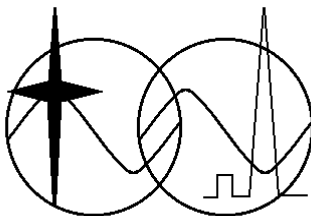


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)



**ЧАСТОТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ
СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие
для практических занятий и курсового проектирования
для студентов радиотехнических специальностей

Разработчик:
заведующий кафедрой СРС,
профессор Мелихов С.В.

2014

Цель занятий: изучение особенностей частотного планирования и электромагнитной обстановки в однородной сотовой структуре систем мобильной связи.

1 Краткие теоретические сведения

1.1 Частотные планы стандарта NMT

Все сотовые системы мобильной связи (СМС) работают в дуплексном режиме с частотным разносом несущих приема и передачи базовых станций (БС) и мобильных станций (МС) [1-5].



Рис. 1. Первый (основной) частотный план стандарта NMT-450

Первый (основной) частотный план стандарта NMT-450.

Аналоговый стандарт NMT-450 (Nordic Mobile Telephony) в диапазоне (453-467,5) МГц имеет три частотных плана. Особенности первого частотного плана системы следующие (рис. 1).

Нижний участок частотного диапазона (453-457,5) МГц используется для каналов передачи МС (весь участок называют восходящим каналом – Uplink – UL), а верхний (463-467,5) МГц – для каналов передачи БС (нисходящий канал – Downlink – DL). Разнос несущих приема и передачи каждого дуплексного канала равен 10 МГц. В нижнем и верхнем диапазонах определены фиксированные несущие частоты (f_{ni}), различающиеся на шаг сетки, который равен 0,025 МГц, т.е. для каждого речевого канала отводится полоса $\Delta f_k = 25$ кГц. Всего в каждом диапазоне возможно использование 180 несущих частот (число дуплексных каналов $N_{ок} = 180$) с номерами $i = 1, 2, \dots, 180$, причем для нижнего и верхнего диапазонов соответственно:

$$\begin{aligned} f_{ni} &= [453,0125 + (i - 1) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \\ f_{ni} &= [463,0125 + (i - 1) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$1 \leq i \leq 180.$$

Второй частотный план стандарта NMT-450. Для увеличения пропускной способности в системе NMT-450 используется дополнительный частотный план, который позволяет организовать еще 179 дуплексных частотных каналов с номерами $i=181,182,\dots,359$. Несущие частоты второго частотного плана сдвинуты относительно несущих основного частотного плана в сторону увеличения на частоту, равную половине ширины полосы канала (на $\Pi_{\kappa} / 2 = 0,0125 \text{ МГц}$):

$$\begin{aligned} f_{ni} &= [453,025 + (i-181) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \\ f_{ni} &= [463,025 + (i-181) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$181 \leq i \leq 359.$$

Третий частотный план стандарта NMT-450. Предусмотрена еще одна возможность увеличения пропускной способности системы NMT-450 путем использования третьего частотного плана, в котором полоса частот, отводимая на один канал, $\Pi_{\kappa} = 0,02 \text{ МГц}$. При этом общее число дуплексных частотных каналов в полосе (453-467,5) МГц равно 225 (i – номер канала):

$$\begin{aligned} f_{ni} &= [453,01 + (i-1) \cdot 0,02] \text{ МГц}; \\ f_{ni} &= [463,01 + (i-1) \cdot 0,02] \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$1 \leq i \leq 225.$$

Частотный план стандарта NMT-900. В диапазоне 900 МГц для ССМС отведена полоса частот (890-960) МГц. Для аналоговой системы NMT-900 в этой полосе возможно использование 1000 каналов ($N_{\text{ок}} = 1000$) с дуплексным разносом 45 МГц и величиной $\Pi_{\kappa} = 0,025 \text{ МГц}$, причем для i – того канала частоты несущих нижнего и верхнего диапазонов соответственно равны:

$$\begin{aligned} f_{ni} &= [890,0125 + (i-1) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \\ f_{ni} &= [935,0125 + (i-1) \cdot 0,025] \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$1 \leq i \leq 1000.$$

С целью уменьшения взаимных помех разнос частот соседних каналов ($\Delta f_{\text{ск}}$) в одной соте для систем NMT должен быть не менее, чем $\Delta f_{\text{ск}} = 7 \cdot \Pi_{\kappa}$. Например, для системы NMT-450

$$\Delta f_{\text{ск}} = 7 \cdot \Pi_{\kappa} = 7 \cdot 0,025 \text{ МГц} = 0,175 \text{ МГц}.$$

1.2 Частотные планы стандарта GSM

Частотный план стандарта GSM-900. В диапазоне (890-960) МГц для цифровой системы GSM-900 (Global System for Mobile) возможно использование 124 каналов ($N_{ок} = 124$) с дуплексным разнесом частот 45 МГц. Величина полосы каждого канала 0,2 МГц ($\Pi_k = 0,2$ МГц), шаг сетки несущих 0,2 МГц. Частоты несущих для нижнего и верхнего диапазонов для i – того канала соответственно равны (рис. 2):

$$\begin{aligned} f_{ни} &= (890 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ f_{ви} &= (935 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$1 \leq i \leq 124.$$

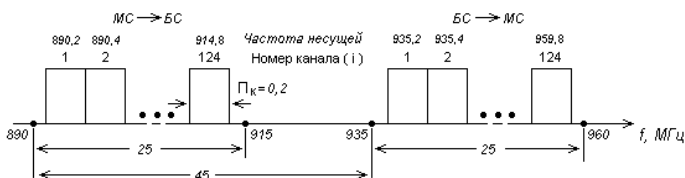


Рис. 2. Частотный план стандарта GSM-900

Частотный план стандарта GSM-1800. В диапазоне (1710-1880) МГц для цифровой системы GSM-1800 возможно использование 374 каналов ($N_{ок} = 374$) с дуплексным разнесом 95 МГц, величиной полосы каждого канала $\Pi_k = 0,2$ МГц и шагом сетки несущих 0,2 МГц. Для нижнего и верхнего диапазонов соответственно:

$$\begin{aligned} f_{ни} &= (1710 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ f_{ви} &= (1805 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$1 \leq i \leq 374.$$

В литературе встречается другая нумерация каналов стандарта GSM-1800: первому каналу ($i = 1$) присваивается номер 512, второму каналу ($i = 2$) – номер 513, ..., трехсот семьдесят четвертому ($i = 374$) – номер 885.

Частотный план стандарта GSM-1900. Для цифровой системы GSM-1900, используемой в США и Канаде, в диапазоне (1850-1990) МГц возможно использование 299 каналов ($N_{ок} = 299$) с величиной полосы каждого канала $\Pi_k = 0,2$ МГц, шагом сетки

несущих $0,2 \text{ МГц}$ и дуплексным разносом частот 80 МГц . Сетка несущих для нижнего и верхнего диапазонов соответственно:

$$\begin{aligned} f_{ni} &= (1850 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ f_{vi} &= (1930 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$1 \leq i \leq 299.$$

Так же, как для стандарта GSM-1800, в литературе встречается другая нумерация каналов стандарта GSM-1900: первому каналу ($i = 1$) присваивается номер 512, второму каналу ($i = 2$) – номер 513 и т.д., двухсот девяносто девятому ($i = 299$) – номер 810.

С целью уменьшения взаимных помех разном частот соседних каналов (Δf_{ck}) в одной соте для систем GSM должен быть не менее, чем

$$\Delta f_{ck} = 3 \cdot \Pi_{\kappa} = 3 \cdot 0,2 \text{ МГц} = 0,6 \text{ МГц}.$$

1.3 Однородная сотовая структура систем мобильной связи. Понятие кластера. Интерференционные помехи на совпадающих частотах

Любая система сотовой связи имеет ячеистую структуру. Базовые станции располагаются по «треугольной сетке», т.е. находятся в вершинах совмещенных равнобедренных треугольников (рис. 3). Совокупность ячеек напоминает пчелиные соты, что и послужило поводом назвать такие системы сотовыми. Такая структура была предложена впервые в середине 40-х годов прошлого столетия исследовательским центром Bell Laboratories американской компании AT&T Mobility (The American Telephone and Telegraph Mobility). Каждая из БС обслуживает определенную территорию, которая на идеальной равнинной местности представляется кругом (ячейкой) с радиусом r . Ячейки схематически изображаются в виде правильных шестиугольников.

В *однородной (или регулярной) модели*, для которой мощность всех БС одинакова, а местность идеально равнинная, все ячейки имеют одинаковые размеры. В действительности же ячейки никогда не бывают строгой геометрической формы. Их границы зависят от условий распространения и затухания радиоволн, т.е. от рельефа местности, от вида и плотности застроек, растительности и пр.

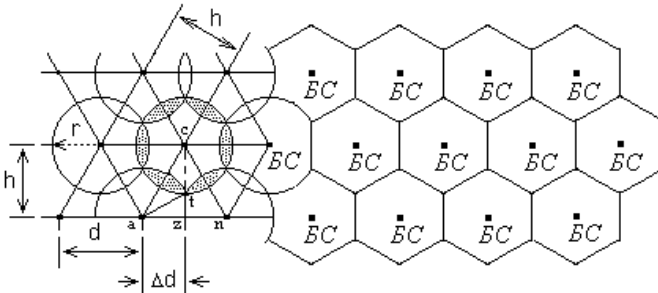


Рис. 3. Зоны обслуживания (ячейки, соты, сайты) базовых станций сотовой системы радиосвязи

Местность, обслуживаемую одной БС, называют *зоной обслуживания* или *сайтом*. Поэтому сотовые системы являются *многозоновыми* или *многосайтовыми*.

Границы трех соседних зон пересекаются в одной точке t (см. рис. 3). В треугольнике atz нижний острый угол равен 30° градусам, а сторона $at = r$. Тогда расстояние между двумя соседними БС (между узлами сот)

$$d = 2\Delta d = 2az = 2r \cos 30^\circ = 2r \sqrt{3}/2 = r\sqrt{3}, \quad (8)$$

смещение узлов сот, расположенных на соседних параллельных прямых,

$$\Delta d = r \sqrt{3}/2, \quad (9)$$

а расстояние между двумя параллельными прямыми, на которых находятся БС,

$$h = cz = ct + tz = r + r \sin 30^\circ = 1,5r. \quad (10)$$

В различных системах на каждой БС может формироваться несколько дуплексных частотных каналов связи (например, в системе NMT-450 – до 16 каналов, в системе GSM – до 20 каналов), которые называют *частотной группой*. Сотовая структура позволяет многократное использование тех же самых частотных групп в разных ячейках, причем для ослабления *интерференционных помех* (или *взаимных соканальных помех* – помех на совпадающих частотах) эти ячейки должны отстоять друг от друга на определенном расстоянии, чтобы радиоволны с одинаковыми частотами из «чужой» ячейки были бы существенно ослабленными в данной ячейке. Соканальные помехи могут вызвать в приемнике образование интерференционных частот. При аналоговой связи это приводит к образованию

интерференционных свистов, а при цифровой – к появлению цифровых ошибок.

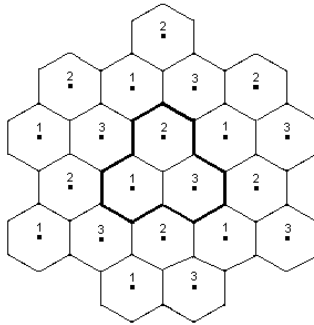


Рис. 4. Сотовая структура с кластерами размерностью три ($N_{кл} = 3$)

Совокупность ячеек, в которых частотные группы не совпадают, называют *кластером*. Кластер может иметь разную размерность (3, 4, 7, 12, 19 и т.д.). На рис. 4 показана сотовая структура с кластером размерностью три ($N_{кл} = 3$, разные группы частот в ячейках обозначены цифрами от 1 до 3), а на рис. 5 – размерностью семь ($N_{кл} = 7$, разные группы частот обозначены цифрами от 1 до 7).

Можно показать, что величина $N_{кл}$ может принимать только дискретные значения (3, 4 и пр.), определяемые выражением:

$$N_{кл} = (k+l)^2 - kl = k^2 + kl + l^2, \quad (11)$$

где k, l – целые числа (например: при $k=1, l=1$ $N_{кл} = 3$; при $k=2, l=0$ $N_{кл} = 4$ и т.д.).

Параметр

$$C = \frac{1}{N_{кл}} \quad (12)$$

называют *коэффициентом эффективности повторного использования частот* или *коэффициентом повторного использования частот*.

Возможность многократного использования частотных групп в разных ячейках – большое достоинство сотовых систем связи, поскольку это позволяет охватить сколь угодно большую зону обслуживания (а значит и очень большое число абонентов) без ухудшения качества связи с использованием ограниченного частотного диапазона.

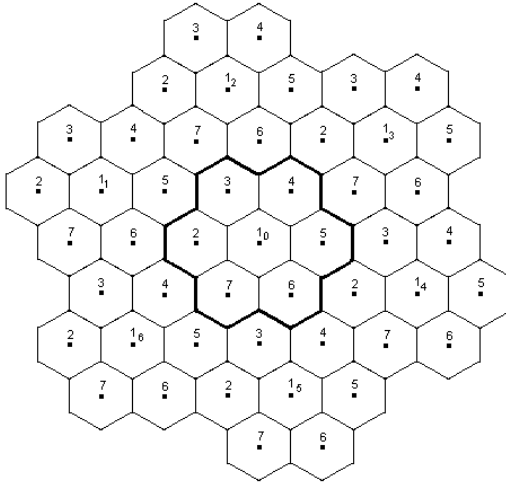


Рис. 5. Сотовая структура с кластерами размерностью семь ($N_{кл} = 7$)

Для проведения расчетов по оценке мешающего действия интерференционных помех в сотовой модели используется косоугольная система координат (x, y) , угол между осями которой равен 60 градусам (рис.6). В этой системе расстояние от начала координат до любой точки плоскости:

$$\widehat{d} = \sqrt{d_{ox}^2 + d_{ox}d_{oy} + d_{oy}^2}, \quad (13)$$

где d_{ox}, d_{oy} – расстояния от начала координат до проекций соответственно на ось x и ось y от любого узла (от любой БС), которые для удобства характеризуют целыми числами $(0, \pm 1, \pm 2, \dots)$.

Для БС «1₀» (см. рис. 6) $d_{ox} = 0, d_{oy} = 0$; для БС «1₃» $d_{ox} = 1, d_{oy} = 2$; для БС «1₄» $d_{ox} = 3, d_{oy} = -1$; для БС «1₅» $d_{ox} = 2, d_{oy} = -3$.

Интерференционные помехи наиболее опасны от ближайших БС, частотные группы которых одинаковы. На рис. 6 узлы, соответствующие таким БС, соединены жирными прямыми. Эти прямые образуют ромб совмещенного канала (РСК), внутри которого нет БС с одинаковыми частотами. Модель однородной сети состоит из примыкающих друг к другу РСК с одинаковым распределением частот внутри ромбов.

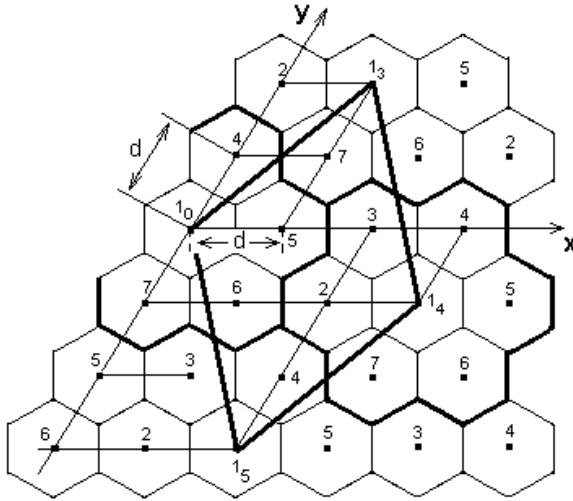


Рис. 6. Косоугольная система координат (x, y) сотовой структуры

Используя построения, показанные на рис. 6 (где $N_{\text{кл}} = 7$), нетрудно убедиться, что расстояния между ближайшими БС с одинаковыми частотами, которые определяются четырьмя сторонами ромба и его малой диагональю, одинаковы и равны корню квадратному из размерности кластера (численные значения для (13) взяты для БС « 1_3 »: $d_{ox} = 1$ и $d_{oy} = 2$):

$$\hat{d}_{\text{кл}} = \sqrt{1^2 + 1 \cdot 2 + 2^2} = \sqrt{7} = \sqrt{N_{\text{кл}}}. \quad (14)$$

Выражение $\hat{d}_{\text{кл}} = \sqrt{N_{\text{кл}}}$ справедливо для любой размерности кластера однородной модели сотовой структуры.

Поскольку в реальном масштабе $d_{ox} = i \cdot d_o$ ($i = \pm 1, \pm 2, \pm 3$), а $d_{oy} = j \cdot d_o$ ($j = \pm 1, \pm 2, \pm 3$), то с учетом (8):

$$d_{\text{кл}} = d \hat{d}_{\text{кл}} = d \sqrt{N_{\text{кл}}} = r \sqrt{3N_{\text{кл}}} = r q. \quad (15)$$

Параметр

$$q = \frac{d_{\text{кл}}}{r} = \sqrt{3N_{\text{кл}}} \quad (16)$$

называют или коэффициентом уменьшения соканальных помех, или коэффициентом соканального повторения, или коэффициентом электромагнитной совместимости (ЭМС) сети по интерференционным помехам.

Из (15) следует, что число сот на кластер

$$N_{кл} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{d_{кл}}{r} \right)^2. \quad (17)$$

Используя модель однородной сети, можно рассчитать расстояния до мешающих БС. Эти расстояния необходимы для определения медианного отношения сигнал/интерференция (SIR- Signal Interference Ratio).

Для нахождения расстояний до мешающих станций рассмотрим построения, изображенные на рис. 7. Местоположение МС – на границе соты (точка «а»), где величина SIR минимальна. Полезная БС на рисунке не имеет номера, мешающие станции пронумерованы цифрами от 1 до 6. Расстояние между МС и мешающими БС обозначим R_i , где i – номер мешающей БС.

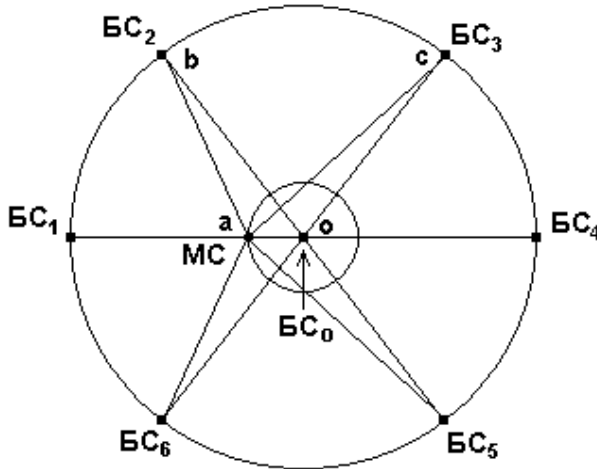


Рис. 7. Местоположения полезной (БС₀) и мешающих БС (БС₁, БС₂, БС₃, БС₄, БС₅, БС₆)

Очевидно:

$$R_1 = d_{кл} - r; \quad (18)$$

$$R_4 = d_{кл} + r. \quad (19)$$

Из треугольников «аво» и «асо»:

$$R_2 = R_6 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл}r \cos 60^\circ} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - d_{кл}r}; \quad (20)$$

$$R_3 = R_5 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 120^\circ} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 + d_{кл} r}. \quad (21)$$

С учетом (15):

$$R_1 = (q-1)r; \quad (22)$$

$$R_4 = (q+1)r; \quad (23)$$

$$R_2 = R_6 = \left(\sqrt{q^2 - q + 1}\right)r; \quad (24)$$

$$R_3 = R_5 = \left(\sqrt{q^2 + q + 1}\right)r. \quad (25)$$

По определению отношение сигнал/интерференция

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{P_{мо}}{\sum_i P_{mi}}, \quad (26)$$

где $P_{мо}$ – медианная мощность полезного сигнала;

P_{mi} – медианная мощность суммарного мешающего сигнала (от i – го числа мешающих БС).

При одинаковых мощностях передатчиков БС в сети:

$$P_{мо} \sim \frac{1}{r^n}; \quad P_{mi} \sim \sum_i \left(\frac{1}{(R_i)^n} \right), \quad (27)$$

где n – показатель затухания радиоволн для данной местности.

Тогда

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{1}{r^n \sum_i \left(\frac{1}{(R_i)^n} \right)}. \quad (28)$$

Из (28) следует, что SIR зависит от размерности кластера ($N_{кл}$) и от показателя затухания радиоволн для данной местности (n).

Для аналоговой системы сотовой связи Скандинавских стран NMT минимально допустимое значение $SIR = 15 \text{ дБ}$, для Северо-Американской цифровой системы D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone Service США) $SIR = 16 \text{ дБ}$, для Европейской цифровой системы GSM $SIR = 9 \text{ дБ}$.

2 Задачи

2.1 Определить возможное число дуплексных каналов связи на одной базовой станции стандарта NMT-450, работающей по первому (основному) частотному плану.

Ответ: 26 каналов.

2.2 Определить возможное число дуплексных каналов связи на одной базовой станции стандарта GSM-900.

Ответ: 42 канала.

2.3 Найти возможные размерности кластера в интервале $3 \leq N_{кл} \leq 19$, которые используются в сотовых системах мобильной связи.

Ответы: 3; 4; 7; 9; 12; 13; 16; 19.

2.4 Построить однородную модель сотовой сети связи с соприкасающимися кластерами, если размерность кластеров $N_{кл} = 4; 9; 12; 13; 16; 19$.

2.5 Докажите, что выражение $\hat{d}_{кл} = \sqrt{N_{кл}}$ справедливо для любой размерности кластера однородной модели сотовой сети связи.

2.6 Для однородных сетей мобильной связи определите, во сколько раз коэффициент электромагнитной совместимости больше при $N_{кл} = 4; 7; 9; 12; 13; 16; 19$, чем при $N_{кл} = 3$.

Ответы: 1,15; 1,53; 1,73; 2,0; 2,08; 2,31; 2,52.

2.7 Определите отношение сигнал/интерференция в однородной сети мобильной связи для квазигладкого города, если коэффициент затухания радиоволн $n = 4$, а размерность кластера $N_{кл} = 3$.

Ответ: 9,24 дБ.

2.8 Определите отношение сигнал/интерференция в однородной сети мобильной связи для квазигладкого города, если коэффициент затухания радиоволн $n = 4$, а размерность кластера $N_{кл} = 7$.

Ответ: 17,8 дБ.

2.9 Определите отношение сигнал/интерференция в однородной сети мобильной связи для квазигладкой сельской местности, если коэффициент затухания радиоволн $n = 3$, а размерность кластера $N_{кл} = 3$.

Ответ: 5,35 дБ.

2.10 Определите отношение сигнал/интерференция в однородной сети мобильной связи для квазигладкой сельской местности, если коэффициент затухания радиоволн $n = 3$, а размерность кластера $N_{кл} = 7$.

Ответ: 11,57 дБ.

3 Рекомендуемая литература

1. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
2. 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, 2003. – 272 с.
3. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов. / В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; под ред. В.И. Иванова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 232 с.
4. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
5. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Международный центр научной и технической информации, 1996. – 239 с.