически предсказано, что потери в листве пропорциональны множителю  $f^{-4}$  тогда как в свободном пространстве - множителю  $f^{-2}$ . Также на частоте 800 МГц потери на трассе через лес составляют 40 дБ/дек, что на 20 дБ больше, чем в свободном пространстве при той же самой величине дополнительных потерь 20 дБ за счет характера застройки. Поэтому общие погонные потери составляют 60 дБ.

структура погонных потерь			
всего	потери свободного пространства	потери за счет застройки	потери в листве
60 дБ/дек	20 дБ/дек	20 дБ/дек	20 дБ/дек

Дополнительные потери в листве

$$\alpha_1 = 20 \frac{l}{(10R_1 - R_1)} = 2,22 \frac{l}{R_1}, \quad (24)$$

где  $R_1$  - расстояние от БС до начала лесного массива;

$l$  - протяженность лесного массива.

Из (24) видно, что чем ближе БС к началу лесного массива, тем сильнее ослабление сигнала листвой. Поэтому следует избегать расположения БС вблизи лиственных массивов. Антенны БС должны быть подвешены выше верхушек деревьев. Если вблизи леса находится МС, лесной массив может рассматриваться как препятствие и дополнительные потери могут быть рассчитаны по дифракционной формуле.

Модель Ли "от пункта к пункту" уменьшает неопределенность предсказания, так как в ней используются конкретные профили пролетов. Модель предпочтительна для сетей с зонами обслуживания 10 миль и менее. Эта модель используется при создании компьютерных программ для при генерации карт покрытия зоны сигналом, карт интерференции, карт для описания процесса эстафетной передачи и т.п.

## 2.5 Модель Хата

Стандартная модель Хата (Hata) построена на обработке результатов экспериментальных исследований. Эмпирические зависимости, используемые в модели Окамуры в виде графиков, в этой модели представлены в виде аппроксимирующих их формул. Согласно этой модели при статистическом учете параметров местности потери при распространении радиосигнала

$$L(R, f) = 69 + 26 \lg(f) - 13,8 \lg(h_e) + [44,9 - 6,5 \lg(h_e)] \lg R_{km} + a(h_{MC}) \quad (26),$$

где

$f$  - частота излучения БС в МГц;

$R_{km}$  - расстояние от БС до МС в км;

$h_e$  — эффективная высота установки антенны БС, м ;

$a(h_{MC})$  - величина, определенная в разделе 2.3 как коэффициент "высота - усиление антенны МС". Для нее в рассматриваемой модели есть аппроксимирующие формулы. Однако, эта величина обычно не записывается в

формулу для расчета потерь, поскольку большинстве случаев  $a(h_{MC})=0$ . Можно рассчитать по (3) - (5).

При наличии данных о характере местности используется модифицированная модель, учитывающая изменение местности по однородным участкам. В этом случае, потери распространения

$$L(R, f) = 69 + 26 \lg(f) - 13,8 \lg(h_e^*) + 31(\lg R_{km}) + \sum_k \left[ \delta B_k \lg \left( \frac{d_{k2}}{d_{k1}} \right) \right] + L_{df} \quad (27),$$

где

$h_e^*$  — высота установки антенны БС, м;

$d_{k2}, d_{k1}$  — дальность от БС до начала и конца k-ого участка;

$\delta B_k$  — поправка, на условия распространения для k-ого участка;

$L_{df}$  — дифракционные потери, дБ.

По модели Хата, уровень мощности сигнала на входе приемника МС

$$p_c(R, f) = p_{BS} + g_1 + g_2 - L(R, f), \text{ дБм} \quad (28)$$

Для GSM1800 на начальных стадиях проектирования, когда конкретные высоты антенн еще не определены стандартная модель Хата имеет вид

$$L(R) = 133 + 34 \lg R_{km}, \quad (29)$$

Калибровка моделей предсказания. Калибровка модели заключается в подборе значений поправочных коэффициентов, минимизирующих среднее квадратическое отклонение между предсказанием и накопленными измерениями. В таблице 6 приведены результаты калибровки для Москвы. Поправочные коэффициенты А добавляют в указанные формулы.

Таблица 6.

Модель по формуле	(26)	(27)	(29)
Значения поправочных коэффициентов А, дБ	-9	-7	-11
Разброс поправочных коэффициентов, дБ	10	8	6

## 2.6 Контрольное задание

1. При указанных энергетических параметрах рассчитать мощность сигнала на входе приемника МС на расстоянии 1, 5, 10, 15 и 25 км. Результаты расчета представить в виде графика.

2. Определить радиус зоны обслуживания в километрах, при условии, что допустимая мощность сигнала на входе приемника должна превышать:

- а) - 90 дБм;
- б) - 100 дБм;
- в) - 105 дБм.

Результаты расчета представить в виде графика.

3. Указанные выше в п.1 и 2 расчеты выполнить, используя модель Окамуры для вариантов местности:

- а) квазигладкая
- б) пригородная
- в) открытая
- г) холмистая
- д) с наклоном.

Записать формулу для определения уровня сигнала по этой модели и указать численные значения ее параметров.

4. На основании экспериментальной кривой, приведенной на **рисунке Р1** подобрать параметры модели Ли. Записать формулу для определения сигнала по этой модели и указать численные значения ее параметров. Для модели Ли выполнить расчеты по п.1 и 2 и построить графики.

5. Записать формулу для определения сигнала по модели Хата и указать численные значения ее параметров. Выполнить расчеты по п.1 и 2 на основании модели Хата и построить графики.

6. Письменно сопоставить результаты расчетов по разным моделям и объяснить расхождения.

Исходные данные для расчетов даны в **таблице Р.1**. В графе № L дан номер кривой на рис. Р.1. Индивидуальный номер задания М определяется по двум последним цифрам номера студенческого билета YZ:  $M = YZ - 15k$ ,  $k = 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6$ . Например, если номер студенческого билета заканчивается цифрами 97, то  $M = 97 - 15 \times 6 = 7$ .

Таблица Р. 1

М	$P_{BS}$ , Вт	$g$ , ДБ	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$Y$ мрад	$dh$ м	$f$ , МГц	№ L	$R_0$ , км
1	0,3	14	90	1,2	3	30	1800	1	2
2	2	12	60	1,5	5	40	450	3	8
3	5	12	70	1,4	10	50	450	5	10
4	7	10	60	2,0	15	90	900	7	5
5	20	6	90	1,3	20	10	800	9	15
6	0,2	15	70	1,1	20	40	1800	11	3
7	10	12	60	1,7	14	100	800	2	12
8	5	10	90	1,0	10	60	800	4	10
9	15	12	50	1,8	7	20	900	6	20
10	20	15	60	1,6	3	20	900	8	16
11	4	10	70	1,2	5	110	900	10	7
12	1	12	90	1,0	15	70	900	12	25
13	10	10	80	1,1	10	120	900	1	9
14	15	12	90	1,9	2	30	800	2	13
15	30	6	80	2,0	10	40	900	3	14

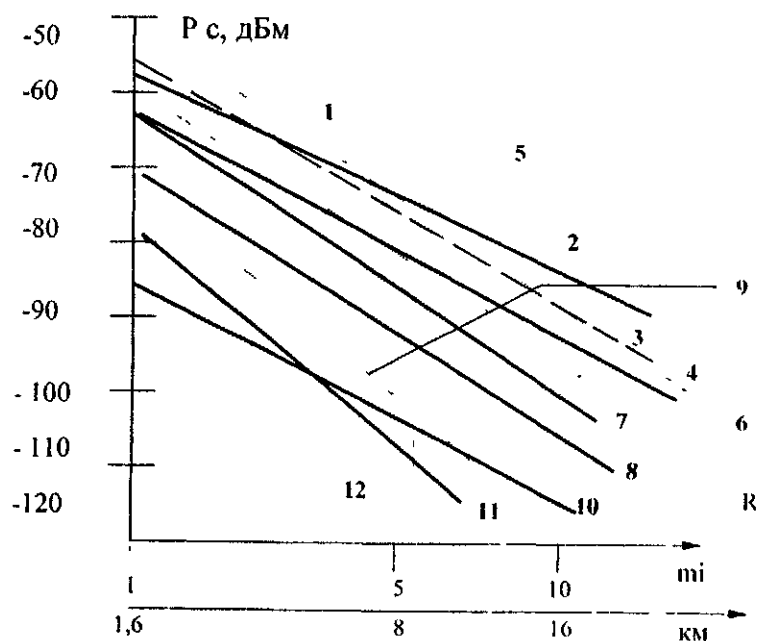


Рис Р 1

### 3 Расчет отношения сигнал/интерференция

#### 3.1 Цель работы:

1. Закрепить теоретические знания по способам и особенностям построения кластера.
2. Изучить методику и получить практические навыки по расчету отношения сигнал/интерференция.
3. Привить навыки по эксплуатации информационных технологий, связанных с применением компьютеров при проведении расчетов.

#### 3.2 Деление обслуживаемой территории на соты

Участок территории радиопокрытия, на котором осуществляется связь в фиксированной полосе частот, схематически изображается в виде правильного шестиугольника и по сходству с пчелиными сотами получил название *соты*. В результате СМР с пространственным разнесением частот получили наименование *сотовых систем мобильной связи (ССМС)*. Группу сот, в пределах которой отсутствует повторное использование частотных полос, называют *кластером*. Сотовая топология позволяет многократно увеличить абонентскую емкость системы по сравнению с системами радиальной структуры и охватить сколь угодно большую зону обслуживания без ухудшения качества связи и расширения выделенного частотного диапазона. Вместе с тем использование сотового принципа построения предполагает и ряд усложнений, касающихся определения текущего местоположения мобильного абонента и обеспечения непрерывности связи при перемещении его из одной соты в другую. Соответствующая процедура получила название *эстафетной передачи* (в английской транскрипции *handoff* или *handover*).

#### ***Повторное использование частот.***

Высокая спектральная эффективность ССМС достигается ценой максимально частого повторного использования одних и тех же частотных полос, и с этой точки зрения наиболее предпочтительным был бы трехсотовый (или трехэлементный) кластер, изображенный на рис. 1, а, где одинаковыми цифрами обозначены соты с совпадающими наборами частотных каналов. Кроме того, каждой из сот кластера данного типа отводится частотная полоса, равная трети полного частотного диапазона, а значит, и треть общего числа каналов связи в системе, что обеспечивает значительную абонентскую емкость соты. Вместе с тем частое повторение зон с одинаковыми полосами частот характеризуется заметным уровнем соканальных помех, т.е. помех от станций

системы, работающих в той же полосе частот, но расположенных в несмежных сотах. Для уменьшения влияния соканальных помех более выгодны кластеры с большим числом элементов, например 7-элементные, изображенные на рисунке 1, б.

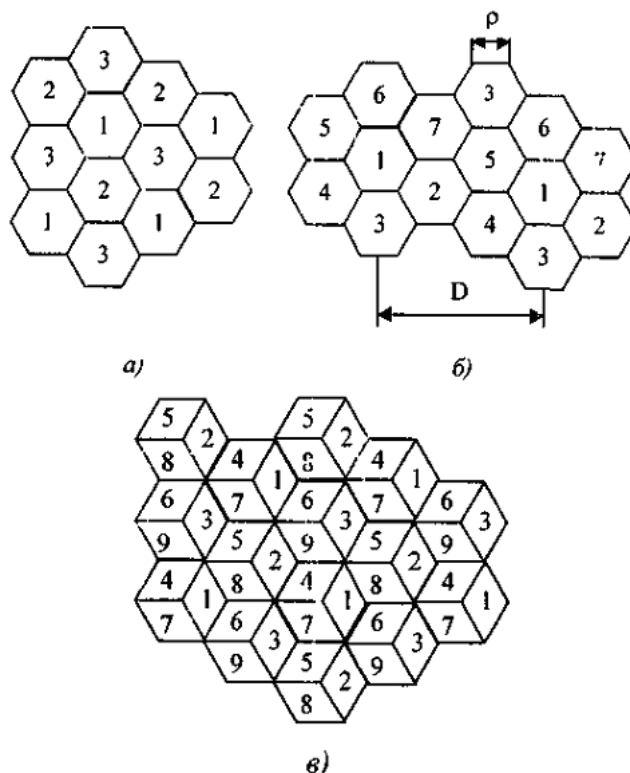


Рисунок 1

Можно показать, что расстояние  $D$  между центрами ячеек, в которых используются одинаковые полосы частот, и число  $n_c$  элементов в кластере связаны соотношением:

$$D = \sqrt{3n_c} \rho,$$

где  $\rho$  - радиус ячейки, т.е. радиус окружности, описанной вокруг правильного шестиугольника. Параметр  $\xi$ , определяемый соотношением:

$$\xi = \frac{D}{\rho} = \sqrt{3n_c},$$

называют *коэффициентом уменьшения соканальных помех* или *коэффициентом соканального повторения*. Для величины  $\eta = 1/n_c$  употребляют наименование *коэффициент эффективности повторного использования частот* или *коэффициент повторного использования частот*. Увеличение числа элементов в кластере, благоприятно сказывающееся на уровне соканальных помех, приводит к пропорциональному уменьшению полосы частот, которая может быть использована в каждой соте, а значит, к снижению абонентской емкости соты.

Рассмотренные структуры кластеров предполагают использование на базовых станциях антенн с круговой диаграммой направленности, осуществляющих передачу сигнала по всем направлениям с одинаковой мощностью. Эффективным способом снижения соканальных помех является применение направленных (в горизонтальной плоскости) антенн с шириной диаграммы направленности 120 или 60°, в результате чего шестиугольная ячейка разбивается на 3 или 6 секторов, т.е. производится *секторизация сот*. В секторе сигнал излучается антенной только в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Таким образом, секторизация сот позволяет чаще использовать одинаковые полосы частот в кластерах без изменения их структуры либо в рамках прежней схемы повторения частот заметно снизить уровень соканальных помех. Если кластер состоит из  $n_c$  сот, каждая из которых содержит  $m_c$  секторов, то говорят, что размерность кластера  $(n_c, n_c \times m_c)$ . Типичными размерностями кластеров, широко применяемых на практике, являются (3,9), (4,12), (7,21). На рисунке 1, в приведен возможный вариант распределения наборов частотных каналов в секторизованном кластере размерности (3,9). Отметим, что разработка топологии ССМС является своеобразной и достаточно сложной задачей.

### 3.3 Расчет отношения сигнал – интерференция

В теоретической части были рассмотрены принципы построения кластера для однородных моделей. В этих моделях антенны БС - ненаправленные, расстояние между БС с одинаковой частотой

$$D = \sqrt{3N} \cdot R_0, \quad (1)$$

где  $R_0$ - радиус соты,  $N$ - размерность кластера.

$$q = \sqrt{3N} = \frac{D}{R_0}, \quad (2)$$

где  $q$  – коэффициент уменьшения соканальных помех.

На рисунке 2 приведен кластер при  $N=7$  и пунктиром показаны пути шести мешающих сигналов при всенаправленных антеннах БС. Мешающие станции обозначены М1-М6. Расстояние от точки А до МС с номером J обозначим  $R_J$ ,

Для вычисления  $R_J$ , используем упрощенный рисунок 3, аналогичный рисунку 2. На рисунке 3 обозначено местоположение БС - точка О, МС - точка А и местоположение мешающих станций М1...М6.

Длины отрезков М1-О, М2-О, ...М6-О равны  $D$ . Радиус внутренней окружности ОА - радиус соты  $R_0$ . Очевидно, длина М1-А равна расстоянию до М1, длина М2-А равна расстоянию до М2 и т.д.



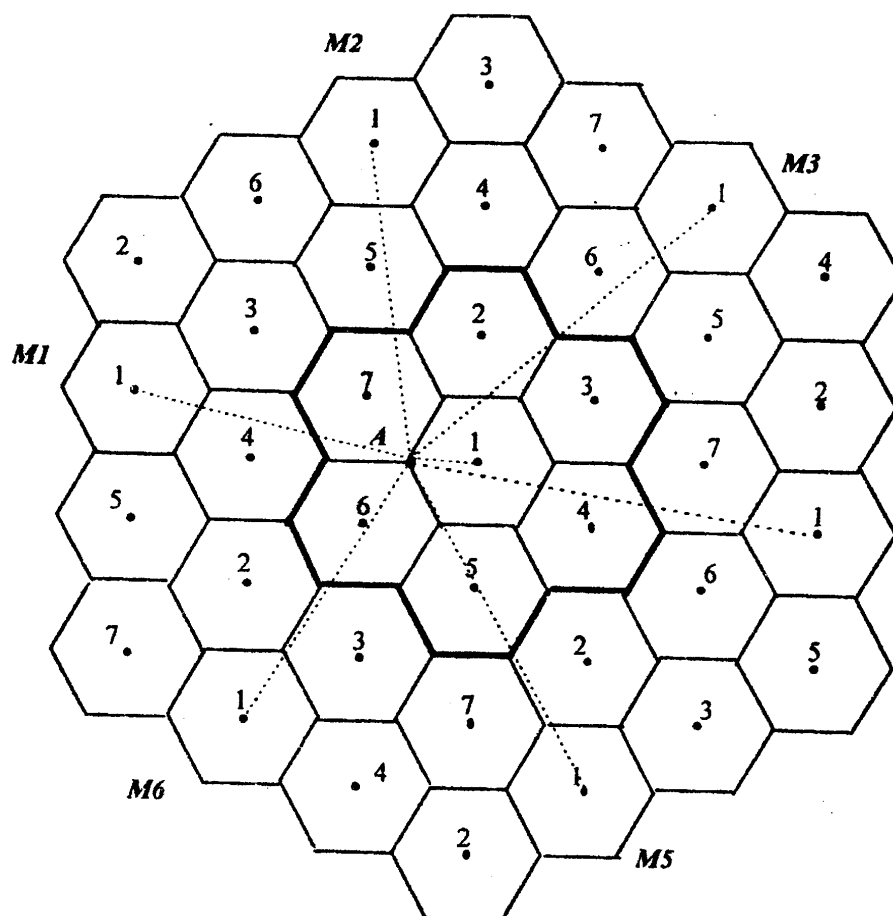


Рисунок 2

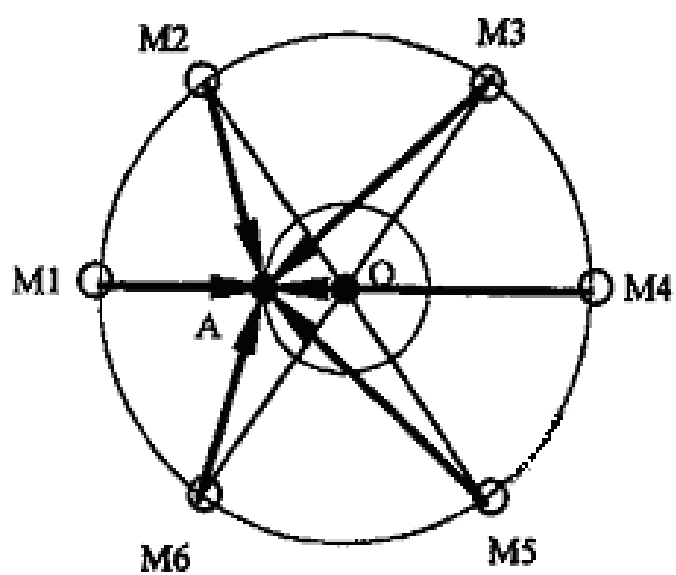


Рисунок 3

По рисунку 2 определяем

$$R_1 = D - R_0; \quad R_2 = \sqrt{D^2 + R_0^2 - DR_0}; \quad R_3 = \sqrt{D^2 + R_0^2 + DR_0}$$

Подставив сюда (1) и (2), запишем:

$$R_1 = (q - 1)R_0; \quad (3, а)$$

$$R_2 = \left( \sqrt{q^2 - q + 1} \right) R_0; \quad (3, б)$$

$$R_3 = \left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right) R_0; \quad (3, в)$$

$$R_4 = (q + 1)R_0; \quad (3, г)$$

$$R_5 = R_3; \quad (3, д)$$

$$R_6 = R_2. \quad (3, е)$$

Мощности сигналов, приходящих на МС представим в виде

$$P_c = K_o R^{-n},$$

приняв  $R = R_0$  для своего сигнала и  $R = R_J$  для  $J$ -ого мешающего сигнала

Если энергетические параметры БС в сети одинаковы, то отношение медианной мощности  $J$ -ого мешающего к медианной мощности своего сигнала

$$\beta_J = (R_J / R_0)^{-n}, \quad (4)$$

при значениях  $n$ , указанных выше (например,  $n = 2$ ; 3 или 4).

При нескольких мешающих сигналах на МС воздействует суммарная помеха, медианная мощность которой равна сумме медианных мощностей отдельных сигналов. Медианное отношение сигнал- интерференция

$$SIR = -10 \lg \left( \sum_{J=1}^m \beta_J \right) = 10 \lg \left( \frac{R_0^{-n}}{\sum_{J=1}^m R_J^{-n}} \right), \text{ дБ} \quad (5)$$

где  $m$  - число мешающих сигналов.

По (5) можно найти усредненное медианное отношение сигнал-интерференция. Замирания сигналов не учтены.

### 3.4 Контрольное задание

1. Нарисовать кластер заданной размерности  $N$  и показать мешающие станции в соседних кластерах.

2. Рассчитать расстояние между БС с одинаковыми частотами при заданных  $N$  и радиусе соты  $R_0$

3. Для этой же модели кластера рассчитать медианное значение  $SIR$ , для

нескольких кластеров при  $N = 3, 7, 13, 19, 21$ .

4. Принять усиление антенны МС  $g_2 = 0$  дБ

5. Принять  $N=3$  в заданиях с нечетными номерами и  $N=7$  - с четными.

***В отчете записать:***

- расчетные формулы для определения параметров;
- численные значения входящих величин и их размерность;
- результаты расчета;
- требуемые чертежи и рисунки;
- комментарии.

Исходные данные для расчетов даны в **таблице Р.1** (последний столбец). Индивидуальный номер задания  $M$  определяется по двум последним цифрам номера студенческого билета  $YZ$ :  $M = YZ - 15k$ ,  $k = 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6$ . Например, если номер студенческого билета заканчивается цифрами 97, то  $M = 97 - 15 \times 6 = 7$ .

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маковеева М.М. Системы радиосвязи с подвижными объектами. М.: Московский технический университет связи и информатики. Методические указания по выполнению контрольной работы. 2010. 60 с.
2. Маковеева М.М., Сухорукова И.Ю. Системы радиосвязи с подвижными объектами. Методические указания по выполнению контрольной работы - М.: МТУСИ, 2006 - 60 с.
3. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. М.: Эко-Трендс, 2010. 284 с.
4. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. - 400 с.
5. Основы инфокоммуникационных технологий. / под ред. В.П.Шувалова. - М.: Горячая линия- Телеком, 2009. - 712 с.
6. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. - М.: Эко-Трендз, 2007. - 296 с.
7. Кааранен Х. и др. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы. М.: Техносфера, 2005 - 464 с.
8. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи / под ред. А.И.Ледовского. - М.: Горячая ли-ния -Телеком, 2006. - 536 с. ISBN 5-93517-248-8.
9. Кааранен Х., Ахтиайнен А., Лаитинен Л., Найян С., Ниemi В. Сети UMTS. Архитектура, мобильность сервисы. М.: Технофера, 2007. 464 с. ISBN 978-5-94836-116-1.
10. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 432 с. ISBN 5-93517-252-6.
11. Системы мобильной связи: Учебное пособие для вузов / В. П. Ипатов, В. К. Орлов, И. М. Самойлов, В. Н. Смирнов; под. ред. В.П.Ипатова. - М.: Горячая линия - Телеком, 2008. - 272 с.