

Днепропетровский государственный технический университет

**О ВЛИЯНИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА OFDM КАНАЛ СВЯЗИ
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 5 ГГЦ**

Введение. В системах передачи данных, основанных на технологии OFDM, эффективная пропускная способность зависит в значительной степени от наличия и уровня шумов. В реальных системах передачи данных в диапазоне 5 ГГц 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 соответствующей модуляции.

Постановка задачи. Исследовать влияние интерференции при заданной чувствительности приёмника на канал связи, использующий мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов.

Результаты работы. В работе [1] экспериментально установлено, что если уровень интерференции I (спектральная плотность мощности) находится ниже уровня теплового шума N на величину в 6 дБ, т.е. $I/N = -6$ дБ, то эта интерференция не оказывает влияния на приемник системы.

Спектральная плотность теплового шума Power Spectral Density (PSD) приемника составляет [1]:

$$N = 10 \log(kT_0) + N_f = -137 \text{ дБ (Вт/МГц)}, \quad (1)$$

где $N_f = -7$ дБ.

Поэтому уровень интерференции $IFLOOR$ при ширине канала (BW) 7 МГц, не оказывающей влияния на систему передачи данных, равен:

$$IFLOOR = -137 + 30 + 10 \log(7) - 6 = -104 \text{ дБм}. \quad (2)$$

В канале шириной 7 МГц получили уровень интерференции, равный -104 дБм. Следует отметить, что пороговый уровень интерференции зависит только от ширины канала связи и не зависит от частоты, на которой работает система. При этом пороговый уровень спектральной плотности мощности интерференции $IPSFDFLOOR$, измеряемый в дБм/МГц, не зависит и от ширины канала. Уровень интерференции можно также оценивать на входе апертуры антенны величиной плотности потока мощности Power Spectral Flux Density интерференции $IPSFDF$, определяемой как $IPSFDFLOOR = IPSDFLOOR - 10 \log(\lambda) - G + 10 \log(4\pi)$, где $IPSFDFLOOR$ – пороговый уровень плотности потока мощности интерференции на входе приемника; λ – длина волны на частоте 5 ГГц; G – коэффициент усиления антенны.

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

Таким образом, система передачи данных, использующая OFDM канал связи в диапазоне частот 5 ГГц, способна поддерживать некоторую модуляцию с уровнем ошибок $B_{ER} = 10^{-6}$ при уровне мощности сигнала, равном чувствительности приемника для данной модуляции, и уровне интерференции, равном или ниже уровня шума на 6 дБ.

При отсутствии интерференции чувствительность приемника на модуляции 64QAM $3/4$ равна [2] $Rx64QAM_{3/4} = N + SNR64QAM_{3/4} + 10\log(BW_{ef}) + Implementation Loss$ при $I/N = -6dB$ и $C = Rx64QAM_{3/4}$, при *Implementation Loss*, равном 0 дБ:

$$C/I64QAM_{3/4} \geq C/N - I/N = Rx \cdot 64QAM_{3/4} / N + 6 = 24,4 + 6 = 30,4\text{дБ}, \quad (3)$$

$$C/I64QAM_{2/3} \geq 21 + 6 = 27 \text{ дБ}, \quad C/I64QAM_{3/4} \geq 16 + 6 = 22 \text{ дБ},$$

$$C/I64QAM_{1/2} \geq 13 + 6 = 19 \text{ дБ}.$$

Тем самым, для системы передачи данных с высококачественным приемником, в котором значение параметра *Implementation Loss* близко к нулю, требуемое отношение мощности сигнала к мощности интерференции, называемое также защитным отношением, имеет вид $C/I \geq C/N + 6$.

Для работы системы передачи данных в условиях интерференции на минимальном для поддержки модуляции 64QAM $3/4$ с $B_{ER} = 10^{-6}$ уровне сигнала необходимо обеспечить $C/N = SNR64QAM_{3/4} = 24,4$ дБ, то есть $C/I \geq 30,4\text{дБ}$.

Тем самым, для системы передачи данных с идеальным приемником, в котором потери реализации равны нулю при выполнении критерия $C/I \geq 30,4\text{дБ}$ и минимально достаточном для поддержки модуляции 64QAM $3/4$ уровне входного сигнала $RSSL = Rx64QAM_{3/4}$, 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 $I/N = -6$ дБ интерференция начинает влиять на работу системы. Степень негативного влияния зависит от типа сигнала интерференции. 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.

Влияние интерференции на систему заключается в снижении уровня чувствительности приемника. Чувствительность системы для модуляции 64QAM $3/4$ в канале $BW = 7$ МГц при *implementation loss* = 0 дБ, $N_f = -7\text{дБ}$ согласно выражению (2) равна:

$$Rx \ 64QAM_{3/4} = -107 + 24,4 + 10\log(8) = -73,57 \text{ дБм};$$

$$Rx \ 64QAM_{2/3} = -107 + 21 + 10\log(8) = -76,97 \text{ дБм};$$

$$Rx \ 16QAM_{3/4} = -107 + 16 + 10\log(8) = -81,97 \text{ дБм};$$

$$Rx \ 16QAM_{1/2} = -107 + 13 + 10\log(8) = -84,97\text{дБм}.$$

При $I/N = -6$ дБ деградация чувствительности приемника, представляющая собой разницу между C/N и $C/(N+I)$, не превышает 1 дБ, то есть при $I/N = -6$ дБ справедливо $C/(N+I) = 1 + C/N$ [3].

На рис.1 приведена зависимость между отношением C/I сигнал/интерференция и мощностью сигнала C , требуемой для поддержки модуляции 64QAM $3/4$ в канале шириной 7 МГц.

Если интерференция равна или превышает уровень $I/N = -6$ дБ (точка А), то для работы системы на некоторой модуляции необходимо, чтобы мощность полезного сигнала превышала деградировавший вследствие воздействия интерференции уровень



Рисунок 1 – Зависимость между C/I и требуемой мощностью сигнала C

чувствительности приемника системы для этой модуляции (точка С). Соотношение между значением спектральной плотности мощности интерференции I и величиной деградации Δ уровня чувствительности имеет вид:

$$I = 10 \log(10 * \Delta / 10^{-1}) + N . \quad (4)$$

При мощности интерференции I , равной уровню шума приемника 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. $C/(N + I) = 3 + C/N$ (точка D). При мощности интерференции на 10 дБ выше уровня теплового шума приемника $I/N = 10$ дБ деградация чувствительности равна 9.5 дБ, т.е. $C/(N + I) = 9.5 + C/N$.

Таким образом, при $I = N$ необходимо, чтобы $C/I \geq C/N + 3$ дБ при потерях $L = 0$. При мощности интерференции выше уровня шума на 10 дБ, т.е. $I/N = 10$ дБ, необходимо, чтобы выполнялось отношение $C/I \geq C/N - 9.5 + 10 = C/N + 0.5$ дБ.

В пределе при высоком уровне интерференции $I/N > 10$ дБ и *implementation loss*, близком к нулю, для работы системы на некотором типе модуляции, требующем соответствующий уровень C/N , необходимо $C/I \geq C/N$.

Таким образом, для работы системы передачи данных, использующей OFDM в условиях высокой интерференции для поддержки модуляции $64QAM_{3/4}$ с $B_{ER} = 10^{-6}$, необходимо обеспечить уровень мощности сигнала, при котором выполняется $C/I \geq C/N = SNR_{64QAM_{3/4}} = 24,4$ дБ.

На рис.1 можно выделить три области: зону нечувствительности, зону подавления и рабочую область. Зона нечувствительности охватывает область, где уровень мощности сигнала находится ниже порога чувствительности, и поэтому система не может поддерживать соответствующий тип модуляции с уровнем ошибок $B_{ER} = 10^{-6}$. Зона подавления охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и левее кривой зависимости C от C/I , где интерференция подавляет работу системы на соответствующей модуляции вследствие недостаточно высокой мощности сигнала C . Рабочая область охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и правее кривой зависимости C от C/I , где выполняется требуемое отношение C/I , и система может работать на соответствующей модуляции в условиях интерференции благодаря достаточно высокой мощности сигнала C .

При использовании систем с автоматической регулировкой мощности (АТРС), на базовых станциях задается максимально возможный уровень входного сигнала (RSSL). Для таких систем данный уровень обычно устанавливается превышающим чувствительность приемника для $64QAM_{3/4}$ примерно на 5-10 дБ.

Таким образом, для работы системы передачи данных на модуляции $64QAM_{3/4}$ с $B_{ER} = 10^{-6}$ в условиях интерференции на максимальном уровне сигнала на входе приемника, превышающем уровень чувствительности на 10 дБ и более, необходимо обеспечить $C/I \geq 24,4$ дБ.

Выполнение критерия $C/I \geq 30,4$ дБ необходимо для системы с идеальным приемником при минимально возможном, находящимся на границе чувствительности для $64QAM_{3/4}$ и $BW = 7$ МГц уровне мощности сигнала $C = Rx = -73,57$ дБм. При этом максимально допустимая мощность интерференции $IMAX$ должна быть на 6 дБ ниже уровня теплового шума N , то есть пороговый уровень интерференции $IFLOOR$, на котором деградация чувствительности идеального приемника не превышает 1 дБ, равен $IFLOOR/N = -6$ дБ.

Для того, чтобы интерференция не оказывала влияния на систему с потерями реализации, равными значению IL , т.е. чувствительность этой системы была деградирована дополнительно не более чем на 1 дБ, необходимо, чтобы значение отношения сигнал/шум превышало значение требуемого для поддержки той или иной модуляции отношения сигнал/шум на величину суммарного понижения чувствительности вследствие потерь реализации и вследствие интерференции $\Delta = IL + 1$ дБ:

$$C/(N+I) = IL + 1 + C/N = \Delta + C/N. \quad (5)$$

Мощность интерференции $IMAX[BW]$ в канале шириной BW , приводящей к суммарному понижению чувствительности на величину Δ , согласно выражению (4) рассчитывается как [4]:

$$IMAX[BW] = \log(10\Delta/10^{-1}) + N[BW], \quad (6)$$

где $IMAX[BW]$ – максимально допустимая мощность интерференции в канале шириной BW ;

$N[BW]$ – мощность теплового шума приемника системы в полосе канала.

Например, при $IL = 2$ дБ уровень чувствительности уже понижен на 2 дБ, и интерференция с уровнем $I = N$ приводит к дополнительной деградации чувствительности на 1 дБ и, следовательно, не оказывает влияния на приемник системы.

Для систем с потерями сигнала на приеме IL , равном 3 дБ, уровень максимально допустимой мощности интерференции равен $IMAX = 1.8 + N$.

При максимальном значении *implementation loss*, равном 5 дБ, выражение(5) имеет вид:

$$C/(N+I) = 6 + C/N. \quad (7)$$

Для выполнения данного равенства мощность интерференции рассчитывается как $IMAX = 10 \log(10^6/10^{-1}) + N = 4,7 + N$.

Деградация чувствительности системы с потерями реализации 5 дБ не превышает 1 дБ при мощности интерференции, равной $4,7 + N$, что для работы системы на модуляции $64QAM_{3/4}$ в канале $BW = 7$ МГц требует отношения сигнал/интерференция $C/I = C/(4/7 + C/N) = 25,7$ дБ.

Таким образом, интерференция, не превышающая более чем на 5 дБ уровень теплового шума системы передачи информации с максимально допустимым уровнем по-

теперь реализации в 5 дБ, приводит к деградации этой системы не более чем на 1 дБ и поэтому практически не влияет на работу системы.

Учитывая, что мощность сигнала на входе приемника реальной системы для поддержки той или иной модуляции должна превышать уровень чувствительности на 3 дБ, то для практического применения можно принять, что на приемник системы с потерями реализации, равными IL , не оказывает влияния интерференция с мощностью меньше или равная пороговому уровню $N + implementation\ loss$. Погрешность такой аппроксимации примерно равна 1 дБ.

Таким образом, вычислив потери реализации как разницу между максимально возможным уровнем чувствительности при значении шума, равном минус 7 дБ, системы на модуляции M в канале шириной BW и реальной чувствительностью системы для этих же условий, можно рассчитать пороговый уровень интерференции $IFLOOR[BW]$ в полосе канала шириной BW как максимально возможный уровень интерференции, не приводящий к деградации чувствительности более 1 дБ.

Например, пороговый уровень интерференции $IFLOOR[BW]$ в виде «белого шума» $I = N + 5$ дБ не оказывает влияния на систему передачи данных с потерями реализации 5 дБ, в канале связи шириной 7 МГц, т.е. $IFLOOR[BW] = -107 + 10 \log(7) + 5 = -93$ дБм.

Собственные шумы приемника реальных систем могут быть ниже величины минус 7 дБ и достигать значения минус 5 и даже минус 4 дБ. При низком уровне собственных шумов приемник системы имеет также более низкое значение теплового шума N и, соответственно, более низкий пороговый уровень интерференции $IFLOOR$.

Пороговый уровень интерференции $IFLOOR = N + IL + 10 \log(BW)$ как максимально допустимый уровень мощности интерференции $IMAX[BW]$, не приводящий к деградации чувствительности больше 1 дБ в полосе шириной BW для модуляции M , приблизительно можно вычислить из выражения (3) следующим образом:

$$IFLOOR[BW] = N[BW] + impl.loss = RxM[BW] - SNRM, \quad (8)$$

где $RxM[BW]$ – чувствительность системы для модуляции M в канале шириной BW ,
 $N[BW]$ – мощность теплового шума приемника в полосе BW .

Тем самым, при расчете максимально допустимого уровня интерференции, не приводящего к деградации чувствительности приемника системы больше чем 1 дБ, величины потерь реализации и собственные шумы не учитываются и могут быть неизвестны.

Таким образом, для определения порогового уровня мощности интерференции $IFLOOR[BW]$, не влияющей на систему передачи информации в полосе ширины канала BW , следует просто найти разницу между уровнем чувствительности для нужной ширины канала (для $64QAM_{3/4}$ $BW = 7$ МГц) и требуемым для модуляции $64QAM_{3/4}$ значением $SNR_{64QAM_{3/4}}$, равном 24,4 дБ. Для $BW = 7$ МГц и $Rx_{64QAM_{3/4}} = -68,57$ дБм пороговый уровень интерференции $IFLOOR$ равен максимальной мощности интерференции $IFLOOR$ в канале, приводящей к деградации реальной чувствительности системы на 1 дБ:

$$IFLOOR[BW] = 7,64QAM_{3/4} = Rx_{64QAM_{3/4}} - SNR_{64QAM_{3/4}} = -68,57 - 24,4 = -92,97 \text{ дБм.}$$

Тем самым получаем простое правило определения порогового уровня интерференции $IFLOOR$ для системы с потерями реализации, заключающееся в вычислении разности значения чувствительности системы RxM для некоторой модуляции M и требуемого для поддержки этой же модуляции значения сигнал/шум $SNRM$ [3]:

$$IFLOOR = RxM - SNRM .$$

Таким образом, пороговый уровень интерференции $IFLOOR[BW]$ для модуляции M в канале шириной BW , на котором деградация чувствительности не превышает 1 дБ, для систем с потерями реализации 5 Дб по стандарту IEEE 802.16 составляет величину $IFLOOR = RxM - SNRM$ [5].

Пороговый уровень интерференции $IFLOOR[BW]$ для модуляции M в канале шириной BW , на котором деградация чувствительности не превышает 1 дБ, для систем с потерями реализации, близкими к нулю, составляет величину $NBW - 6$.

Для системы с потерями реализации, близкими к нулю, и величиной *noise figure* -7 дБ пороговый уровень интерференции $IFLOOR$ для модуляции $64QAM_{3/4}$ и канала шириной $BW = 7$ МГц составляет:

$$IFLOOR = NBW - 6 = -97,87 - 6 = 103,87 \text{ дБм.}$$

Для идеальной системы передачи данных с потерями реализации, близкими к нулю, и величиной *noise figure* -4 дБ пороговый уровень интерференции $IFLOOR$ для модуляции $64QAM_{3/4}$ и канала шириной $BW = 7$ МГц составляет:

$$IFLOOR = NBW - 6 = N + 10 \log(7) - 7 = -107,87 \text{ дБм,}$$

где $N = 10 \log(kT_0) + N_f = -140$ дБВт – спектральная плотность мощности теплового шума приемника при $N_f = -4$ дБ;

kT_0 – закон равномерного распределения.

Таким образом, максимально допустимый уровень интерференции, не оказывающий влияния на систему передачи данных в диапазоне 5 ГГц, весьма существенно зависит от качественных параметров ее приемника.

Выводы. Для поддержки необходимой модуляции энергетические параметры канала должны соответствовать этой модуляции, поэтому в работе рассчитаны необходимая чувствительность приемника при отсутствии интерференции, а также уровни интерференции, в заданной полосе пропускания влияющие на радиоканал. По результатам расчетов выяснено, что максимально допустимый уровень интерференции, не оказывающий влияния на систему передачи данных, весьма существенно зависит от качественных параметров ее приемника. Чем более качественная система, тем больше она подвержена интерференции и, в то же время, тем больше имеет возможностей для предотвращения ее негативного влияния.

ЛИТЕРАТУРА

1. ECC Report 100, Compatibility studies in the band 3400-3600 MHz between BWA systems and other services. Bern, February 2007.
2. Васильев В.Г. Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа стандарта IEEE 802.16-2004 / Васильев В.Г. – М.: «UNIDATA», 2009. – 91с.
3. Рашич А.В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие / Рашич А.В. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 179с.
4. WiMAX – технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение / В.С.Сюваткин, В.И.Есипенко, И.П.Ковалев, В.Г.Сухоробров. – СПб.: Изд-во БХВ Петербург, 2005. – 356с.
5. Богданов Е.Ю. Влияние интерференции OFDM каналы связи сети широкополосного доступа / Богданов Е.Ю., Рыбаков В.К. / Самарский Государственный Технический Университет. – 2008. – 179с.

Поступила в редколлегию 13.02.2017.