

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ WiMAX

## Анализ энергетики в канале связи WiMAX

Для систем WiMAX стандарт IEEE 802.16 определяет максимально допустимый уровень битовой ошибки равный  $BER = 10^{-6}$  (процент приема ошибочных бит информации не более 0,005 %). При данном уровне ошибок система WiMAX способна поддерживать с требуемым качеством самый критичный к ошибкам сервис цифровой телефонии (сервис TDM).

Стандарт IEEE 802.16-2004 определяет значение отношения сигнал/шум (SNR) для OFDM сигнала для поддержки модуляции QAM-64 на уровне ошибок не выше  $BER = 10^{-6}$  с учетом коррекции ошибок FEC=3/4, равное 24,4 дБ. Для поддержки остальных типов модуляции с более низкими скоростями требуются соответственно более низкие значения SNR. Более поздний стандарт IEEE 802.16e-2005 регламентирует для фиксированных WiMAX OFDM более низкое значение SNR=21 дБ для QAM-64 с  $BER = 10^{-6}$  и SNR=20 дБ для QAM-64 мобильных сетей WiMAX OFDMA.

Для получения требуемого уровня SNR мощность сигнала на входе приемника системы должна быть выше соответствующего для того или иного типа модуляции порогового уровня чувствительности  $P_{SR}$ .

Пороговый уровень чувствительности приемника для систем OFDM для модуляции, например QAM-64, определяется как [1], дБВт:

$$P_{SR} = N_0 + (P_S/P_N)_{QAM64} + 10 \lg(\Delta F_{OFDM}) + N_f + L_{il} \quad (1)$$

где  $(P_S/P_N)_{QAM64}$  – требуемый уровень отношения сигнал/шум для модуляции QAM-64 равный 21 дБ [1];  $N_0 = 10 \lg(kT_0) = -144$  дБ (Вт/МГц) – спектральная плотность мощности теплового шума приемника (Receiver Noise Floor);  $N_f$  – коэффициент шума приемника (noise figure) равный 8 дБ (IEEE 802.16e-2005).

Значение потерь аппаратной реализации (Implementation loss)  $L_{il}$  равно 5 дБ. Эта величина отражает так называемые потери реализации, учитывающие неидеальность характеристик приемника, ошибки квантования, фазовый шум и др.

$\Delta F_{OFDM}$  – эффективная ширина спектра группового OFDM сигнала. Эта величина пропорциональна количеству используемых поднесущих в спектре группового сигнала. За счет наличия защитного интервала между поднесущими – эффективная ширина спектра OFDM сигнала несколько больше ширины канала  $\Delta F_{ch}$ . Для канала шириной 10 МГц с использованием всех поднесущих  $\Delta F_{OFDM} = 11,52$  МГц ( $10 \lg \Delta F_{OFDM} = 10,61$  дБ).

Подставляя значения в (1), получим требуемый для поддержки модуляции QAM-64 пороговый уровень чувствительности системы WiMAX OFDM стандарта IEEE 802.16e-2005  $P_{SR} = -144 + 30 + 21 + 10 \lg 11,52 + 8 + 5 = -69,4$  дБм.

Таким образом, для поддержки модуляции QAM-64 уровень OFDM сигнала на входе приемника Receive Strength Signal Level (RSSL) должен быть для систем WiMAX не ниже уровня чувствительности -69,4 дБ в полосе ширины канала  $\Delta F_{ch} = 10$  МГц [1].

Для мобильных систем WiMAX OFDMA в соответствии со стандартом IEEE 802.16e-2005 требуемое отношение SNR= 20 дБ для QAM-64 и соответственно  $P_{SR} = -70,4$  дБм.

Следует отметить, что приведенные выше значения чувствительности справедливы для приемника мобильного WiMAX, не использующего технологию разнесенного приема MIMO.

Для расчета радиуса зоны работы базовой станции WiMAX используют уравнение передачи (Link Budget). Данное уравнение связывает уровни мощности на входе приемника  $P_{RSSL_{RX}}$  и выходной мощности передатчика  $P_{Tx}$ , находящихся друг от друга на расстоянии  $R$ , [2,3]  $\partial Бм$  :

$$P_{RSSL_{RX}} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} - L(R), \quad (2)$$

где  $P_{nep}$  – выходная мощность передатчика,  $\partial Бм$ ;  $G_{nep}$  – коэффициент усиления антенны передатчика,  $\partial Б$ ;  $G_{np}$  – коэффициент усиления антенны приемника,  $\partial Б$ ;  $L(R)$  – потери ( $\partial Б$ ) при распространении радиоволн на расстоянии  $R$  км. Потери мощности сигнала в свободном пространстве рассчитываются как,  $L(R) = 20 \lg\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)$ , где  $\lambda$  – длина волны. С учетом использования систем WiMAX в городских условиях потери рассчитываются в соответствии с моделями Окамуры – Хата.

Поскольку система поддерживает связь на модуляции QAM-64, в том случае если уровень сигнала на входе приемника  $P_{RSSL_{RX}}$  будет выше уровня чувствительности  $P_{SR}$ , то согласно выражению (3) для этого необходимо, чтобы

$$P_{RSSL_{RX}} - P_{Fm} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L(R) - P_{Fm} \geq P_{SR} \quad (3)$$

где  $P_{Fm}$  – запас по замираниям fade margin.

В реальных системах вследствие замирания сигнала из-за многолучевого распространения радиоволн обычно требуется, чтобы уровень сигнала RSSL превышал уровень чувствительности сигнала на некоторую величину, называемую запасом по замираниям –  $P_{Fm}$  (fade margin). В системах WiMAX для поддержки модуляции QAM-64 сигнала OFDM достаточно запаса равным 1  $\partial Б$ .

### Влияние интерференции на OFDM канал связи WiMAX

В реальных системах помимо теплового и внутреннего шума приемника присутствует интерференция. Влияние интерференции приводит к деградации уровня чувствительности приемника. Чем выше уровень интерференции, тем на большую величину сигнал на входе приемника RSSL должен превышать уровень чувствительности приемника для поддержки соответствующего типа модуляции.

Экспериментально установлено, что если уровень интерференции (спектральная плотность мощности  $P_I$ ) находится ниже уровня мощности теплового шума на величину в 6  $\partial Б$ , т.е.  $P_I/P_N = -6 \partial Б$ , то эта интерференция не оказывает влияния на приемник системы [5].

В этом случае наиболее приемлемым критерием может выступать порог деградации приемника из-за воздействия помехи TD, который показывает, насколько должен быть увеличен минимальный уровень сигнала на входе приемника при наличии помехи для заданного значения BER. В [5] также показано, что параметр TD,  $\partial Б$ , может быть определен как

$$TD = 10 \lg(1 + 10^{0,1(P_I - P_N)}). \quad (4)$$

Данный критерий является достаточно жестким и дает гарантированный результат [4]. Для защиты фиксированных линий от аддитивной помехи принято, что величина TD не должна превышать 1  $\partial Б$ , т.е. из выражения (5) следует, что

$$P_I = P_N - 6. \quad (5)$$

Таким образом, система WiMAX способна поддерживать используемый вид модуляции с уровнем ошибок  $BER = 10^{-6}$  при уровне мощности сигнала равном чувствительности приемника для данной модуляции и уровне интерференции равном или ниже уровня шума на 6 дБ.

Спектральная плотность теплового шума (мощность шума в полосе 1 МГц) Power Spectral Density (PSD) приемника составляет  $N = 10 \lg(kT_0) + N_f = -136$  дБ. Поэтому уровень интерференции, не оказывающей влияния на систему WiMAX, в канале связи шириной  $\Delta F = 10$  МГц:

$$P_I = -136 + 30 + 10 \lg(10) - 6 = -102 \text{ дБм.}$$

В канале шириной 5 МГц данный уровень интерференции  $P_I = -105$  дБм. Обратим внимание, что пороговый уровень интерференции  $P_I$ , зависит только от ширины канала связи и не зависит от частоты, на которой работает система. При этом пороговый уровень спектральной плотности мощности интерференции, измеряемый в дБм/МГц, не зависит и от ширины канала.

Уровень интерференции можно также оценивать на входе апертуры антенны величиной плотности потока мощности (PSFD-Power Spectral Flux Density) интерференции, определяемой как [1 – 3], дБ:

$$P_{PSFD} = P_I - 10 \lg(\lambda^2) - G + 10 \lg(4\pi), \quad (6)$$

где  $P_I$  – пороговый уровень плотности потока мощности интерференции на входе приемника, дБ (мВт/МГц);  $\lambda$  – длина волны, м;

Пороговый уровень спектральной плотности потока мощности  $P_{PSFD}$  зависит от частоты на которой работает система. Обычно данный показатель используют при расчете допустимых норм излучения на рабочих местах и санитарных зон радиотехнических объектов.

При отсутствии интерференции ( $P_I/P_N = -6$  дБ) и  $P_S = P_{SR}$ ,  $P_S/P_N = 21$  дБ, с учетом потерь реализации  $L_{II} = 0$  дБ для модуляции QAM-64 чувствительность приемника

$$\left( \frac{P_S}{P_I} \right) \geq \frac{P_S}{P_N} - \frac{P_I}{P_N} = \frac{P_{SR}}{P_N} + 6 = \frac{P_S}{P_N} + 6 = 21 + 6 = 27 \text{ дБ.}$$

Тем самым, для высококачественной системы WiMAX при выполнении критерия  $\left( \frac{P_S}{P_I} \right) \geq 27$  дБ и минимально достаточном для поддержки модуляции QAM-64 уровне входного сигнала  $P_{RSSL_{RX}} = P_{SR}$  гарантируется, что интерференция находится ниже уровня теплового шума приемника на величину не менее 6 дБ и независимо от типа интерференции практически не оказывает влияния на работу системы.

При превышении пороговой величины  $P_I/P_N = -6$  дБ интерференция начинает влиять на работу системы. Степень негативного влияния зависит от типа сигнала интерференции (помехи). При оценке чувствительности приемника в качестве шума приемника рассматривается гауссовский или “белый” шум. Реальный сигнал помехи по своей структуре, естественно, может быть другим, и его влияние на работу системы может быть как сильнее, так и слабее влияния белого шума. Например, узкополосная помеха может оказывать незначительное влияние на широкополосный OFDM сигнал. Точная теоретическая оценка влияния различных типов помех на работу приемника системы является достаточно сложной задачей. Относительно точная теоретическая оценка взаимного влияния интерференции возможна для однотипного оборудования. При этом предполагается, что влияние интерференции от однотипного (также

использующего широкополосный OFDM радиосигнал) с анализируемым оборудованием аналогично влиянию белого шума.

Влияние интерференции на систему заключается в снижении (деградации) уровня чувствительности приемника.

Чувствительность системы для модуляции QAM-64 в канале  $\Delta F_{OFDM} = 10$  МГц при  $L_{ш} = 0$  дБ,  $N_f = 8$  согласно выражению (2):  $P_{SR} = -106 + 21 + 10 \lg 10 = -75$  дБм.

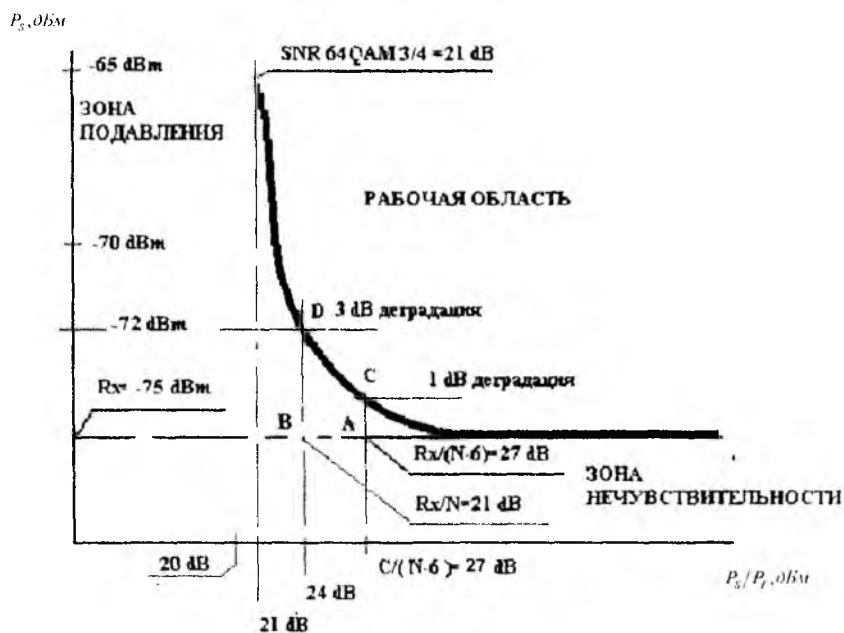
На рис. 1 приведена зависимость между отношением сигнал/интерференция и мощностью сигнала  $P_S$ , требуемой для поддержки модуляции QAM-64 в канале шириной 10 МГц [1, 5].

На рисунке можно выделить три области: зону нечувствительности, зону подавления и рабочую область [1, 5].

Зона нечувствительности охватывает область, где уровень мощности сигнала находится ниже порога чувствительности, и поэтому система не может поддерживать соответствующий тип модуляции с уровнем ошибок  $BER = 10^{-6}$ .

Зона подавления охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и левее кривой зависимости  $P_S$  от  $P_S/P_I$ , где интерференция подавляет работу системы на соответствующей модуляции вследствие недостаточно высокой мощности сигнала  $P_S$ .

Рабочая область охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и правее кривой зависимости  $P_S$  ( $P_S/P_I$ ), где выполняется требуемое отношение  $P_S/P_I$ , и система может работать на соответствующем виде модуляции в условиях интерференции благодаря достаточно высокой мощности сигнала  $P_S$ .



Если интерференция равна или превышает уровень  $P_I/P_N = -6$  дБ (точка А на рисунке), то для работы системы на некотором виде модуляции необходимо, чтобы мощность полезного сигнала превышала деградировавший вследствие воздействия интерференции уровень чувствительности приемника системы для этой модуляции (точка С на рис. 1). Из выражения (4) можно показать, что соотношение между значением спектральной плотности мощности интерференции  $P_I$  и величиной деградации  $TD$  уровня чувствительности имеет вид

$$P_I = 10 \lg \left( 10^{0,1TD} - 1 \right) + N \text{ дБ.} \quad (7)$$

При мощности интерференции  $P_I$  равной мощности шума приемника  $P_N$  и при допущении, что интерференция представляет собой белый шум или, как минимум, интерференция происходит от однотипной системы, деградация чувствительности равна 3 дБ, т.е.  $P_S / (P_N + P_I) = 3 + P_S / P_N$  дБ (точка D на рис. 1) [1, 5]. При мощности интерференции на 10 дБ выше уровня теплового шума приемника ( $P_I / P_N = 10$  дБ) деградация чувствительности равна 9,5 дБ, т.е.  $P_S / (P_N + P_I) = 9,5 + P_S / P_N$  [1, 5].

В пределе, при высоком уровне интерференции ( $P_I / P_N > 10$  дБ) и уровне потерь реализации (implementation loss) близком к нулю, для качественного функционирования системы WiMAX на типе модуляции QAM-64 необходимо  $P_S / P_I \geq P_S / P_N = \text{SNR} = 21$  дБ.

WiMAX является системой с автоматической регулировкой мощности АТРС. На базовых станциях задается максимально возможный уровень входного сигнала RSSL. Для систем WiMAX с шириной канала 5 или 10 МГц данный уровень обычно устанавливается равным от -65 до -68 дБм, превышающем чувствительность приемника для QAM-64 примерно на 5-10 дБ.

Таким образом, система WiMAX может нормально работать на наивысшей модуляции QAM-64 в условиях интерференции при выполнении  $P_S / P_I \geq 21 \dots 27$  дБ в зависимости от уровня входного сигнала на входе приемника системы RSSL, начиная от своего минимального уровня, близкого к чувствительности приемника для QAM-64, и заканчивая максимальным регулируемым АТРС уровнем.

Интерференция по-разному влияет на различные хотя и однотипные системы. Известно, что системы с пониженной чувствительностью не только менее чувствительны к полезному сигналу, но также менее чувствительны (восприимчивы) к интерференции (помехе). В приведенной выше оценке влияния интерференции качество реализации системы WiMAX никак не учитывается. Реальные системы обычно имеют отличные от нуля потери реализации, что уменьшает их чувствительность. Потери реализации (implementation loss) реальной системы WiMAX можно рассчитать как разницу между максимальным теоретически возможным уровнем чувствительности для данной модуляции и ширины канала, и реальной чувствительностью приемника системы WiMAX, приводимой в спецификациях на оборудование.

Теоретический максимально возможный уровень чувствительности, например для модуляции QAM-64 в полосе  $BW=10$  МГц согласно (1) при implementation loss = 0 и noise figure = -8 дБ равен -74,4 дБм. Тем самым, например, потери реализации системы MAXBridge CPE 5.2 производства "Юнидата" составляют 4 дБ (при условии noise figure -8 дБ), что как для абонентского устройства является хорошим показателем [5].

Следует заметить, что максимально возможный теоретический уровень чувствительности системы WiMAX рассчитывается без учета применения технологии разнесенного приема ММО. Использование ММО 2x2 повышает системное усиление энергетики и, соответственно, бюджет канала связи примерно на 5 дБ, но никак не чувствительность приемника системы.

**Список литературы:** 1. IEEE 802.16e-2005 and IEEE 802.16-2004/Cor1-2005. IEEE standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2. 2. Сюваткин В. С. и др. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение. / Под ред. В. В. Крылова. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 368 с. 3. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472с. 4. Бородин С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Условия и расчет. М.: Радио и связь, 1990. 272с. 5. Коляденко Ю.Ю., Москалец Н.В. Критерии для оценки электромагнитной совместимости систем абонентского радиодоступа // Східно-Європейський журнал передових технологій. Харьков, 2005. № 7/2 (15). С. 102-104. 6. Васильев В.Г. Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004 Copyright 2009 © UNIDATA [www.unidata.com.ua](http://www.unidata.com.ua).

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.09.2009