

УДК 621.391

А.К. Сундучков, Е.А. Остролицкая, Е.А. Фадеева, К.С. Сундучков, д-р техн. наук

## Межканальная интерференция и метод оценки ее влияния на прием сигнала

Предметом исследования в данной работе является межканальная интерференция. Цель работы – создание методики оценки влияния межканальной интерференции на прием высокоскоростных многопозиционных сигналов и проверка ее на конкретных примерах. Предложенный метод исследования состоит в разработке аналитических моделей и в расчете влияния межканальных помех на прием сигнала. Показано, что при постоянной скорости передачи данных увеличение числа каналов с 24 до 96 при прочих равных условиях может уменьшить отношение помехи к сигналу ( $\xi\%$ ) с 3% до 0,8%, в то время как увеличение скорости передачи данных при прочих равных условиях приводит к увеличению  $\xi\%$  с 0,8% до 4,5%, например, при количестве каналов равном 96. Наиболее ощутимое снижение влияния помех с 3% до 1,4% при  $W=196$ , наблюдается при увеличении скорости передачи данных до 48 Мбит/сек (64КМ) и увеличении числа  $K=6$  при увеличении тактового интервала и защитного интервала одновременно.

Inter-channel interference is a subject of investigation in this article. Article object is method creation for estimation inter-channel interference effect and its verification using specific examples. Research method consists of analytic model development and inter-channel interference impact for signal receiving calculation. Revealed that changing channel number from 24 to 96 with fixed transmit data rate can decrease noise to signal ration ( $\xi\%$ ) from 3% to 0.8% and at the same time increasing transmit data rate with all other parameters fixed leads to increasing  $\xi\%$  from 0.8% up-to 4.5 % (e.g. 96 channels). Most significant noise reduction from 3% to 1.4%,  $W=196$ , occurs with increasing transmit data rate up to 48 Mbit/sec (QAM64) and increasing  $K=6$  at the expense of increasing timing interval and guard interval simultaneously.

### Введение

Следующее поколение высокоскоростных беспроводных широкополосных технологий связи 4-го поколения означает для пользователя прежде всего непрерывный и постоянный доступ к информации, развлечениям, общению, уда-

ленному наблюдению и контролю - в любое время, в любом месте. В 4G пользователи получают в свое распоряжение еще большее количество приложений, услуг и контента, доступных непрерывно и на любом устройстве.

4G - это преодоление большинства ограничений фиксированного широкополосного доступа, с одной стороны, и мобильной связи - с другой. Прежде всего это многократный рост пропускной способности для мобильного абонента, увеличение производительности абонента за счет предоставления мультимедийных услуг и проведение широкополосной «последней мили» до самого абонента, а не только до его дома или рабочего места.

Сети 4-го поколения для потребителя - это просто та скорость, которая позволит полноценно реализовать те услуги, которые оказалось проблематичным организовать в сетях 3G (например, мобильное телевидение). Что касается новых услуг, то ждать их нужно не от 4G, а от операторов и сервис-провайдеров, которые должны наполнить «трубку».

Абонент сети 4G может получить весь спектр услуг от одной компании, при этом он ограничен только охватом сети, нет привязки к точным адресам и локациям, где могут быть доступны услуги.

Сети будущего будут предоставлять следующие услуги: цифровую телефонию, высокоскоростной доступ в Интернет, передачу данных, сервис мобильного видео, видео по запросу, телевидение высокой четкости, мобильную коммерцию, банкинг, мобильный офис, развлечения и учебу, мобильный поиск, мобильное видеонаблюдение, контроль транспорта, удаленную медицинскую диагностику и др.

Первоочередными задачами для рынка и тем более для абонентов являются обеспечение их повышенным качеством популярных сервисов за счет внедрения новых технологий. Качество предоставляемых услуг абонентам зависит от многих причин. Не последнее место среди них занимает межканальная интерференция, которая порождает межканальные помехи. Сегодня в литературе нет методики расчета межканальных помех при передаче высокоскоростных многопозиционных сигналов и влияния этих помех на качество приема. В связи с чем изучение межканальной интерференции и разработка метода

оценки ее влияния на прием многопозиционных сигналов является актуальным. Предметом исследований в данной работе является межканальная интерференция. Целью данной работы есть создание методики оценки ее влияния на прием высокоскоростных многопозиционных сигналов и проверка ее на конкретных примерах.

Сегодня оценка уровня межканальной интерференции Adjacent Channel Interference ACI в системах WiMAX производится с помощью показателей Adjacent Channel Rejection (ACR) и Net Filter Discrimination (NFD). В широкополосных системах 3G для оценки ACI используются аналогичные показатели Adjacent Channel Selectivity (ACS) и Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR). В табл. 1 представлены значения параметра ACR для первого и второго соседнего канала по стандарту IEEE 802.16-2004.

**Таблица 1. Значения показателей ACR по соседним каналам в системе WiMAX 802.16-2004**

Подавление помех	Модуляция	Минимальная величина подавления соседнего канала при изменении отношения C/I на	
		3 дБ	1 дБ
1-го соседнего канала	16QAM3/4	-11	-7
	64QAM3/4	-4	0
2-го соседнего канала	16QAM3/4	-30	-26
	64QAM3/4	-23	-19

Показатель ACR определяется как отношение мощности  $C$  сигнала в рабочем частотном канале к мощности сигнала, представляющего собой в данном случае интерференцию  $I$  в первом  $j=1$  или втором  $j=2$  соседнем канале на уровне деградации чувствительности 1 дБ для  $BER=10^{-6}$ . Физический смысл  $C/I_1 = 0$  дБ табл. 1 означает, что сигналы одинаковой мощности на входе соседних каналов приемника WiMAX не мешают работе друг друга (уровень взаимной интерференции приводит к деградации чувствительности приемника на соседнем канале не более чем на 1 дБ).

Коэффициент подавления в рабочем канале интерференции со стороны соседнего канала оценивается показателем Net Filter Discrimination  $NFD_j$ , определяемый как разница между отношением  $C/I_0$  в рабочем канале и отношения  $C/I_j$  ( $ACR_j$ ) на соседнем канале на уровне 1 дБ деградации чувствительности для  $BER=10^{-6}$ .

$$NFD_j = C/I_0 - C/I_j \quad (1)$$

Предотвращение взаимной интерференции на рабочих и соседних частотных каналах базовых

станций и абонентских терминалов WiMAX осуществляется путем частотно-территориального разнеса (ЧТР) оборудования. Стандарт IEEE 802.16-2004 не дает методики расчета значений параметров выражения (1) [1, 2].

### Межканальная интерференция

Борьба с побочными излучениями на гармонике сигнала РЭС, попадающими в рабочую полосу системы WiMAX, осуществляется путем установки радиочастотных фильтров на передатчике мешающей РЭС. Как правило, источниками такого излучения являются мощные узкополосные РЭС, и в рабочую полосу системы WiMAX попадает не гармоника несущей мешающей РЭС, а гармоника ее внеполосного излучения. При точном попадании гармоники несущей сигнала мощной РЭС в рабочую полосу системы WiMAX частотный фильтр становится бесполезным. Для снижения негативного влияния такой помехи помимо установки частотного фильтра на мешающей РЭС помогает уменьшение ее мощности, территориальный разнос антенны системы WiMAX от антенн мешающей РЭС и отстройка по частоте рабочего канала системы WiMAX.

Мощные побочные излучения от РЭС могут проникать на вход системы WiMAX вне полосы пропускания его приемника. Типичным примером является интерференция со стороны радиолокационных станций или узкополосных радиорелейных станций, мощные радиосигналы которых или их гармоник могут при определенных условиях проникать на вход приемника WiMAX в любом частотном диапазоне. Результатом воздействия такой интерференции является нарушение работы системы автоматической регулировки усиления (смещение рабочей точки усилителя), что приводит к перегрузке входных каскадов приемного усилителя и деградации уровня мощности полезного сигнала на входе демодулятора системы WiMAX. Тем самым, такая помеха мешает не процессу выделения полезного сигнала в демодуляторе приемника, а подавляет сам приемник системы. Признаком воздействия мощной помехи данного типа (как в рабочей полосе частот, так и вне полосы пропускания приемника), является сильно заниженный, неадекватный бюджету линка уровень входного сигнала Receive Strength Signal Level (RSSL), не позволяющий системе WiMAX нормально функционировать. Эффективным способом борьбы именно с таким типом помех является применение полосовых фильтров. Базовые станции WiMAX имеют, как правило, хорошие фильтры как в приемном так и передающем тракте, что снижает влияние внеполосной интерференции. При этом абонентские устройства, как

правило, не имеют таких дорогостоящих фильтров и поэтому могут быть подвержены воздействию внеполосных помех.

Влияние внутреннего излучения РЭС, создающего наводки в антенно-фидерном тракте системы и на ее интерфейсах, очень часто встречается при размещении оборудования базовых станций WiMAX вблизи антенн других мощных (несколько десятков Ватт и даже килоВатт) РЭС. Обычно территориальный разнос оборудования в несколько метров и выполнение требований не размещать оборудование WiMAX в створе антенн других РЭС, решает данную проблему.

РЭС, работающие на одних и тех же частотах вблизи друг друга, очевидно, создают взаимную интерференцию, и тем самым, могут мешать нормальной работе друг друга. Очевиден и наиболее действенный способ борьбы с такой интерференцией - использование для работы РЭС разных частот (частотных каналов), что уменьшает мощность интерференции на рабочих частотных каналах. Второй действенный способ снижения негативного влияния взаимной интерференции - территориальный разнос РЭС, снижающий уровень интерференции вследствие потерь мощности радиосигнала при его распространении. Расчет требуемого для обеспечения нормальной работы РЭС территориального разноса проводится также в процессе оценки электромагнитной совместимости (ЭМС). Тем самым оценка ЭМС заключается в расчете норм частотно-территориального разноса (ЧТР) оборудования. Третий действенный способ - использование достаточных защитных частотных интервалов между соседними частотными каналами. Защитные полосы шириной в один или два частотных канала значительно снижает взаимную интерференцию и обеспечивают ЭМС. В системах WiMAX с канальной шириной 5,7 и 10 МГц в условиях ограниченности частотного ресурса применение защитных полос зачастую невозможно.

Различные причины межканальной интерференции приводят к замираниям. Существуют следующие способы борьбы с замираниями: разнесенный прием, увеличение защитного интервала, рандомизация, работа с расширением спектра (скачки по частоте и CDMA), адаптивные фильтры в приемнике, помехоустойчивое канальное кодирование (блочное и сверточное кодирование, а также перемежение), применение технологии MIMO.

### Метод оценки влияния межканальных помех на прием сигналов

С точки зрения повышенных требований к скорости и помехоустойчивости, а также использования эффективных способов модуляции и оптимального алгоритма обработки сигналов, роль модемов в системах связи чрезвычайно выросла. Модемы являются своеобразными конверторами между цифровыми и аналоговыми технологиями.

Наибольшее влияние на помехоустойчивость модемов в канале обычной телефонной линии обуславливает флуктуационный шум и линейные искажения, которые проявляются в виде межканальных (МКП) и межсимвольных (МСП) переходных помех.

Наиболее эффективным способом избежать данных помех является использование многочастотных (многоканальных) систем передачи данных с перекрывающимися по спектру ортогональными сигналами и относительной фазовой модуляцией (ОФМ). В этих системах в качестве разделителей канальных сигналов и вычислителей проекции посылок используются корреляторы. Такие системы часто называют многоканальными модемами с фазоразностной модуляцией. В таких системах уплотнение сигнала осуществляется с помощью ортогональных несущих.

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) - алгоритм ортогонального мультиплексирования с частотным разделением. Данный алгоритм предусматривает использование ряда ортогональных поднесущих. Ортогональными являются сигналы, если выполняется условие ортогональности на некотором интервале времени  $T$ :

$$\int_0^T S_i(t) \times S_j(t) dt = \begin{cases} = 0, & \text{если } i \neq j \\ \neq 0, & \text{если } i = j \end{cases}, \quad (2)$$

где  $S_i(t)$ ,  $S_j(t)$  - линейные сигналы с постоянными амплитудами и начальными фазами.

Если задача состоит в выборе параметров модема таким образом, чтобы величина МКП была минимальной, то исходными данными для расчета будут:  $\Delta f$  - полоса пропускания канала;  $V$  - скорость передачи сообщения;  $T$  - длительность обработки сигнала в демодуляторе;  $W$  - количество подканалов (число поднесущих частот). При этом в многоканальном модеме скорость передачи сообщения определяется по формуле:

$$V = \frac{k \cdot W}{\tau}, \quad (3)$$

где  $k$  - это кратность модуляции,  $\tau$  - длительность тактового интервала.

На вход модулятора поступают  $W$  линейных сигнала  $S_i(t)$ . На выходе модулятора на  $L$ -ом тактовом интервале групповой сигнал можно представить в виде суммы линейных сигналов:

$$S_{ep}(t) = \sum_{i=1}^W S_i(t) \quad (4)$$

На приемном конце при обработке для разделения подканалов применяется корреляционная обработка.

Если приемник принимает и выделяет информацию в «своем» (информационном)  $j$ -ом канале, то все остальные  $(W - 1)$  каналы наводят в информационном  $j$ -ом канале помехи в виде шума. Обозначим  $S_{ep,j}(t)$  - групповой сигнал из которого удалено одно слагаемое, характеризующее  $j$ -ый канал. Тогда возникающая шумовая помеха для сигнала  $j$ -го канала будет наводиться всеми остальными каналами [3]. Синусная и косинусная составляющие шумовой помехи для  $j$ -го канала будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^T S_{ep,j}(t) \cdot \sin(\omega_i t) dt &= Z_{s,j,i} \\ \int_0^T S_{ep,j}(t) \cdot \cos(\omega_i t) dt &= Z_{c,j,i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где :

$$Z_{s,j,i} = \sum_{i=1}^{W-1} s_{,j,i}$$

$$Z_{c,j,i} = \sum_{i=1}^{W-1} c_{,j,i}$$

Чем меньше проникает наведенный шум  $N$  в приемный канал, тем выше отношение сигнал/шум ( $C/N$ ) и тем более эффективна сеть.

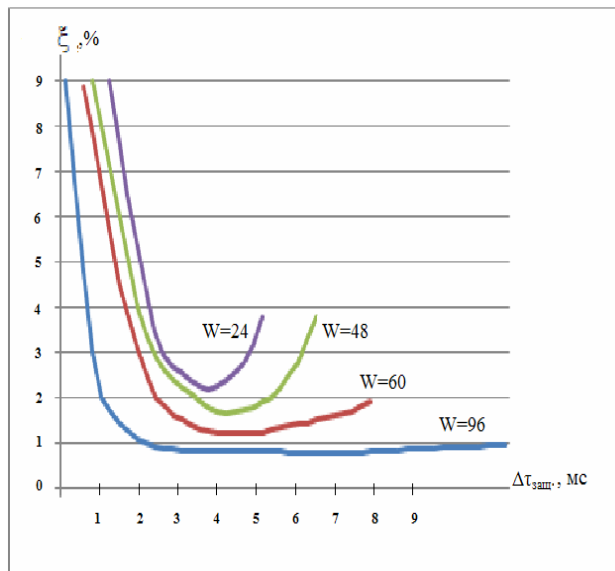
$$y_5 = \frac{C}{N} = \sqrt{\frac{S_{s,i}^2 + S_{c,i}^2}{\sum_{i=1}^{W-1} [Z_{s,j,i}^2 + Z_{c,j,i}^2]}} \quad (6)$$

**Примеры расчета зависимости межканальных помех от параметров сигнала**

Воспользовавшись выражением для расчета влияния МКП,

$$\xi = \frac{100\%}{C/N} \quad (7)$$

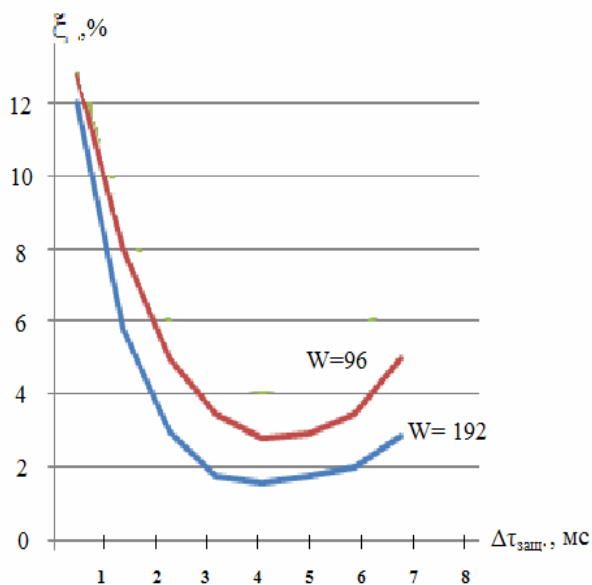
выполним расчет при следующих условиях:  $\Delta f = 3100$  Гц;  $V = 9,6$  кбит/с;  $T = 8,33$  мс;  $W = 24-96$  подканалов;  $k = 4$ ;  $\tau = 10$  мс. Результат расчета показан на рис.1.



**Рис. 1. Зависимость  $\xi$  от  $\Delta \tau_{заш}$  для указанного количества подканалов  $W$  при  $K=4, V = 9,6$  кбит/с**

Приведенный график показывает, что уменьшить величину МКП можно с помощью выбора величины защитного интервала при фиксированном значении  $W$ .

Если увеличить скорость передачи информации за счет увеличения количества подканалов при неизменной величине тактового интервала, то помехи растут. На рис. 2 приведены результаты расчета для количества подканалов равных 96 и 192 и при  $\tau=10$  мс.



**Рис. 2. Зависимость  $\xi$  от  $\Delta \tau_{заш}$  при количестве подканалов  $W=96$  и  $192$  при  $\tau=10$  мс**

При использовании фазоразностной модуляции высоких порядков можно обеспечить инвариантность (нечувствительность) параметров сигнала к рассогласованию («дрожанию» фаз). Но при увеличении числа кодируемых бит выше

3 (8 позиций поворота фаз) приводит к резкому снижению помехоустойчивости. Поэтому на высоких скоростях применяются комбинированные АФМ. Здесь помимо изменения фазы сигнала используется манипуляция его амплитуды, что позволяет увеличить число кодируемых бит. Рассмотрим случай, когда для модуляции поднесущих группового сигнала используется 64-уровневая квадратурно-амплитудная модуляция (64 QAM). Данная модуляция применяется на скоростях 48 и 54 Мбит/с. Примем следующие исходные данные  $K=6$ ,  $V=48$  Мбит/с. Результаты расчета представлены ниже на рис.3.

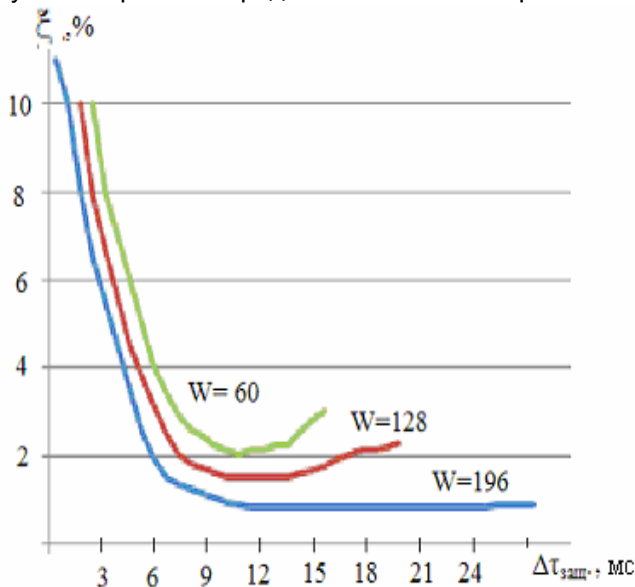


Рис. 3. Зависимость  $\xi$  от  $\Delta\tau_{\text{защ}}$  при  $K=4$ ,  $V=48$  Мбит/с

При неизменной скорости передачи цифрового потока, увеличивая количество подканалов, необходимо увеличить величину тактового интервала  $\tau$ . Чем больше  $\tau$ , тем больше можно увеличить величину защитного интервала  $\Delta\tau_{\text{защ}}$ , так как  $T = \tau - \Delta\tau_{\text{защ}}$ . Увеличивая  $\Delta\tau_{\text{защ}}$ , уменьшается влияние неравномерности АЧХ на сигнал подканала.

В случае увеличения количества подканалов увеличивается число опорных частот, что усложняет работу Микропроцессора (увеличивается количество операций, которые выполняются во время модуляции/демодуляции; за один и тот же интервал интегрирования необходимо обработать большее число частот).

## Выводы

Коэффициент подавления в рабочем канале интерференции со стороны соседнего канала оценивается показателем Net Filter Discrimination  $NFD_j$ , определяемый как разница между отношением  $C/I_0$  в рабочем канале и отношения

$C/I_j$  ( $ACR_j$ ) на соседнем канале на уровне 1 дБ деградации чувствительности для  $BER=10^{-6}$ .

$$NFD_j = C/I_0 - C/I_j$$

Предотвращение взаимной интерференции на рабочих и соседних частотных каналах базовых станций и абонентских терминалов WiMAX осуществляется путем частотно-территориального разнеса (ЧТР) оборудования. Стандарт IEEE 802.16-2004 не дает методики расчета значений параметров представленного выше выражения.

В работе исследованы причины и методы борьбы с межканальной интерференцией при передаче высокоскоростных многопозиционных сигналов. Разработаны модели и метод расчета этих помех и их влияния на качество приема. Получено выражение для расчета отношения сигнал/шум при наличии межканальных помех:

$$\frac{C}{N} = \frac{S_{s,j}^2 + S_{c,j}^2}{\sum_{i=1}^{W-1} [Z_{s,j,i}^2 + Z_{c,j,i}^2]}$$

Предложенный метод исследования состоит в разработке аналитических моделей и в расчете влияния межканальных помех на прием сигнала. Показано, что при постоянной скорости передачи данных увеличение числа каналов с 24 до 96 при прочих равных условиях может уменьшить отношение помехи к сигналу ( $\xi$  %) с 3 % до 0,8 %, в то время как увеличение скорости передачи данных при прочих равных условиях приводит к увеличению  $\xi$  % с 0,8 % до 4,5 %, например, при количестве каналов равном 96. Наиболее ощутимое снижение влияния помех с 3 % до 1,4 % при  $W=196$ , наблюдается при увеличении скорости передачи данных до 48 МГбит/сек (64QAM) и увеличении числа  $K=6$  при увеличении тактового интервала и защитного интервала одновременно.

## Литература

1. Васильев В.Г. Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004// ЮНИДАТА – 2009.
2. 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.
3. Беркман Л.Н., Щербина І.С., Чумак О.І., Рудик Л.В. Багатоканальні модеми: Монографія / Під наук. ред. С.Є. Захаренка. – К.: Зв'язок, 2006. – 149 с.