

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

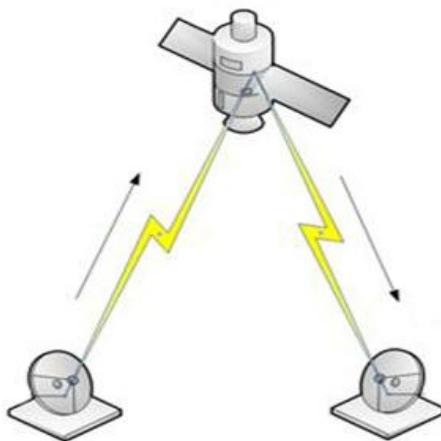
Радиотехнический факультет

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

Долгих Д.А. Вершинин А.С.

Математический Аппарат Теории Сигналов и Систем

Учебно-методическое пособие для практических занятий и
самостоятельной работе



Томск 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ТОР
_____ Ворошилин Е.П.
«__» _____ 2013 г.

**Математический Аппарат Теории Сигналов и
Систем**

Учебно-методическое пособие для практических занятий и
самостоятельной работе

Разработчики:
доцент каф. ТОР
_____ Долгих Д.А.
ассистент каф. ТОР
_____ Вершинин А.С.

Оглавление

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1	4
Расчёт бюджета линии радиосвязи.....	4
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2	8
Расчет профиля пролета радиорелейных линий связи	8
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3	12
Расчет зон покрытия по модели Окамура-Хата.....	12
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4	15
Локальные беспроводные сети Wi-Fi	15
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5	18
Беспроводные сети Wi-MAX Mobile	18
Литература.....	24

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

Расчёт бюджета линии радиосвязи

В теории связи важным понятием является канала связи. Обычно под каналом связи понимают ту часть системы связи, которая включает источник информации, устройство кодирования и модуляции, передающее устройство, физический канала (среду распространения сигнала), приемник с устройствами обработки информации и получатель информации. Анализ канал связи включает **бюджет канала** — расчет потерь энергии сигнала, связанных с физическими процессами, протекающими в устройствах с среде распространения. Бюджет — этот метод оценки, позволяющий определить достоверность передачи информации. Среда распространения или электромагнитный тракт связи, соединяющий передающее и приемное устройства называется каналом связи.

Антенны

Антенна является одним из основных элементов системы беспроводной связи. В качестве простейшей модели передающей антенны, используемой при анализе радиоканала, рассматривается изотропный излучатель — идеальная антенна, излучающая электромагнитные волны во всех направлениях равномерно. Для изотропного излучателя плотность потока мощности на расстоянии r от антенны определяется формулой

$$S(r) = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi r^2},$$

где P_{Σ} - излучаемая мощность.

Для реальных антенн характерно неравномерное распределение излучаемой мощности в пространстве, определяемое диаграммой направленности.

В качестве численной характеристики направленных свойств антенны вводится коэффициент направленного действия — это число, которое показывает во сколько раз мощность антенны в данном направлении больше мощности излучения гипотетической изотропной антенны, отнесенной к единице телесного угла при условии равенства мощностей излучения обеих антенн.

Кроме того антенны характеризуются:

Коэффициент полезного действия — отношение мощности излучения антенны к мощности, подводимой к антенне;

Эффективная площадь антенны

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G,$$

где G — коэффициент усиления антенны.

Обычно излучаемая мощность сравнивается либо с мощностью изотропного излучателя (Effective Isotropic Radiated Power), либо с мощностью, излучаемой полуволновым диполем (Effective Radiated Power).

В первом случае — $EIRP = P \cdot G$;

Во втором случае — $ERP = P \cdot G / 1,64$;

Следовательно $ERP(dBd) = EIRP(dBi) - 2,15$ дБ.

Бюджет канала связи

Достоверность передачи информации определяется несколькими факторами, среди которых можно выделить отношение Сигнал/Шум, а также искажения сигнала, вызванные межсимвольной интерференцией. В цифровой связи вероятность ошибки зависит от нормированного отношения E_b/N_0 , где E_b - энергия одного бита, N_0 - спектральная плотность мощности шума.

Уменьшение отношения Сигнал/Шум может быть вызвано снижением мощности сигнала, повышением мощности шума или мощности сигналов, интерферирующих с полезным сигналом. Эти механизмы называются, соответственно, потерями (ослаблением) и шумом (интерференцией).

Ослабление может происходить в результате поглощения энергии сигнала, отражения части энергии сигнала или рассеяния. Существуют несколько источников шумов и интерференции — тепловой шум, галактический шум, атмосферные и промышленные помехи, перекрестные и интерферирующие сигналы от других источников.

Перечислим некоторые причины потерь:

1. Потери, связанные с ограничением полосы канала.

2. Межсимвольная интерференция.
3. Модуляционные потери.
4. Интермодуляционные потери.
5. Поляризационные потери.
6. Пространственные потери.
7. Помехи соседнего канала.
8. Атмосферные и галактические шумы.
9. Собственные шумы приемника
10. Потери в антенно-фидерном тракте.

При анализе радиоканала часто используются модель свободного пространства. В рамках этой модели предполагается, что в канале отсутствуют такие процессы, как отражение, преломление, поглощение, рассеяние и дифракция радиоволн. Если рассматривается распространение радиоволн в атмосфере, то она предполагается однородной и удовлетворяющей указанным выше условиям. Предполагается, что земная поверхность находится достаточно далеко от радио трассы, так что ее влиянием можно пренебречь. Модель свободного пространства является эталонной при анализе распространения радиоволн на различных трассах. В рамках этой модели энергия сигнала зависит только от расстояния между передатчиком и приемником и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Анализ бюджета канала начинается, как правило, с дистанционного уравнения, связывающего мощность на выходе приемного устройства с излучаемой передатчиком мощностью. На первом этапе рассматривается ненаправленная антенна, равномерно излучающая в телесном углу 4π стерадиан — изотропный излучатель.

Принимаемая мощность может быть записана в виде:

$$P_{\text{прием}} = S(r) \cdot A_{\text{прием}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot A_{\text{прием}}}{4\pi r^2},$$

где $A_{\text{прием}}$ - эффективная площадь приемной антенны, $P_{\text{прием}}$ - мощность на входе приемника, $P_{\text{пер}}$ - мощность передатчика, r – расстояние между передатчиком и приемником.

Вышеприведенное уравнение иногда называется дистанционным уравнением.

Для изотропных антенн дистанционное уравнение может быть записано:

$$P_{\text{прием}} = \frac{P_{\text{пер}}}{(4\pi/\lambda)^2} = \frac{P_{\text{пер}}}{L},$$

где L - суммарные потери в свободном пространстве, определяемы формулой

$$L = (4\pi/\lambda)^2.$$

Если для передачи и приема сигнала используются направленные антенны, то можно записать:

$$P_{\text{прием}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{прием}}}{L},$$

где $P_{\text{пер}}$ - мощность, подводимая к передающей антенне, а $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{прием}}$ - коэффициенты усиления передающей и приемной антенн.

Таким образом мощность на входе приемника можем записать:

$$P_{\text{прием}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{прием}} \cdot \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

Обычно величину потерь в свободном пространстве измеряют в децибелах:

$$L(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{прием}}};$$

$$L(\text{дБ}) = 20 \lg(4\pi \cdot r/\lambda) = 20 \lg(f) + 20 \lg(r) - 147,56.$$

ЗАДАЧА №1

Рассчитать максимальную дальность радиосвязи для системы радиосвязи. Если мощность излучения передатчика составляет 20 дБм, минимально допустимая мощность приемника -90 дБм, запас на замирания 30 дБ, коэффициенты усиления передающей и приемной антенн 20 дБ.

ЗАДАЧА №2

Для обеспечения вероятности битовой ошибки $BER = 10^{-6}$ приемнику BPSK требуется отношение $E_b/N_0 = 6$ дБ, мощность теплового шума равна -93 дБм. Расстояние между передатчиком и приемником составляет 10 км. Коэффициенты усиления передающей и приемной антенн составляют 10 дБ. Необходимо определить минимальную мощность передатчика для обеспечения требуемого BER.

Домашнее задание

1. Проработать материал, касающийся распространения радиоволн в свободном пространстве.
2. Рассчитать дальность радиосвязи, если в задаче №1 изменить коэффициент усиления приёмной антенны с 20 до 30 дБ.
3. Рассчитать минимальную мощность передатчика если в задаче №2 используется QAM-16.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

Расчет профиля пролета радиорелейных линий связи

Радиорелейные системы связи предназначены для создания наземных высокоскоростных линий и сетей связи на базе стационарных наземных радиорелейных линий (РРЛ).

По архитектуре (структуре) построения радиорелейные системы связи разделяются на следующие группы:

- РРЛ связи «точка - точка»;
- радиорелейные сети связи;
- радиорелейные системы «последней мили» типа «точка - многоточка».

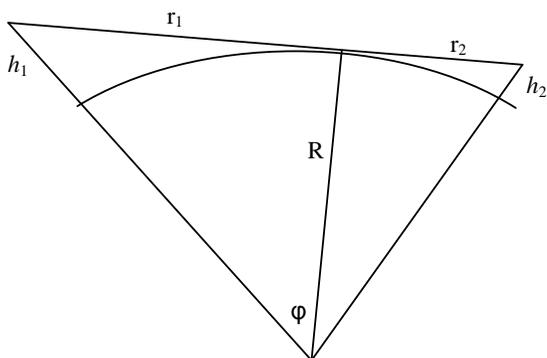
По условиям распространения радиосигналов радиорелейные системы связи классифицируются как:

- РРЛ прямой видимости;
- тропосферные РРЛ;
- радиорелейные системы связи с использованием ретрансляторов на стратосферных платформах и летно-подъемных средствах.

РРЛ связи «точка - точка» дополняют системы с ВОЛС. В настоящее время до скорости передачи 155Мбит/с РРЛ дешевле ВОЛС. РРЛ широко используются для создания магистральных линий связи, а также высокоскоростных линий связи в городах, горных и труднодоступных местностях.

РРЛ со скоростями передачи информации в стволе до 10 Мбит/с относятся к системам малой емкости. РРЛ со скоростями передачи информации в стволе от 10 до 100 Мбит/с относятся к системам средней емкости, а со скоростью более 100 Мбит/с – к системам большой емкости.

Расстояние прямой видимости



Выведем зависимость расстояния прямой видимости без учета рефракции:

$$\cos \varphi = \frac{R}{R + h_1} \sim 1 - h_1 / R;$$

$$\cos \varphi \sim 1 - \varphi^2 / 2 \quad \text{и} \quad \delta \varphi \ll 1;$$

$$r_1 = \varphi R = \sqrt{2 h_1 R};$$

$$r_2 = \sqrt{2 h_2 R};$$

$$r = r_1 + r_2 = \sqrt{2 R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2});$$

$$r = 3.57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2});$$

где $R = 6378$ км; h_1, h_2 в метрах.

В зависимости от величины просвета интервалы подразделяются на следующие:

Открытые, для которых $H > H_0$, где H_0 , м, соответствует радиусу минимальной зоны Френеля:

$$H_0 = \sqrt{\frac{1 \lambda \cdot R_1 \cdot (R - R_1)}{3 R}} = \sqrt{\frac{1}{3} \lambda \cdot R \cdot K_{\text{тр}} (1 - K_{\text{тр}})}.$$

Полуоткрытые, для которых $H_0 \geq H > 0$;

Закрытые, для которых $H < 0$.

Определяют относительный просвет на трассе:

$$p(g) = H(g)/H_0$$

Основным критерием для расчета высоты подвеса антенн на пролете является условие отсутствия экранировки препятствиями минимальной зоны Френеля при субрефракции радиоволн. Известно, что основная часть энергии передатчика распространяется в сторону приемной антенны внутри минимальной зоны Френеля, представляющий эллипсоид вращения с фокусами в точках передающей и приемной антенн.

Построение и анализ профиля радиорелейного интервала производят в порядке указанном ниже в соответствии с [1].

Рассчитывается эквивалентный радиус Земли a_3 , м,

$$a_3 = \frac{6370000}{1 - 3185000 \cdot g}, \quad (4.1)$$

где g - значение эффективного вертикального градиента диэлектрической проницаемости воздуха, 1/м.

Рассчитывается линия условного нулевого уровня на интервале длиной:

$$y = \frac{R^2}{2 \cdot a_3} \cdot K_i (1 - K_i), \quad (4.2)$$

где $K_i = R_i/R$ - относительная координата текущей i -ой точки;

R_i - расстояние до текущей точки, м.

Используя множество значений из таблицы, наносятся высотные отметки рельефа местности относительно условного нулевого уровня. Соединяя высотные отметки отрезками линий, строится профиль рельефа местности.

В соответствии с заданными высотами антенн h_1 , h_2 , ставятся на точках 0 и R соответствующие высоты антенн относительно профиля местности и соединяются прямой линией.

Определяется просвет трассы $H(g)$, как минимальная разность высот между профилем радиорелейного интервала и прямой, соединяющей центры левой и правой антенн, с высотами h_1 , h_2 соответственно [3]:

$$H(g) = H(0) + \Delta H(g), \quad (4.3)$$

где $H(0)$ - значение просвета при отсутствии рефракции, определяемое из профиля местности;

$\Delta H(g)$ - приращение просвета при изменении g .

$$\Delta H(g) = -\frac{R^2}{4} \cdot g \cdot K_{\text{тр}} \cdot (1 - K_{\text{тр}}), \quad (4.4)$$

где $K_{\text{тр}}$ - относительная координата наивысшей точки профиля пролета.

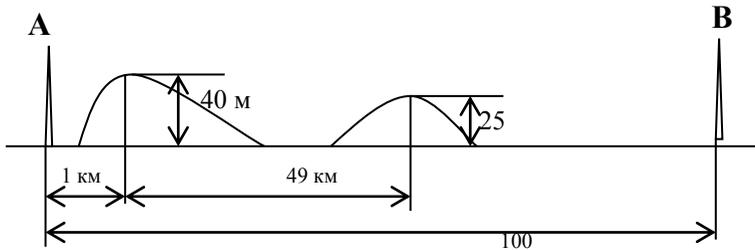
ЗАДАЧА №1

Для пролета радиорелейной линии, показанного на рисунке, без учета рефракции радиоволн в атмосфере определите минимальную высоту подвеса антенн при условиях:

Длина волны $\lambda = 10$ см.

Высоту антенн в точках А и В принять равными.

Поясните методику расчета.



ЗАДАЧА №2

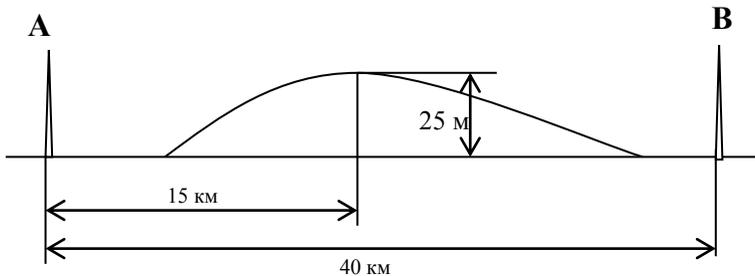
Для пролета радиорелейной линии, показанного на рисунке, определите минимальную высоту подвеса антенн при условиях:

Длина волны $\lambda = 5$ см.

Вертикальный градиент диэлектрической проницаемости $g = -8.0 \cdot 10^{-8}$ 1/м.

Высоту антенн в точках А и В принять равными.

Поясните методику расчета.



Домашнее задание

1. Проработать материал относительно расчета трасс радиорелейной связи [5].
2. Произвести расчеты в задаче №1 для длины волны 5 см.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

Расчет зон покрытия по модели Окамура-Хата

Модель Окамура-Хата предназначена для предсказания уровня сигнала в больших сотах систем мобильной связи. Модель Окамуры основана на экспериментальных результатах, полученных при следующих условиях: высота подвеса антенны БС над средним уровнем квазигладкой местности 200 м. Хата обобщил результаты многочисленных экспериментальных измерений Окамуры и получил эмпирические формулы для расчета средних потерь сигнала $L_p(r, f, h_{bc}, h_{mc})$.

Мощность на входе приемника с помощью данной модели выражается

$$P_M(r, f, h_{bc}, h_{mc}) = P_{bc} + G_{bc} + G_{mc} - [L_p(r, f, h_{bc}, h_{mc}) + \eta_{bc} + \eta_{mc}].$$

Результаты расчета по модели Хата совпадают с результатами Окамуры с точностью 1 дБ в пределах так называемой «основной области», которая характеризуется диапазоном частот (150..1500) МГц, протяженностью трассы (1..20) км, высотой антенны БС (30..200)м, высотой антенны МС (1..10)м.

При $200 \text{ МГц} \leq f \leq 400 \text{ МГц}$ для «большого» города («большой город» характеризуются плотной застройкой зданиями, не менее 50% которых имеют 5 этажей и боле, а некоторые можно отнести к «небоскребам»):

$$L_p = 70,65 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 26,16 \lg(f) - 8,29 [\lg(1,54 \cdot h_{mc})]^2 + [44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{bc})] \lg(r),$$

где f – частота радиосигнала, МГц;

h_{bc} — высота антенны базовой станции, м;

h_{mc} — высота антенны мобильной станции, м;

r — расстояние между антеннами, м;

При $400 \text{ МГц} \leq f \leq 1500 \text{ МГц}$ для «большого» города:

$$L_p = 74,52 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 26,16 \lg(f) - 3,2[\lg(11,75h_{mc})]^2 + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bc})] \lg(r).$$

Для «среднего и малого» города («средний и малый город» характеризуется плотной застройкой зданиями, более 50% которых имеют 4-5 этажей)

$$L_p = 68,75 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 27,72 \lg(f) - [1,11 \lg(f) - 0,7] h_{mc} + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bc})] \lg(r).$$

Для «пригорода» («пригород» - крупный населенный пункт с низкой плотностью застройки жилых домов и хозяйственных построек высотой 3-4 этажа):

$$L_p = 63,35 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 27,72 \lg(f) - 2[\lg(f/28)]^2 + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bc})] \lg(r) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{mc}.$$

Для «сельской местности» («сельская местность» характеризуется наличием открытых участков длиной не менее 300 м, чередующихся с 1-2 этажными домами):

$$L_p = 27,81 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 46,05 \lg(f) - 4,78[\lg(f)]^2 + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bc})] \lg(r) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{mc}.$$

Для «открытой местности» (открытые участки местности с возможным наличием отдельно стоящих деревьев)

$$L_p = 27,81 - 13,82 \cdot \lg(h_{bc}) + 46,05 \lg(f) - 4,78[\lg(f)]^2 + \\ + [44,9 - 6,55 \lg(h_{bc})] \lg(r) - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{mc}.$$

С несколько большей погрешностью приведенную модель Хаты можно использовать для «расширенной области», которая характеризуется диапазоном частота (150..1800) МГц, протяженностью трассы (1..80) км, высотой подвеса мобильной станции (1..10) м.

Появление сотовых систем мобильной связи, работающих на частотах около 2 ГГц, стимулировало появление модели COST 231 Хата,

которая применяется в диапазоне (1500..2000) МГц при протяженности трассы (1..20) км, высоте антенны базовой станции (30..200) м, высоте антенны мобильной станции (1..10) м.

Для столичного города:

$$L_p = 48,5 - 13,82 \cdot lg(h_{6c}) + 34,41lg(f) - [1,1lg(f) - 0,7]h_{mc} + \\ + [44,9 - 6,55lg(h_{6c})]lg(r).$$

Для среднего города и пригородного центра с умеренной плотностью посадки деревьев:

$$L_p = 48,5 - 13,82 \cdot lg(h_{6c}) + 34,41lg(f) - [1,1lg(f) - 0,7]h_{mc} + \\ + [44,9 - 6,55lg(h_{6c})]lg(r).$$

Для сельской местности:

$$L_p = 9,56 - 13,82 \cdot lg(h_{6c}) + 53,73lg(f) - \\ - [1,1lg(f) - 0,7]h_{mc} - 4,78[lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55lg(h_{6c})]lg(r)$$

Для открытой местности

$$L_p = 4,56 - 13,82 \cdot lg(h_{6c}) + 53,73lg(f) - [1,1lg(f) - 0,7]h_{mc} - \\ - 4,78[lg(f)]^2 + [44,9 - 6,55lg(h_{6c})]lg(r)$$

Модели Хата не учитывают характера местности (наклон трассы, трасса земля-вода, трасса с холмами и горами). Однако этот учет может быть проведен с использованием результатов Окамуры.

Особенности коротких трасс

В горизонтальной плоскости антенны БС имеют либо круговую диаграмму направленности, либо секторную. В вертикальной плоскости для получения наибольшего коэффициента усиления у антенны БС формируется узкая диаграмма направленности.

В модели Окамуры и Хата наименьшая длина трассы выбрана равной 1 км. Это обусловлено тем, что на более коротких трассах возможно попадание МС в зону тени из-за особенностей диаграммы направленности антенны БС в вертикальной плоскости.

ЗАДАЧА №1

С использованием модели Окамуры-Хата рассчитать усредненную медианную мощность сигнала от базовой станции системы сотовой телефонии NMT на расстояниях 1 км, 3 км, 5 км, 10 км, 20 км, 30 км для «среднего» города, если высота антенны базовой станции 50 м, высота антенны мобильной станции 1.5 м. Мощность передатчика БС 4 Вт, коэффициенты усиления антенны БС 6 дБ, МС 6 дБ, потеря в фидерах для базовой и мобильной станций 1 и 0 дБ. Частота сигнала 460 МГц.

ЗАДАЧА №2

Определить зону уверенного приема сигнала от базовой станции с мощностью излучения 20 дБм, коэффициентом усиления антенны 10 дБ и высотой подвеса антенны 20 м. Потери в фидере базовой станции составляют 3 дБ. Мобильная станция имеет порог чувствительности -85 дБм. Коэффициент усиления антенны 3 дБ, потерь в фидере нету. Антенна мобильной станции находится на высоте 1.5 м. В канале возможны замирания глубиной до 30 дБ.

Домашнее задание

1. Проработать материал, касающийся модели распространения радиоволн в Окамуры-Хата.
2. Сравнить результаты расчетов задачи №1 практического занятия №1 для модели распространения радиоволн в свободном пространстве и согласно модели Окамуры-Хата.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4**Локальные беспроводные сети Wi-Fi****Формат фрейма PLCP**

На рисунке приведен формат фрейма.

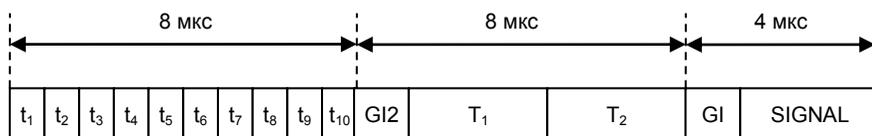
Фрейм состоит из PLCP преамбулы, PLCP заголовка и собственно данных.



Блок под названием “Сигнал” является OFDM символом передающимся с модуляцией BPSK и скоростью кодирования $\frac{1}{2}$.

Поле Rate определяет модуляцию и скорость кодирования в поле данных. Поле Длина определяет количество байт в поле PSDU. Поле четности добавляет в заголовок 1 если предыдущее число единиц не четно и добавляет 0 если предыдущее число единиц четно.

PLCP preamble состоит из 10 коротких тренировочных последовательностей и двух длинных. Данные последовательности служат для определения частотной, временной расстройки, а также регулировки усиления приемника.



Временные соотношения в сигнале приведены в таблице

$$r_{LONG}(t) = w_{TLONG}(t) \sum_{k=-N_{\pi}/2}^{N_{\pi}/2} L_k \exp(j2\pi k \Delta_F(t - T_{G12}))$$

где $T_{G12} = 1.6$ мкс.

Параметры поля скорости (Rate) приведены в таблице.

Скорость Мбит/с	Мод.	Скорость кодирования	Число бит на поднесущую	Число бит на символ	Число не кодированных бит на символ	R1-R4
6	BPSK	1/2	1	48	24	1101
9	BPSK	3/4	1	48	36	1111
12	QPSK	1/2	2	96	48	0101
18	QPSK	3/4	2	96	72	0111
24	16-QAM	1/2	4	192	96	1001
36	16-QAM	3/4	4	192	144	1011
48	64-QAM	2/3	6	288	192	0001
54	64-QAM	3/4	6	288	216	0011

Поле «Сервис» содержит 16 бит. Первые 7 бит служат для инициализации дескремблера, остальные зарезервированы.

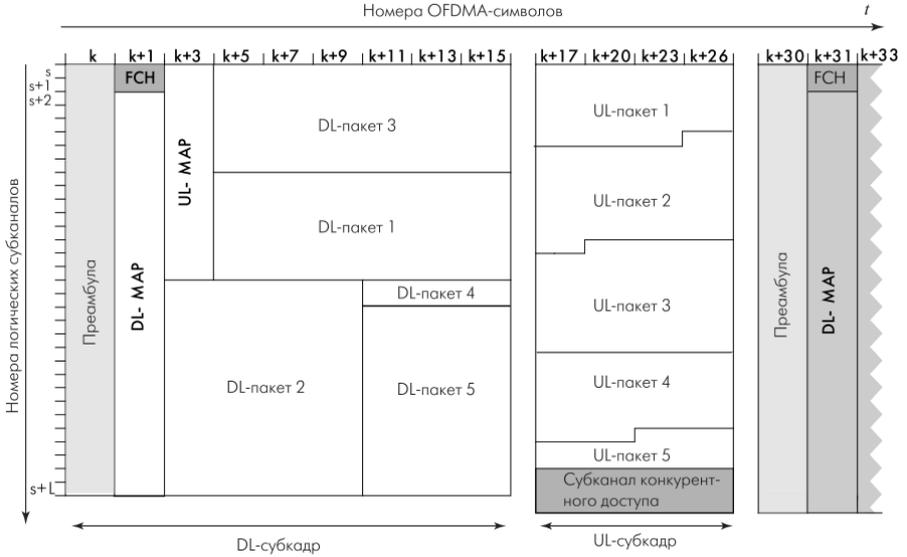
Пилотные поднесущие

В каждом OFDM символе содержится 4 пилотных сигнала с номерами -21 -7 7 21. Пилотные поднесущие модулированы BPSK.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

Беспроводные сети Wi-MAX Mobile

Структура кадров OFDMA использует подразделение на восходящий и нисходящий субкадры (как временное, так и частотное). Длительность кадра может составлять 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 и 20 мс. Кадр - это последовательность OFDMA-символов. Каждый OFDMA-символ включает набор подканалов. Пакеты данных могут передаваться одновременно, на различных OFDMA-подканалах.



Для описания структуры кадра в OFDMA используется понятие слота - минимального ресурса для передачи данных. Слот занимает один подканал и от одного до трех последовательных OFDMA-символов. В нисходящем субкадре длительность слота - один или два символа (в режимах FUSC и PUSC, соответственно - см. далее); в восходящем субкадре длительность слота всегда равна трем OFDMA-символам.

Подканал – это набор несущих частот (как и в OFDM). Распределение несущих по подканалам, равно как и число несущих на один подканал, зависит от направления передачи и метода распределения несущих. Стандарт IEEE 802.16 описывает несколько способов распределения несущих как в нисходящем канале, так и в восходящем. Принципиально они подразделяются на FUSC (full usage of the subchannels) – полное использование подканалов передатчиком БС, и PUSC (partial usage of subchannels) – использование групп подканалов (сегментов), т.е. не всего доступного диапазона. Какие именно подканалы используются в режиме PUSC, однозначно определяют номера сегментов. В методах PUSC и FUSC (и их вариациях) одному субканалу присваиваются несущие, равномерно распределенные по всему доступному физическому каналу.

Нисходящий OFDMA - канал

В нисходящем канале первый символ - это преамбула. Несущие в символах преамбул модулируются посредством BPSK специальным псевдослучайным кодом, зависящим от используемого сегмента (в режиме PUSC) и переменной IDcell, задаваемой на MAC-уровне. В преамбуле модулируется каждая третья несущая всего канала (кроме несущих защитных интервалов и центральной), причем начальный сдвиг [0..2] задается дополнительно. Распознав тип преамбулы, абонентская станция (АС) сразу определяет значение переменной IDcell и режим работы базовой станции (БС).

За преамбулой следуют два символа, передающие заголовок кадра FCH и карту распределения полей нисходящего канала DL-MAP. Заголовок транслируется посредством QPSK со скоростью кодирования 1/2. Он содержит префикс нисходящего канала (DL Frame prefix), в котором указываются используемые сегменты и параметры карты нисходящего канала DL-MAP (длина, используемый метод кодирования и число повторений), транслируемой сразу за заголовком кадра. Также в заголовке используется флаг, установка которого означает изменение в расположении области конкурентного доступа в восходящем субкадре по отношению к предыдущему кадру.

Далее транслируется карта восходящего канала UL-MAP и нисходящие пакеты данных для разных АС.

Режим FUSC означает, что используются весь диапазон физического канала (все возможные несущие). Это 1702 несущие информационные частоты и защитный интервал (173 и 172 несущих вверху и внизу диапазона, соответственно). Центральная частота с индексом 1024 не используется.

В режиме FUSC прежде всего назначаются пилотные частоты. Они подразделяются на фиксированные и переменные. Списки тех и других приведены в стандарте. Термин "переменные пилотные частоты" означает, что в каждом четном OFDMA-символе их индексы соответствуют приведенным в документе IEEE 802.16, в каждом нечетном – увеличиваются на 6 (нумерация OFDMA-символов начинается с 0). Всего предусмотрено 166 пилотных частот, из них 24 – фиксированные. И фиксированные, и переменные пилотные частоты разбиты на два набора, одинаковых по объему. Это разбиение имеет значение только при работе с адаптивными антенными системами в режиме пространственно-временного кодирования (STC).

После определения пилотных частот оставшиеся 1536 несущих предназначены для передачи данных. Они подразделяются на Nsubchannels= 32 подканала по Nsubcarriers= 48 несущих в каждом. На

значение информационных несущих подканалам происходит в соответствии с формулой:

$$\text{subcarrier}(k, s) = N_{\text{subchannels}} n_k + \{P[(s + n_k) \bmod N_{\text{subchannels}}] + \text{IDcell}\} \bmod N_{\text{subchannels}} \quad (1)$$

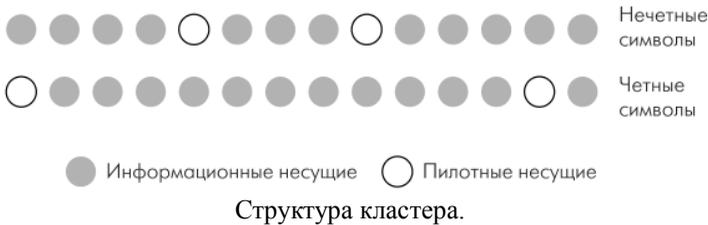
где $\text{subcarrier}(k, s)$ – индекс несущей k в подканале s , $s = [0 \dots N_{\text{subchannels}} - 1]$, $k = [0 \dots N_{\text{subcarriers}} - 1]$, $n_k = (k + 13s) \bmod N_{\text{subcarriers}}$. IDCell – идентификатор отдельного сегмента БС, определяемый на MAC-уровне (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). $P(x)$ означает x -ый элемент последовательности перестановок $\{P\}$, приведенной в стандарте ($P = \{3, 18, 2, 8, 16, 10, 11, 15, 26, 22, 6, 9, 27, 20, 25, 1, 29, 7, 21, 5, 28, 31, 23, 17, 4, 24, 0, 13, 12, 19, 14, 30\}$). Операция $x \bmod k$ – это остаток от x/k .

Очевидно, что перед применением приведенной формулы информационные несущие должны быть перенумерованы так, чтобы их индексы укладывались в диапазон 0–1535 (последнее значение соответствует физическому индексу 1702), т.е. пронумерованы подряд, без учета пилотных частот. Поскольку в четных и нечетных символах расположение пилотных частот различно, распределение информационных несущих для них также нужно вычислять независимо.

В режиме PUSC весь доступный диапазон подразделяется на 60 подканалов. По определению, для работы используется лишь часть из них, но не менее 12. Подканалы группируются в шести сегментах, из них три базовых (сегменты 0, 1 и 2), каждый включает 12 подканалов (0–11, 20–31 и 40–51 подканалы, соответственно). Очевидно, исходя из требования минимума в 12 подканалов, не базовые сегменты могут использоваться лишь совместно с базовыми. Деление на сегменты введено, чтобы БС было проще сообщать, в каких подканалах она работает (достаточно сообщить номера сегментов).

Символ в режиме PUSC формируется по следующему принципу. Всего предусмотрено 2048 частот, из них центральная (с индексом 1024) и защитные (184 нижних и 183 верхних) не используются. Оставшиеся 1680 несущих последовательно разбивают на 120 кластеров, каждый содержит 14 несущих. После этого последовательные физические кластеры перенумеровываются в "логические" в соответствии с формулой $\text{LogicalCluster} = \text{RenumberingSequence} [(\text{PhysicalCluster} + 13 \text{IDcell}) \bmod 120]$, где $\text{RenumberingSequence}(x)$ – соответствующий элемент приведенной в стандарте IEEE 802.16 последовательности перестановок, IDcell – определяемый на MAC - уровне идентификатор

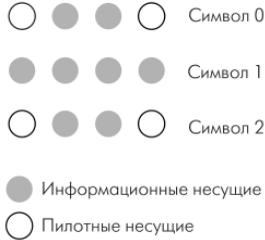
отдельного сегмента БС (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). Эта операция фактически означает перемежение – распределение последовательных групп несущих по всему диапазону физического канала. Далее логические кластеры разбиваются на шесть групп (0–23, 24–39, 40–63, 64–79, 80–103, 104–119), по 24 и 16 кластеров. Большие группы соответствуют большим сегментам (по умолчанию, группа 0 соответствует сегменту 0, группа 2 – сегменту 1, группа 4 – сегменту 2). В каждом кластере определяются пилотные несущие – для четных символов это 5-я и 9-я несущие, для нечетных – 1-я и 13-я.



Таким образом, набору подканалов в пределах сегмента или нескольких сегментов оказывается поставленным в соответствие набор несущих (для 12 подканалов – 336 несущих, из них 24 пилотные и 288 информационных). Информационные несущие в сегменте нумеруются подряд, не учитывая пилотные частоты, после чего в соответствии с формулой (1) каждому подканалу назначаются по 24 несущих. В данном случае в формуле (1) используются значения $N_{\text{subchannels}}=12$ или 8, $N_{\text{subcarriers}}=24$, а также специальные перестановочные последовательности P_{12} и P_8 для сегментов из 12 и 8 каналов, соответственно (приведены в стандарте). Кроме рассмотренных методов распределения несущих, в стандарте предусмотрены и опциональные механизмы – в частности, т.н. optional FUSC, принципиально не отличающийся от рассмотренного.

Восходящий канал

Восходящий субкадр следует непосредственно за нисходящим через интервал TTG. Он содержит пакеты от абонентских станций и интервал для запроса доступа/инициализации. Минимальный размер одного сообщения в восходящем субкадре (слот) – 3 OFDMA символа в одном подканале. Это привело к появлению в документе IEEE 802.16 термина "фрагмент" (мозаичный элемент, tile).



Структура "фрагмента" восходящего канала.

Фрагмент представляет собой совокупность трех символов и четырех несущих, в котором положения пилотных частот жестко определены. Весь частотный диапазон канала (1680 несущих) разбивается на 420 последовательных фрагментов, по 4 несущих в каждом. Предусмотрено 70 подканалов. Каждый из них включает 6 фрагментов – т.е. 24 несущие на символ в одном подканале. Распределение фрагментов по подканалам происходит следующим образом. Все 420 фрагментов разбиваются на 6 групп по 70 фрагментов. В каждый подканал включается по одному фрагменту из каждой группы в соответствии с уравнением:

$$\text{Tile}(n, s) = 70n + \{P[(n + s) \bmod 70] + \text{UL_IDcell}\} \bmod 70,$$

где $\text{Tile}(n, s)$ – фрагмент n подканала s , $n = [0..5]$, $s = [0..69]$. $P(x)$ – перестановочная последовательность, UL_IDcell – переменная в диапазоне 0–69, задаваемая БС на MAC-уровне. В результате каждому подканалу в каждом символе назначается свой набор несущих.

После распределения по подканалам происходит нумерация информационных несущих в каждом слоте – всего их в трех символах 48. Информационные частоты в подканале нумеруются начиная с наименьшей несущей фрагмента с наименьшим индексом – сначала в первом символе, затем во втором и третьем. Затем информационные несущие в каждом слоте перенумеровываются в соответствии с формулой $\text{subcarrier}(n, s) = (n + 13s) \bmod 48$, где s – номер подканала, $n = [0..47]$ (т.е. происходит циклический сдвиг нумерации информационных несущих на 13s в каждом подканале s).

Отметим, что в тексте документа IEEE 802.16 происходит подмена терминов: подканалом в восходящем субкадре авторы текста IEEE 802.16 называют именно слот, информационную структуру размером 24 несущих на 3 символа. И когда в документе написано, что в субканале 48 информационных несущих, следует помнить, что с точки зрения правильной терминологии речь идет не о субканале, а о слоте. Реальных же несущих (т.е. физических частот) в субканале всего 24. Умножая их

на 3 (число OFDMA-символов в слоте) и вычитая 24 пилотные несущие, как раз и получим 48 информационных несущих.

Литература

1. ГОСТ Р.53363-2009. Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. – М. Стандартинформ, 2010.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. –М. :Радио и связь, 2000 -797 с.
3. Василенко Г.О., Милютин Е.Р. Расчет показателей качества и готовности цифровых радиорелейных линий связи. – СПб.: Издательство «Линк», 2007.
4. Волков Л.Н. и др. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учебное пособие. М.: Эко – Трендз, 2005.
5. Fundamentals of WiMax: understanding broadband wireless networking/ Jtffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Ria Muyaamed. 2007, 449 p.
6. Шахнович И. Сети городского масштаба: решения рабочей группы IEEE 802.16 – в жизнь! – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №8.
7. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1.
8. IEEE Std IEEE 802.16?2004 (Revision of IEEE Std IEEE 802.16 2001). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. – IEEE, 1 October 2004.