

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиотехнических систем (РТС)



С.В. Мелихов

**МОБИЛЬНАЯ РАДИОСВЯЗЬ:  
ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ  
И ВНУТРИСИСТЕМНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ**

Учебное наглядное пособие  
для лекционных и практических занятий,  
курсового проектирования,  
самостоятельной работы  
студентов радиотехнических направлений

Томск  
2023

УДК 621.396

ББК 32.811.2

М 47

**Рецензент:**

**Якушевич Г.Н.**, доцент кафедры радиотехнических систем,  
кандидат технических наук

**Мелихов С.В.**

М 47 Мобильная радиосвязь: частотно-территориальное планирование и внутрисистемная электромагнитная совместимость: Учебное наглядное пособие для лекционных и практических занятий, курсового проектирования, самостоятельной работы студентов радиотехнических специальностей / С.В. Мелихов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 21 с.

Рассмотрены частотные диапазоны цифровых систем мобильной связи (СМС) поколений 2G, 3G, 4G, 5G, особенности однородной сотовой структуры, внутрисистемная электромагнитная совместимость (ЭМС) первого типа и второго типа, приведены математические выражения для расчета медианного отношения сигнал-интерференция (SIR – Signal Interference Ratio) при использовании на базовых станциях (БС) СМС антенн с круговой диаграммой направленности и антенн с секторными диаграммами направленности.

Одобрено на заседании кафедры РТС, протокол №9 от 20.04.2023

УДК 621.396

ББК 32.811.2

© Мелихов С.В., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1 ДИАПАЗОНЫ РАДИОЧАСТОТ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ</b> .....	5
1.1 Общие сведения о диапазонах радиочастот систем мобильной связи .....	5
1.2 Частотные планы стандарта GSM-2G. Внутрисистемная электромагнитная совместимость (ЭМС) первого вида .....	7
<b>2 ОСОБЕННОСТИ ОДНОРОДНОЙ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ</b> .....	8
2.1 Однородная сотовая структура систем мобильной связи .....	8
2.2 Частотная группа и кластер сотовой структуры .....	9
2.3 Мешающее действие интерференционных помех. Внутрисистемная ЭМС второго вида .....	11
2.4 Отношение сигнал-интерференция (SIR) .....	12
2.5 Секторизация сот для увеличения SIR .....	14
<b>3 ЗАДАЧИ</b> .....	18
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	19
<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	20
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	21

## **ВВЕДЕНИЕ**

Частотно-территориальное планирование является важным этапом проектирования сети сотовой мобильной радиосвязи, включающим в себя определение необходимых диапазонов частот для передатчиков базовых станций (БС) и мобильных станций (МС), определение мест размещения БС, обеспечение внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС).

Цель данного учебного пособия – рассмотрение особенностей частотно-территориального планирования, методики оценки внутрисистемной ЭМС, возможности улучшения внутрисистемной ЭМС для сети мобильной радиосвязи с однородной сотовой структурой.

# 1 ДИАПАЗОНЫ РАДИОЧАСТОТ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

## 1.1 Общие сведения о диапазонах радиочастот систем мобильной связи

На рисунке 1, начиная с 300 МГц, изображены диапазоны радиочастот и их обозначения («UHF», «L», «S» и др.) по версии IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Институт инженеров по электротехнике и электронике).

В настоящее время в диапазонах «UHF», «L», «S» функционируют цифровые сотовые системы мобильной связи (СМС) поколений 2G, 3G, 4G, 5G. Для поколения 5G дополнительно выделены более высокочастотные «частотные отрезки» в диапазонах «S» (3,3...4,2 ГГц), «C» (4,4...5,0 ГГц), «K» и «Ka» (24,25...27,5 ГГц, 26,5...29,5 ГГц, 37,0...40,0 ГГц).

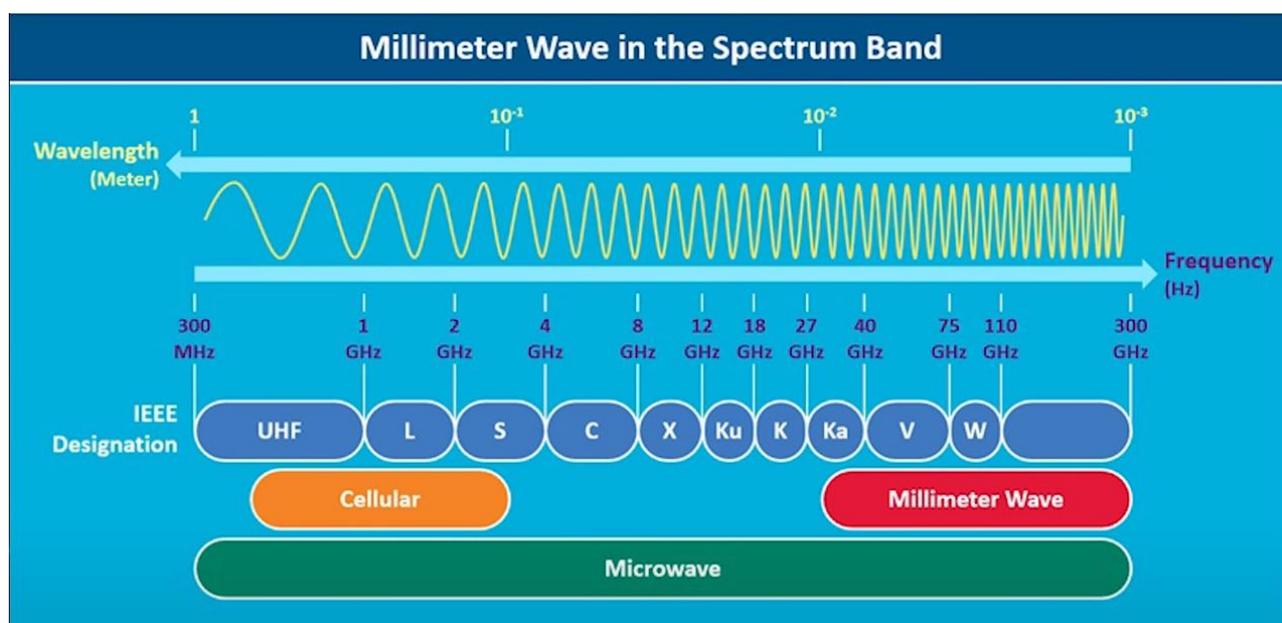


Рисунок 1 – Диапазоны радиочастот, в том числе для сотовой связи (Cellular)

На рисунке 2 изображены диапазоны радиочастот цифровых СМС поколений 2G, 3G, 4G в России, а также цифровой транковой (транкинговой) радиосвязи TETRA и цифровых беспроводных телефонов DECT.

Обозначения на рисунке 2:

DL – DownLink – нисходящий (прямой) канал связи от БС к МС;

UL – UpLink – восходящий (обратный) канал связи от МС к БС;

FDD – Frequency Division Duplex – частотное разделение каналов (нисходящего и восходящего при дуплексной связи);

TDD – Time Division Duplex – временное разделение каналов (нисходящего и восходящего при дуплексной связи);

TETRA – TErrestrial Trunked RADio – Наземное транковое радио;

DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunication – Цифровая усовершенствованная

беспроводная связь;

DVB-T2 – Digital Video Broadcasting Second Generation Terrestrial – Стандарт эфирного цифрового телевидения 2-го поколения (2G – 2 Generation);

GSM-900 – Global System for Mobile Communications – Глобальный стандарт мобильной связи – СМС поколения 2G диапазона 900 МГц;

DCS (GSM)-1800 – Digital Cellular System – Цифровая система сотовой связи поколения 2G (или GSM) диапазона 1800 МГц;

EGSM – Extended GSM – Расширенный стандарт GSM-900, использующий более широкий диапазон частот;

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System – Универсальная мобильная телекоммуникационная система – СМС поколения 3G с использованием технологии WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access – Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов;

LTE – Long-Term Evolution – Долговременное развитие – СМС поколения 4G;

Wi-Fi – Wireless Fidelity – Беспроводная точность – технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11.

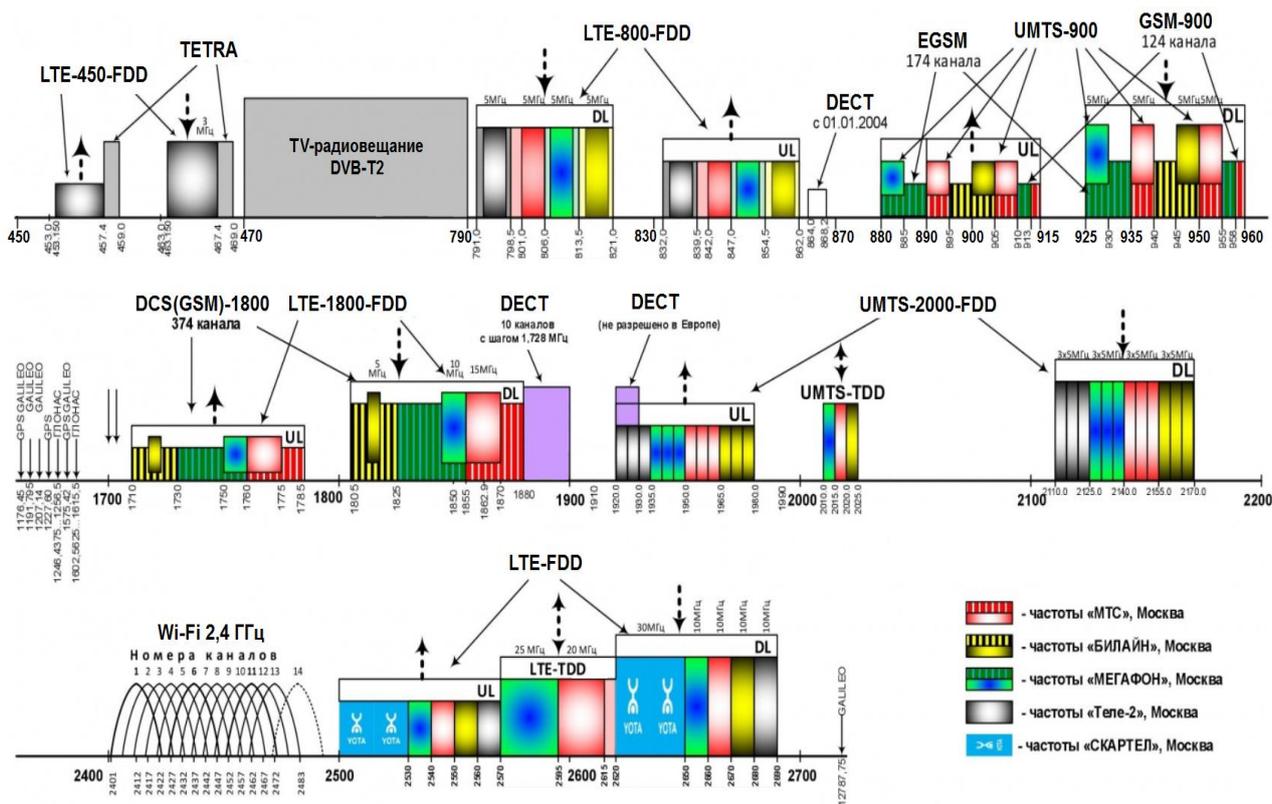


Рисунок 2 – Диапазоны радиочастот цифровых СМС поколений 2G, 3G, 4G, транковой радиосвязи TETRA, беспроводных телефонов DECT и систем Wi-Fi в России

## 1.2 Частотные планы стандарта GSM-2G.

### Внутрисистемная электромагнитная совместимость (ЭМС) первого вида

Большинство сотовых СМС работают в режиме FDD (см. рисунок 2), то есть с частотным разносом несущих приема и передачи базовой станции (БС) и мобильной станции (МС). Рассмотрим частотные планы (диапазоны частот) стандарта GSM.

**Частотный план стандарта GSM-900.** Для стандарта GSM-900 в диапазоне (890-960) МГц возможно использование 124 каналов с дуплексным разносом частот 45 МГц. Полоса каждого канала  $B_k = 0,2$  МГц, шаг сетки несущих 0,2 МГц. Частоты несущих (сетки несущих) для нижнего и верхнего диапазонов для  $i$ -го канала соответственно (рисунок 3):

$$\begin{aligned} f_{ULi} &= (890 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ f_{DLi} &= (935 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ 1 &\leq i \leq 124. \end{aligned} \quad (1)$$



Рисунок 3 – Частотный план стандарта GSM-900

**Частотный план стандарта GSM-1800.** Для стандарта GSM-1800 в диапазоне (1710-1880) МГц возможно использование 374 каналов с дуплексным разносом 95 МГц. Полоса каждого канала  $B_k = 0,2$  МГц, шаг сетки несущих 0,2 МГц. Сетки несущих для нижнего и верхнего диапазонов соответственно:

$$\begin{aligned} f_{ULi} &= (1710 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ f_{DLi} &= (1805 + i \cdot 0,2) \text{ МГц}; \\ 1 &\leq i \leq 374. \end{aligned} \quad (2)$$

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 стандарта GSM-1900, используемого в США и Канаде, в диапазоне (1850-1990) МГц возможно использование 299 каналов с полосой каждого канала  $B_k = 0,2$  МГц, шагом сетки несущих 0,2 МГц и дуплексным разном 80 МГц. Сетки несущих для нижнего и верхнего диапазонов соответственно:

$$f_{ULi} = (1850 + i \cdot 0,2) \text{ МГц};$$

$$f_{DLi} = (1930 + i \cdot 0,2) \text{ МГц};$$

$$1 \leq i \leq 299.$$
(3)

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 разнос частот соседних каналов ( $\Delta f$ ) в одной соте для систем GSM должен быть не менее, чем

$$\Delta f = 3B_k = 3 \cdot 0,2 \text{ МГц} = 0,6 \text{ МГц}.$$

Такой частотный разнос для системы GSM обеспечивает «внутрисистемную электромагнитную совместимость (ЭМС) первого вида» – ЭМС нескольких передатчиков одной БС.

## 2 ОСОБЕННОСТИ ОДНОРОДНОЙ СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

### 2.1 Однородная сотовая структура систем мобильной связи

Любая система сотовой связи имеет ячеистую структуру. Базовые станции, обслуживающие определенную территорию, располагаются по «треугольной сетке», то есть находятся в вершинах совмещенных равнобедренных треугольников (рисунок 4). 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).

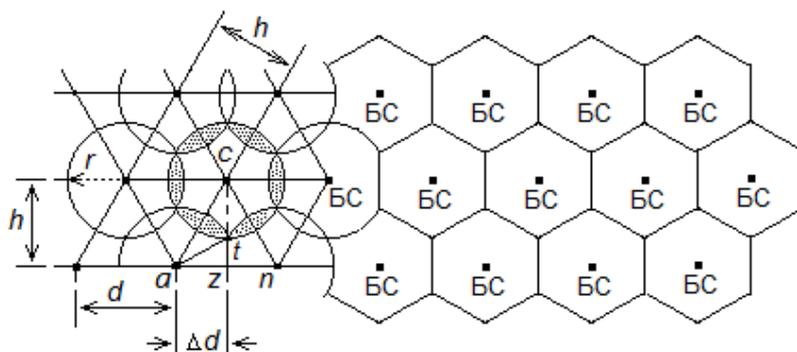


Рисунок 4 – Зоны обслуживания (ячейки, соты, сайты) базовых станций сотовой системы радиосвязи

Каждая из БС обслуживает определенную территорию, которая на идеальной равнинной местности представляется кругом (сотой, ячейкой, сайтом) с радиусом  $r$ . Соты схематически изображаются в виде правильных шестиугольников. Местность, обслуживаемую одной БС, называют зоной обслуживания. Поэтому сотовые системы являются многозоновыми или многосайтовыми.

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

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

$$d = 2\Delta d = 2az = 2r \cos 30^\circ = 2r \sqrt{3}/2 = r \sqrt{3}, \quad (4)$$

смещение узлов сот, расположенных на соседних параллельных прямых,

$$\Delta d = r \sqrt{3}/2, \quad (5)$$

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

$$h = cz = ct + tz = r + r \sin 30^\circ = 1,5 r. \quad (6)$$

В различных системах на каждой БС может формироваться несколько дуплексных частотных каналов связи на одну антенну (например, в спецификации GSM – до 20 каналов, однако на практике не используют более 8 каналов из-за взаимного влияния передатчиков).

## 2.2 Частотная группа и кластер сотовой структуры

Несколько дуплексных частотных каналов одной БС называют «частотной группой».

Одни и те же частотные группы могут использоваться в ячейках сотовой структуры многократно.

Совокупность ячеек, в которых частотные группы не совпадают, называют «кластером».

Для отсутствия пробелов между сотами на местности, обслуживаемой СМС с однородной сотовой структурой, размерность кластера ( $N_{kl}$ ) может принимать только некоторые значения (3, 4, 7, 9 и пр.), определяемые выражением:

$$N_{kl} = (k+l)^2 - kl = k^2 + kl + l^2, \quad (7)$$

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

На рисунке 5 показана сотовая структура с кластером размерностью три ( $N_{kl} = 3$ , разные частотные группы в ячейках обозначены цифрами от 1 до 3), а на рисунке 6 – размерностью семь ( $N_{kl} = 7$ , разные частотные группы обозначены цифрами от 1 до 7).

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

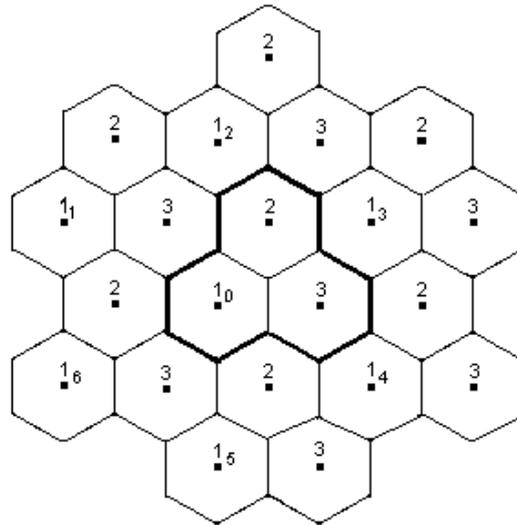


Рисунок 5 – Сотовая структура с кластерами размерностью три ( $N_{кл} = 3$ )

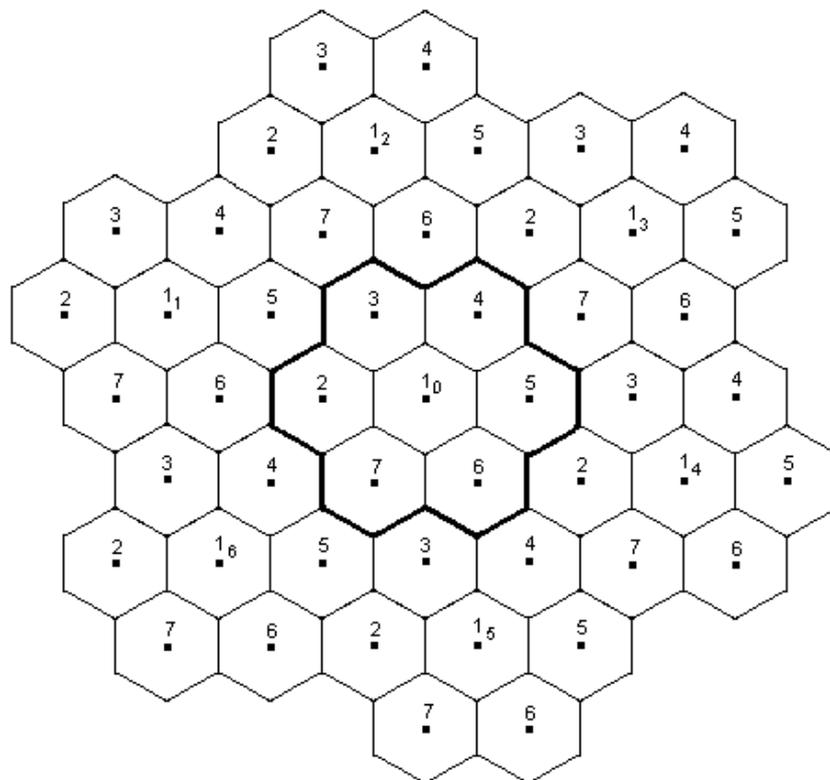


Рисунок 6 – Сотовая структура с кластерами размерностью семь ( $N_{кл} = 7$ )

## 2.3 Мешающее действие интерференционных помех. Внутрисистемная ЭМС второго вида

Множественное использование тех же самых частотных групп в ячейках сотовой структуры приводит к мешающему действию на приемники МС «своей» соты «интерференционных помех» (то есть помех на мало отличающихся несущих частотах) от передатчиков БС «чужих» сот. Малые отличия частот передатчиков БС одинаковых частотных групп обусловлены частотной нестабильностью задающих генераторов этих передатчиков.

Интерференционные помехи для МС еще называют «соканальными помехами» или «помехами на совпадающих частотах».

Интерференционные помехи при аналоговой связи приводят к образованию интерференционных свистов, а при цифровой связи – к появлению цифровых ошибок.

Для уменьшения соканальных помех из «чужих» сот, то есть для обеспечения «внутрисистемной ЭМС второго вида» (внутрисистемной ЭМС по интерференционным помехам) необходимо, чтобы соты с совпадающими частотными группами отстояли друг от друга на достаточных расстояниях.

Для оценки мешающего действия интерференционных помех в сотовой модели с однородной структурой используется косоугольная система координат  $(x, y)$ , угол между осями которой равен 60 градусам (рисунок 7). В этой системе расстояние от начала координат до любой точки плоскости в безразмерном масштабе расстояний:

$$\hat{d} = \sqrt{\hat{d}_{ox}^2 + \hat{d}_{ox} \hat{d}_{oy} + \hat{d}_{oy}^2}, \quad (8)$$

где  $\hat{d}_{ox}, \hat{d}_{oy}$  – расстояния от начала координат до проекций соответственно на ось  $x$  и на ось  $y$  от любого узла (от любой БС), которые характеризуются целыми числами ( $\hat{d}_{ox} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $\hat{d}_{oy} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

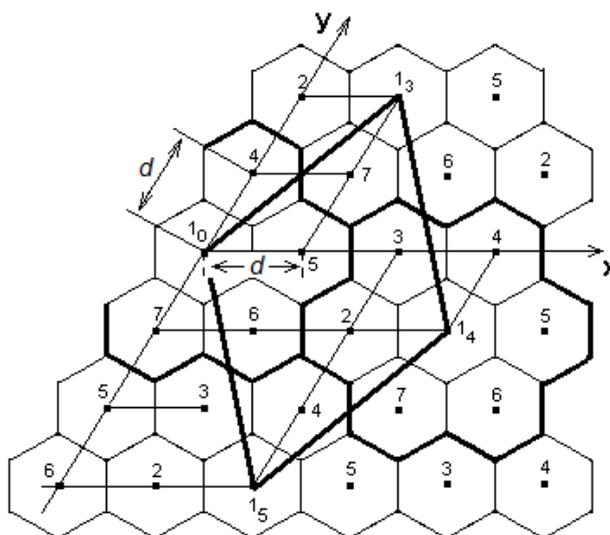


Рисунок 7 – Косоугольная система координат  $(x, y)$  однородной сотовой структуры

Для БС «1<sub>0</sub>» (см. рисунок 7)  $\hat{d}_{ox} = 0$ ,  $\hat{d}_{oy} = 0$ ; для БС «1<sub>3</sub>»  $\hat{d}_{ox} = 1$ ,  $\hat{d}_{oy} = 2$ ; для БС «1<sub>4</sub>»  $\hat{d}_{ox} = 3$ ,  $\hat{d}_{oy} = -1$ ; для БС «1<sub>5</sub>»  $\hat{d}_{ox} = 2$ ,  $\hat{d}_{oy} = -3$ .

Интерференционные помехи наиболее опасны от ближайших «мешающих» БС, частотные группы которых одинаковы. На рисунке 7 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.

Используя построения, показанные на рисунке 7 (где  $N_{кл} = 7$ ), нетрудно убедиться, что расстояния  $\hat{d}_{кл}$  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 (8) взяты для БС «1<sub>3</sub>»:  $\hat{d}_{ox} = 1$  и  $\hat{d}_{oy} = 2$ ):

$$\hat{d}_{кл} = \sqrt{1^2 + 1 \cdot 2 + 2^2} = \sqrt{7} = \sqrt{N_{кл}}. \quad (9)$$

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

Поскольку в реальном масштабе расстояний

$$d_{ox} = d \hat{d}_{ox}, \quad d_{oy} = d \hat{d}_{oy},$$

то с учетом (9):

$$d_{кл} = d \hat{d}_{кл} = d \sqrt{N_{кл}} = r \sqrt{3N_{кл}} = r q. \quad (10)$$

Параметр

$$q = \frac{d_{кл}}{r} = \sqrt{3N_{кл}} \quad (11)$$

называют или «коэффициентом ЭМС сети по интерференционным помехам», или «коэффициентом уменьшения соканальных помех».

Из (11) следует, что размерность кластера (число сот на кластер)

$$N_{кл} = \frac{q^2}{3} = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{d_{кл}}{r} \right)^2. \quad (12)$$

## 2.4 Отношение сигнал-интерференция (SIR)

Защищенность МС в «своей» соте от интерференционных помех «чужих» сот характеризуют «медианным отношением сигнал-интерференция» (SIR – Signal Interference Ratio):

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{P_{мо}}{P_{mi}}, \quad (13)$$

где  $S = P_{мо}$  – медианная мощность полезного сигнала от БС «своей» соты на входе приемника МС, находящейся на границе соты (то есть на максимальном удалении от БС «своей» соты);

$I = P_{mi}$  – медианная суммарная мощность мешающего сигнала от  $i$ -го числа БС «чужих» сот.

Поскольку затухание мощности радиоволн обратно пропорционально расстоянию, возведенному в степень  $n$  (где  $n$  – показатель затухания радиоволн для конкретной местности), то при одинаковых мощностях передатчиков БС сотовой структуры:

$$P_{mo} \sim \frac{1}{r^n}; \quad P_{mi} \sim \sum_i \left( \frac{1}{(R_i)^n} \right), \quad (14)$$

где  $R_i$  – расстояние между МС и «мешающей» БС с номером  $i$ .

Из (13) с учетом (14) следует, что

$$SIR = \frac{S}{I} = \frac{1}{r^n \sum_i \left( \frac{1}{(R_i)^n} \right)}. \quad (15)$$

Для нахождения расстояний до «мешающих» БС рассмотрим построения для однородной сотовой структуры, изображенные на рисунке 8. Местоположение МС – на границе соты (точка «а»), где, очевидно, значение SIR минимально. «Своя» (полезная) БС на рисунке не имеет номера, «мешающие» БС пронумерованы цифрами от 1 до 6.

Очевидно:

$$R_1 = d_{кл} - r; \quad (16)$$

$$R_4 = d_{кл} + r. \quad (17)$$

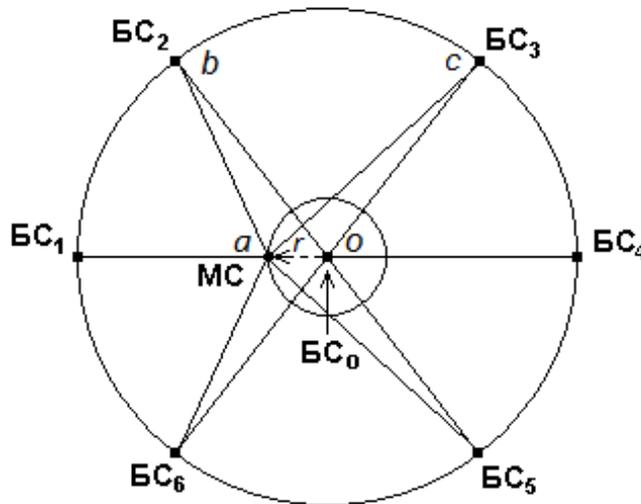


Рисунок 8 – Местоположения «своей» (полезной) БС (БС<sub>0</sub>) и «мешающих» БС (БС<sub>1</sub>, БС<sub>2</sub>, БС<sub>3</sub>, БС<sub>4</sub>, БС<sub>5</sub>, БС<sub>6</sub>)

Из треугольников « $abo$ » и « $aco$ »:

$$R_2 = R_6 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 60^\circ} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - d_{кл} r}; \quad (18)$$

$$R_3 = R_5 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 120^\circ} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 + d_{кл} r}. \quad (19)$$

С учетом (10):

$$R_1 = (q-1)r; \quad (20)$$

$$R_4 = (q+1)r; \quad (21)$$

$$R_2 = R_6 = \left(\sqrt{q^2 - q + 1}\right) r; \quad (22)$$

$$R_3 = R_5 = \left(\sqrt{q^2 + q + 1}\right) r. \quad (23)$$

На основе (15) с учетом (20)-(23) следует, что

$$SIR = \left( \frac{1}{(q-1)^n} + \frac{1}{(q+1)^n} + \frac{2}{\left(\sqrt{q^2 - q + 1}\right)^n} + \frac{2}{\left(\sqrt{q^2 + q + 1}\right)^n} \right)^{-1}. \quad (24)$$

Из (24) следует, что для однородной сотовой структуры  $SIR$  зависит от размерности кластера ( $N_{кл}$ ) и от показателя затухания радиоволн для данной местности ( $n$ ), но не зависит от радиуса сот ( $r$ ).

Минимально допустимое значение параметра  $SIR_{мин}$  для обеспечения устойчивой работоспособности СМС определяется видом модуляции радиосигнала, способом формирования сигналов в каналах связи, «мощностью» помехоустойчивого кодирования. Например, для Европейской цифровой системы GSM (Global System for Mobile Communications) поколения 2G

$$SIR_{мин}^{GSM} = 9 \text{ дБ}, \quad (25)$$

а для Северо-Американской цифровой системы DAMPS (Digital Advanced Mobile Phone Service) поколения 2G

$$SIR_{мин}^{DAMPS} = 16 \text{ дБ}. \quad (26)$$

## 2.5 Секторизация сот для увеличения SIR

Эффективным способом снижения уровня интерференционных помех для МС (увеличения значения параметра SIR) является «секторизация сот» за счет применения на БС вместо одной антенны с круговой диаграммой направленности (ДН) в горизонтальной плоскости трех секторных антенн с шириной ДН  $120^0$  или шести секторных антенн с шириной ДН  $60^0$ . В этих случаях в каждой соте необходимо использование соответственно по три или по шесть разных частотных групп.

На рисунке 9 изображена однородная сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 3$  и секторизованными сотами за счет антенн на БС с шириной ДН  $120^0$ . В этом случае интерференционные помехи для МС, находящейся в зоне обслуживания БС «1<sub>0</sub>», возникают за счет мешающих сигналов только от трех БС: БС «1<sub>1</sub>»; БС «1<sub>5</sub>»; БС «1<sub>6</sub>».

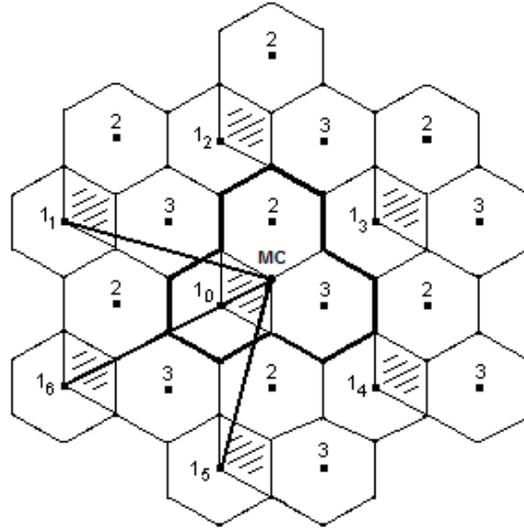


Рисунок 9 – Сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 3$  и секторизованными сотами за счет антенн с шириной ДН  $120^{\circ}$

Поскольку

$$R_1 = R_5 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 120^{\circ}} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 + d_{кл} r} = \left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right) r, \quad (27)$$

$$R_6 = d_{кл} + r = (q + 1) r, \quad (28)$$

то для такого варианта основе (15) с учетом (27) и (28):

$$SIR = \left( \frac{1}{(q+1)^n} + \frac{2}{\left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right)^n} \right)^{-1}. \quad (29)$$

На рисунке 10 изображена однородная сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 7$  и секторизованными сотами за счет антенн на БС с шириной ДН  $120^{\circ}$ . В этом случае интерференционные помехи для МС, находящейся в зоне обслуживания БС «1<sub>0</sub>», возникают за счет мешающих сигналов только от двух БС – от БС «1<sub>1</sub>» и от БС «1<sub>6</sub>».

Для этого варианта:

$$R_1 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 120^{\circ}} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 + d_{кл} r} = \left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right) r; \quad (30)$$

$$R_6 \approx d_{кл} + r = (q + 1) r; \quad (31)$$

$$SIR \approx \left( \frac{1}{(q+1)^n} + \frac{1}{\left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right)^n} \right)^{-1}. \quad (32)$$

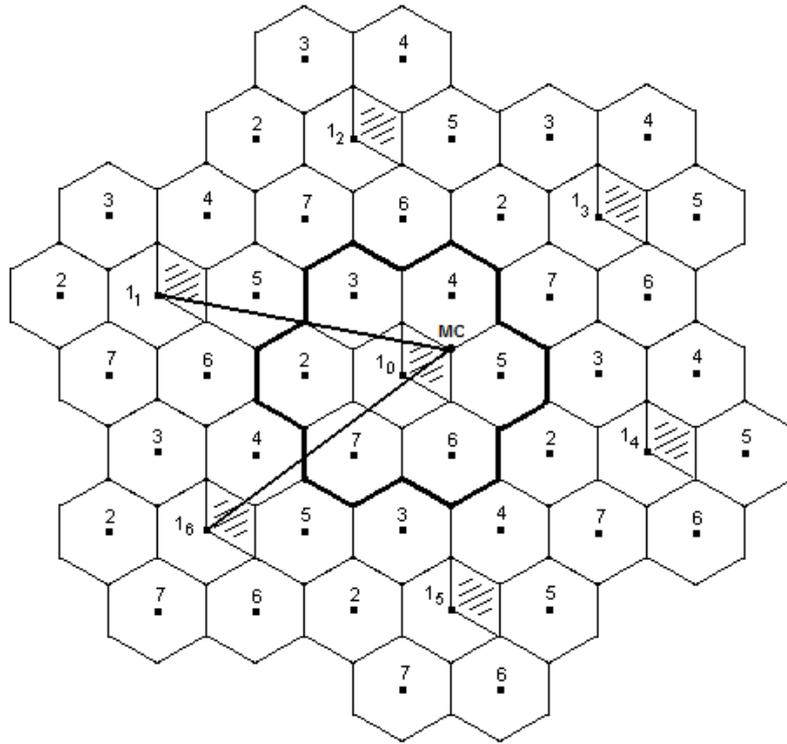


Рисунок 10 – Сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 7$  и секторизованными сотами за счет антенн с шириной ДН  $120^0$

На рисунке 11 изображена однородная сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 3$  и секторизованными сотами за счет антенн на БС с шириной ДН  $60^0$ . В этом случае интерференционные помехи для МС, находящейся в зоне обслуживания БС «1<sub>0</sub>», возникают за счет мешающих сигналов только от двух БС – от БС «1<sub>5</sub>» и от БС «1<sub>6</sub>».

Для этого варианта:

$$R_5 = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 - 2d_{кл} r \cos 120^0} = \sqrt{d_{кл}^2 + r^2 + d_{кл} r} = \left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right) r; \quad (33)$$

$$R_6 = d_{кл} + r = (q + 1) r; \quad (34)$$

$$SIR = \left( \frac{1}{(q + 1)^n} + \frac{1}{\left( \sqrt{q^2 + q + 1} \right)^n} \right)^{-1}. \quad (35)$$

На рисунке 12 изображена однородная сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 7$  и секторизованными сотами за счет антенн на БС с шириной ДН  $60^0$ . В этом случае интерференционные помехи для МС, находящейся в зоне обслуживания БС «1<sub>0</sub>», возникают за счет мешающих сигналов только от одной БС «1<sub>6</sub>».

Для этого варианта:

$$R_6 \approx d_{кл} + r = (q + 1) r; \quad (36)$$

$$SIR \approx \left( \frac{1}{(q + 1)^n} \right)^{-1}. \quad (37)$$

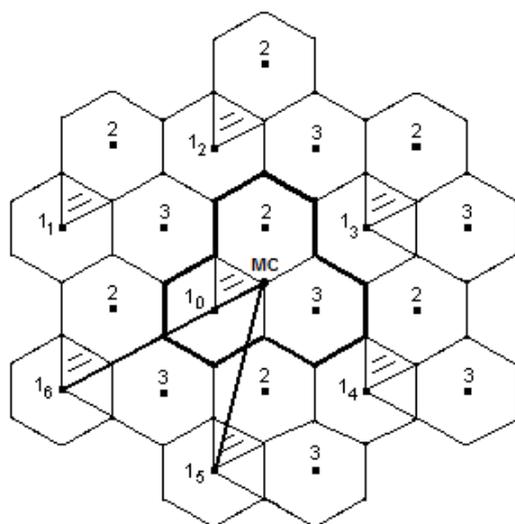


Рисунок 11 – Сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 3$  и секторизованными сотами за счет антенн с шириной ДН  $60^0$

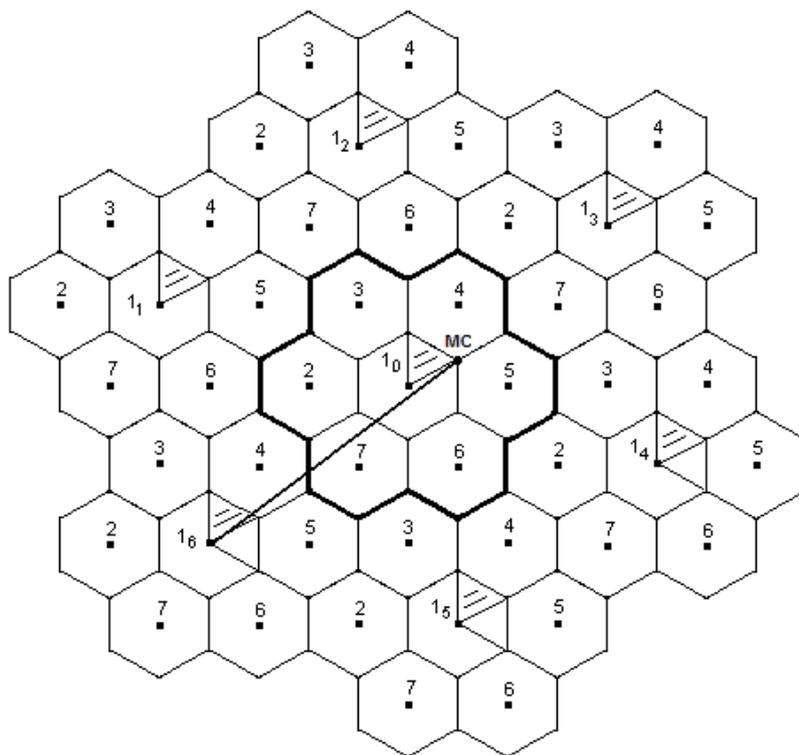


Рисунок 12 – Сотовая структура с кластерами размерностью  $N_{кл} = 7$  и секторизованными сотами за счет антенн с шириной ДН  $60^0$

### 3 ЗАДАЧИ

3.1 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.

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

3.3 Для однородных сетей мобильной связи с круговыми ДН антенн БС определите, во сколько раз коэффициент электромагнитной совместимости по интерференционным помехам 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.

3.4 Определите отношение сигнал-интерференция для однородной сети мобильной связи с круговыми ДН антенн БС, если коэффициент затухания радиоволн  $n = 4$  (квазигладкий город), а размерность кластера  $N_{кл} = 3$ .

Ответ: 9,24 дБ.

3.5 Определите отношение сигнал-интерференция в однородной сети мобильной связи с круговыми ДН антенн БС для квазигладкого города, если коэффициент затухания радиоволн  $n = 4$ , а размерность кластера  $N_{кл} = 7$ .

Ответ: 17,8 дБ.

3.6 Определите отношение сигнал-интерференция в однородной сети мобильной связи с круговыми ДН антенн БС для квазигладкой сельской местности, если коэффициент затухания радиоволн  $n = 3$ , а размерность кластера  $N_{кл} = 3$ .

Ответ: 5,35 дБ.

3.7 Определите отношение сигнал-интерференция в однородной сети мобильной связи с круговыми ДН антенн БС для квазигладкой сельской местности, если коэффициент затухания радиоволн  $n = 3$ , а размерность кластера  $N_{кл} = 7$ .

Ответ: 11,57 дБ.

3.8 Для однородной сети мобильной связи с коэффициентом затухания радиоволн  $n = 3$  и размерностью кластера  $N_{кл} = 7$  определите, на сколько децибел увеличится значение SIR, если на базовых станциях вместо антенн с круговой ДН использовать:

а) антенны с ДН  $120^\circ$ ; б) антенны с ДН  $60^\circ$ .

Ответы: а) на 7,27 дБ; б) на 10,83 дБ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Роль и значение сотовой радиосвязи в современных условиях увеличивается с каждым днем. В будущем неизбежно возникновение новых технологий радиосвязи с повышенной надежностью и возрастающей скоростью передачи информации, основанных, в частности, на основах частотно-территориального планирования и обеспечении внутрисистемной электромагнитной совместимости сотовых сетей, рассмотренных в настоящем пособии.

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

DCS (GSM)-1800 – Digital Cellular System – Цифровая система сотовой связи поколения 2G (или GSM) диапазона 1800 МГц;

DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunication – Цифровая усовершенствованная беспроводная связь;

DL – DownLink – нисходящий (прямой) канал связи;

DVB-T2 – Digital Video Broadcasting Second Generation Terrestrial – Стандарт эфирного цифрового телевидения 2-го поколения (2G – 2 Generation);

EGSM – Extended GSM – Расширенный стандарт GSM-900, использующий более широкий диапазон частот;

FDD – Frequency Division Duplex – частотное разделение каналов (нисходящего и восходящего при дуплексной связи);

GSM-900 – Global System for Mobile Communications – Глобальный стандарт мобильной связи – СМС поколения 2G диапазона 900 МГц;

LTE – Long-Term Evolution – Долговременное развитие – СМС поколения 4G;

SIR – Signal Interference Ratio – Отношение сигнал-интерференция.

TDD – Time Division Duplex – временное разделение каналов (нисходящего и восходящего при дуплексной связи);

TETRA – TErrestrial TRunked RAdio – Наземное транковое радио;

UL – UpLink – восходящий (обратный) канал связи;

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System – Универсальная мобильная телекоммуникационная система – СМС поколения 3G с использованием технологии WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access – Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов;

Wi-Fi – Wireless Fidelity – Беспроводная точность – технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11.

БС – базовая станция.

ДН – диаграмма направленности.

МС – мобильная станция.

РСК – ромб совмещенного канала.

ЭМС – электромагнитная совместимость.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Частоты сотовой связи 2G, 3G, 4G, 5G сотовых операторов МТС, Билайн, Мегафон, Tele2, Yota и др. [Электронный ресурс]. URL: <https://mobilebooster.ru/post/102/mobile-frequencies>.
2. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. 440 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. Системы мобильной связи: Учебн. 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.
5. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. 296 с.
6. Бабков В.Ю. Сотовые системы мобильной связи: Учебн. пособие / В.Ю. Бабков, И.А. Цикин . – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 432 с.