

А.К. Сундучков<sup>1</sup>, Е.А. Фадеева<sup>2</sup>, А.В. Яцук<sup>3</sup>, К.С. Сундучков<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>GlobalLogic

<sup>2</sup>Государственный университет информационно-коммуникационных технологий

<sup>3</sup>Институт телекоммуникационных систем НТУУ “КПИ”

## СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ, МЕЖКАНАЛЬНЫЕ И МЕЖСИМВОЛЬНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

© Сундучков А.К., Фадеева Е.А., Яцук А.В., Сундучков К.С., 2010

Розглянуто шляхи підвищення швидкості передачі сигналів, причини й методи боротьби з міжканальними та міжсимвольними спотвореннями, зумовленими перевідбиттям сигналу й обмеженою величиною розв'язки між каналами. Поставлено завдання дослідження поляризаційної розв'язки в системі передачі даних з чотирма “поляризаційними стовбурами”, що дає змогу збільшити швидкість передачі в чотири рази.

In this paper we consider ways to improve the speed of signal transmission, causes and methods of dealing with interchannel and intersymbol distortions caused by multipath signal and the limited size of decoupling between the channels. The aim is to study the polarization isolation in the system data with fore “polarizing trunks”, can speed up the transfer of fore times.

**Постановка проблемы и ее связь с важными научными заданиями.** Системы WiMAX, как системы следующего поколения высокоскоростных беспроводных коммуникаций, в настоящее время широко применяются при разработке перспективных средств широкополосного доступа из-за их большой информационной емкости, больших размеров зоны покрытия, которые обеспечиваются этими системами, и характерной для них развитой системы управления качеством (QoS). В таких системах могут быть применены все виды современных технологий: технология OFDM, адаптивные типы модуляции и кодирования, адаптированное для решения конкретной задачи построение антенной системы, пространственно-временное кодирование и даже возможность работы в режиме MIMO. Все эти средства направлены на борьбу с замираниями, наблюдающимися при многолучевом режиме распространения, и на улучшение эксплуатационных параметров системы. Можно утверждать, что представленная система WiMAX способна обеспечить передачу данных на расстояние до 50 км со скоростью до 75 Мбит/с на канал как в прямом, так и в обратном направлениях [1].

Предотвращение негативного влияния интерференции (помех) на работу каналов радиосвязи является серьезной задачей для всех операторов, как работающих в совместно используемых частотах, так и владеющих эксклюзивными полосами частот. В любой, даже отданной в эксклюзивное использование полосе частот, всегда присутствует интерференция, негативно влияющая на прием сигналов.

Повышение как скорости передачи, так и скорости передвижения мобильного терминала только усугубляет нежелательные эффекты при приеме сигналов. Потому сегодня актуально исследовать возможность повышения скорости передачи и скорости движения с обеспечением соответствующего приема.

Даже при обеспечении процесса хэндовера качество приема сигнала зависит еще от многих других причин: как от энергетических параметров, связанных с типом модуляции, затуханием сигнала в среде беспроводного доступа, ограничением на излучаемую мощность базовыми станциями, так и от снижения уровня ортогональности поднесущих сигналов в OFDM из-за переотражений, эффекта Доплера, применения технологии MIMO; побочные излучения

радиоэлектронных систем (РЭС), вызывающие интерференцию на рабочих (co-channel) или смежных (adjacent channel) каналах и др. Такими РЭС могут быть базовые станции, абонентские терминалы, оборудование магистральных каналов (backhaul) своей же сети, а также РЭС других операторов, работающих в смежном диапазоне частот или в той же совместно используемой (разделяемой, общей) полосе частот.

Все причины приводят к замираниям. Существуют такие 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 свёрточное кодирование, а также перемежение), применение технологии MIMO.

В работе рассмотрены и проанализированы механизмы образования межканальной и межсимвольной интерференции и методы борьбы с ними.

Широкополосные OFDM радиосигналы WiMAX систем достаточно устойчивы к воздействию узкополосных индустриальных помех. Системы WiMAX оптимизированы для эффективной борьбы с переотражениями радиосигнала в городских условиях и не приспособлены к работе в помещениях внутри зданий. Подобный “офисный” тип переотражений может возникнуть и при работе системы WiMAX в городских условиях. Это происходит при попадании в створ антенн базовых станций WiMAX близко расположенных препятствий, например, различных построек, антенн. Радиосигналы базовой станции WiMAX, отражаясь от таких близко расположенных препятствий, попадают вместе с полезным радиосигналом в приемники удаленных абонентских терминалов, вызывая замирания сигнала. Для предотвращения такой интерференции необходимо исключить размещение вблизи базовой станции WiMAX крупногабаритных предметов, попадающих в зоны диаграмм направленности ее антенн.

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. Установка фильтра в приемном тракте системы WiMAX эффекта не дает. Кроме того, при точном попадании гармоники несущей сигнала мощной РЭС в рабочую полосу системы WiMAX частотный фильтр становится бесполезным. Снижению негативного влияния такой помехи, помимо установки частотного фильтра на мешающей РЭС, способствует уменьшение ее мощности, территориальный разнос антенны системы WiMAX подальше 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 гармоники 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. Поэтому такая помеха мешает не процессу выделения полезного сигнала в демодуляторе приемника, а подавляет сам приемник системы. Признаком воздействия мощной помехи этого 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 в 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 эту проблему.

РЭС, работающие на одних и тех же частотах вблизи друг от 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 снижают 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.

**Межканальная интерференция.** Наличие взаимной интерференции при работе на совпадающих частотных каналах (co-channel) не вызывает вопросов, а присутствие взаимной интерференции на соседних (adjacent channel) и на непересекающихся по частоте каналах – далеко не очевидно.

Природа возникновения взаимной интерференции между системами, работающими на соседних каналах (adjacent channel interference - ACI), на самом деле также проста. Дело в том, что когда мы говорим, что ширина канала связи равна, например,  $BW=7$  МГц, то это означает только то, что максимальный уровень мощности сигнала сохраняет свое значение в пределах  $BW/2 = \pm 3,5$  МГц отстройки от центральной частоты канала.

На рис. 1 представлены требования согласно спецификациям ETSI-EN3 02326-2 (EqC-PET=0, EqC-EMO=6) к спектральной маске (зависимость нормированной относительно максимума 0 dBm спектральной плотности мощности радиосигнала от частотной отстройки относительно центральной частоты канала) OFDM сигнала шириной  $BW = 7$  МГц системы WiMAX стандарта IEEE 802.16.

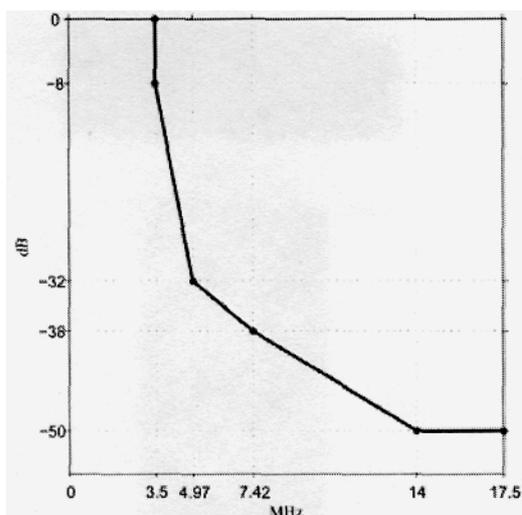


Рис. 1. Спектральная маска WiMAX с шириной канала 7 МГц

Уровень мощности сигнала при отстройках больше  $BW/2$  (на рисунке это 3,5 МГц) может быть весьма значительным, что создает интерференцию соседнему каналу связи при отсутствии защитного интервала.

В системах WiMAX разнос центральных частот каналов обычно равен ширине канала BW.

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 таблице представлены значения параметра ACR для первого и второго соседнего канала по стандарту IEEE 802.16-2004.

**Значения показателей ACR по соседним каналам  
в системе WIMAX 802.16-2004**

Capability	Modulation	Minimum performance for 3 dB degradation C/I, dB	Minimum performance for 1 dB degradation C/I, dB
1 adjacent channel rejection	16QAM3/4	-11	-7
	64QAM3/4	-4	0
2 adjacent channel rejection	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 этом случае интерференцию  $I$  в первом  $j=1$  или втором  $j=2$  соседнем канале на уровне деградации чувствительности 1 dB для  $BER=10^{-6}$ . Физический смысл  $C/I_1 \leq 0$  dB (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 dB).

Коэффициент подавления в рабочем канале интерференции со стороны соседнего канала оценивается показателем Net Filter Discrimination  $NFD_j$ , определяемым как разница между отношением  $C/I_0$  в рабочем канале и отношением  $C/I_j$  (ACR<sub>j</sub>) на соседнем канале на уровне 1 dB 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.

**Межсимвольная интерференция.** Одним из ключевых преимуществ технологии WiMAX, обеспечиваемых применением OFDM сигнала, является возможность эффективной работы канала связи в условиях отсутствия прямой видимости Non Line Of Sight (NLOS) между базовой станцией Base Station (BS) и абонентским терминалом Subscriber Station (SS).

Многолучевое распространение приводит к так называемым замираниям ("федингам" fade). Для борьбы с замираниями используются различные методы. Так, в системах Wi-Fi (сигнал с одной несущей) используется метод разнесенного приема (antenna diversity. В GSM и CDMA системах (с одной несущей) применяются сложные эквалайзеры и фильтры. Наиболее эффективным способом борьбы с замираниями является использование OFDM сигнала с множеством поднесущих.

Временные задержки импульсов поднесущих и их сложение с различными фазами на приемной стороне приводит к снижению (замираниям) в течение некоторого времени амплитуды поднесущих (burst time fading), которые в результате ортогональных преобразований трансформируются (рис. 2) в замирания (burst frequency fading) поднесущих в некоторой полосе частотного спектра (рис. 3). Искажения поднесущих, получаемые вследствие замираний такого типа, получили название межсимвольной интерференции Inter-Symbol Interference (ISI).

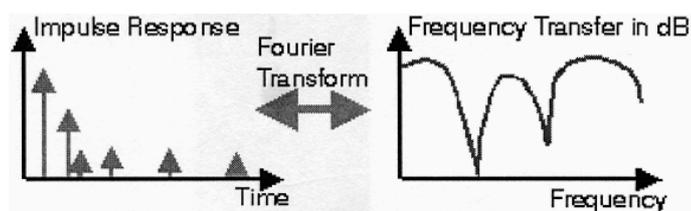


Рис. 2. Преобразование временных замираний в частотные в приёмнике OFDM сигнала

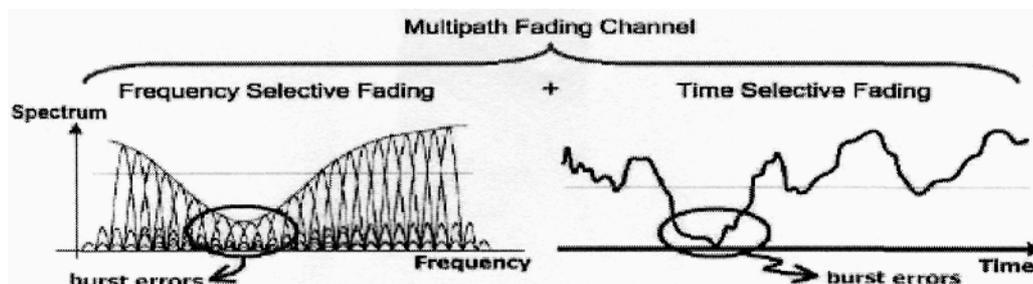


Рис. 3. Частотные и временные замирания сигналов

Эффективная селекция переотраженных сигналов (эхоподавление), поступающих с некоторой временной задержкой, может быть выполнена при наличии достаточного защитного временного интервала между моментами прихода импульсов сигналов. Длительность такого интервала должна превышать максимальное (или среднее) время задержки времени (delay spread) прихода переотраженных сигналов. Для условий офиса в локальных беспроводных сетях типичное время задержки составляет 20–200 нс, в системах BWA в условиях городской застройки – 5–10 микросекунд, 0.2 мс в сельской местности.

Защитный временной интервал в системах OFDM WiMAX стандарта IEEE 802.16 регулируется величиной Cyclic Prefix (CP), определяющей отношение между длительностью импульса поднесущей и защитным интервалом. Максимальное возможное значение  $CP=1/4$  – максимально возможная величина защитного интервала. Минимальный  $CP=1/32$  – соответствует минимально возможному защитному интервалу, обеспечивающему эхоподавление при отсутствии множественных препятствий между передатчиком и приемником на расстояниях в несколько километров.

Достаточно длительный защитный интервал в системах WiMAX может быть установлен благодаря большой длительности импульсов OFDM поднесущих стандарта IEEE 802.16, в сотни и тысячи раз большей, нежели в системах стандарта IEEE 802.11a/g. Большая длительность имеет место вследствие более низкой скорости следования импульсов поднесущих, что, в свою очередь, получено вследствие разделения исходной высокоскоростной последовательности на большее количество (256 и более) параллельных поднесущих OFDM WiMAX по сравнению с 64 поднесущими OFDM Wi-Fi. Тем самым, 64 поднесущие сигнала OFDM Wi-Fi представляют собой очень короткие импульсы, следующие с высокой скоростью, что не позволяет увеличивать их длительность и период их следования до требуемой величины для отличных от офиса применений.

Как бы эффективно не работала система подавления межсимвольной интерференции, ошибки замираний все равно возникают. Для устранения этих и других ошибок применяется метод коррекции FEC (forward error correction), основанный на использовании избыточных кодов. Однако коррекция может быть применена для устранения только одиночных ошибок. В случае замираний обычно имеет место групповая ошибка, когда одновременно искажаются нескольких последовательно следующих друг за другом импульсов (burst) поднесущих (рис. 3). Для решения этой проблемы применяется метод устранения ошибок interleaving, когда в передатчике поднесущие OFDM перемешиваются в случайной порядке (рандомизация), а в приемнике их исходная последовательность восстанавливается. При этом групповые искажения на приемной стороне разносятся по частотному спектру поднесущих, приобретая одиночный характер, и могут быть устранены

применением корректирующих кодов FEC. Метод interleaving тем более эффективен, чем большее количество поднесущих включено в процесс рандомизации. Тем самым OFDM сигнал WiMAX вследствие большого количества поднесущих гораздо более устойчив к ошибкам вообще и ошибкам замирания сигналов в частности, по сравнению с OFDM системами Wi-Fi и preWiMAX.

**Поляризационное разделение сигналов.** В работе [3] рассмотрены пути повышения эффективности систем цифровой передачи данных, предложен метод увеличения скорости передачи данных за счет увеличения числа стволов, работающих на тех же частотах за счет использования, кроме традиционных методов разделения сигналов, разделения сигналов по параметру линейной поляризации электромагнитных волн. Там же введено понятие “поляризованные каналы”. Для исключения неоднозначности в определении каналов передачи данных с многопозиционной модуляцией в ортогональных поднесущих (OFDM) здесь уточняется понятие “поляризованные стволы”. Из рис. 5 следует, что если использовать два фиксированных значения линейной поляризации с разницей углов поляризации в  $90^\circ$ , то такая система передачи данных претендует на увеличение скорости передачи в четыре раза.

В настоящее время в системах спутниковой связи и вещания практикуется многократное использование имеющейся полосы частот [4]. Это осуществляется несколькими способами: пространственный разнос лучей и развязка по поляризации. Определяющим фактором при повторном использовании частот космического аппарата в одной зоне обслуживания на поверхности Земли является уровень поляризационной развязки сигналов в “смежных” стволах ретранслятора, т.е. в стволах с одинаковым частотным диапазоном [5].

В России спутниковая система связи и вещания с поляризационным уплотнением развернута на базе космического аппарата “Ямал-100”. В системе используется круговая поляризация. Вследствие различного рода конструктивных особенностей выполнения антенн вместо идеальной круговой поляризации всегда имеет место эллиптическая, которая может быть представлена как суперпозиция идеальной круговой и линейной [6]. Поляризационная развязка определяется взаимным положением линейной составляющей векторов напряженности поля. “Требуемое ослабление мешающего сигнала относительно полезного на входе демодулятора зависит от вида модуляции и кодирования и для часто используемых в настоящее время сигналов в спутниковых сетях находится в пределах от 11,0 до 17,5 дБ”, как утверждают авторы работы [5]. Из приведенного рисунка 2 следует, что при угле между осями эллипсов в  $22,5^\circ$  поляризационная развязка составляет не менее 15 дБ. Это дает основание считать, что предложенная четырехствольная схема будет удовлетворительно работать.

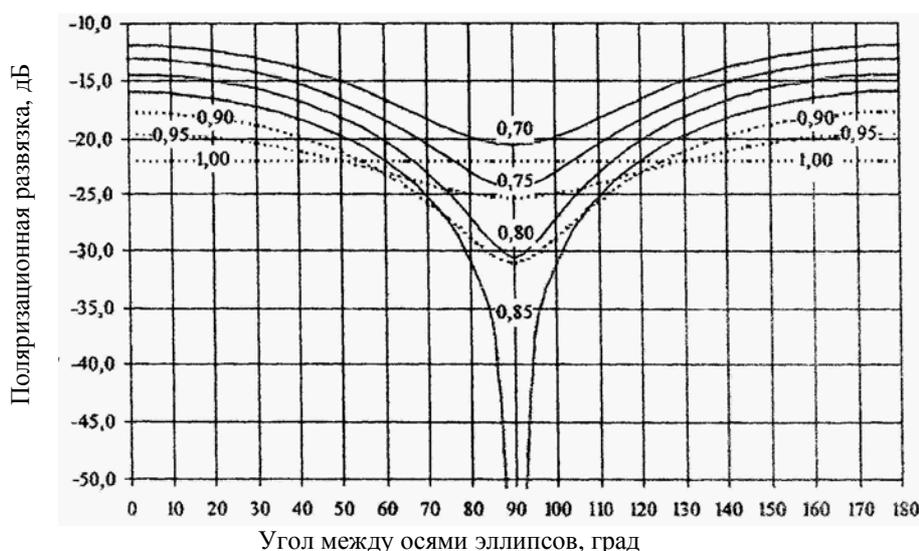


Рис. 4. Зависимость уровня поляризационной развязки от угла между эллипсами при  $K_{зс}=0,85$ .  
 $K_{зс}$  – параметр

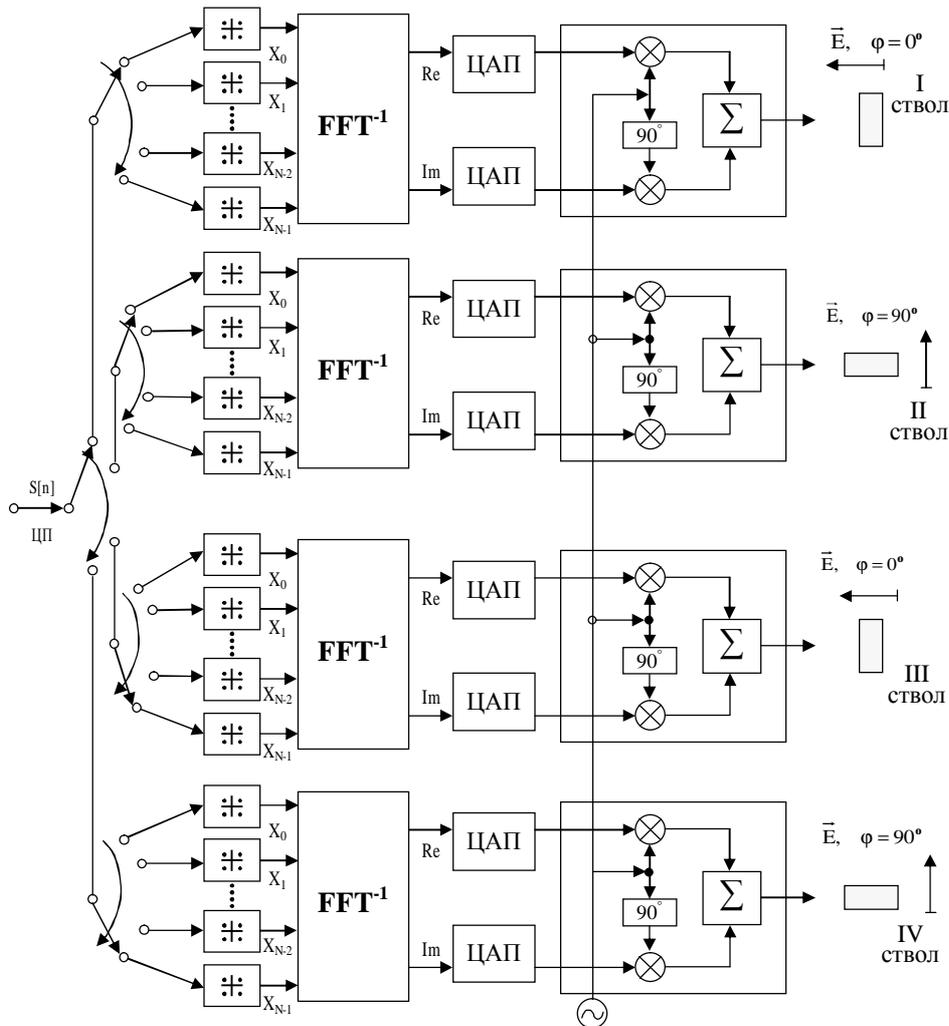


Рис. 5. Система передачи данных с четырьмя поляризационными стволами MIMO. Здесь  $\vec{E}$  и  $\varphi^0$  обозначают относительную ориентацию вектора  $\vec{E}$  электромагнитной волны в стволах на выходе излучающих антенн

**Заключение.** 1. Приведен аналитический обзор преимуществ и недостатков технологии систем WiMAX по сравнению с узкополосными системами типа GSM и др. Перечислены и проанализированы причины, приводящие к образованию межканальной и межсимвольной интерференции и методы борьбы с ними.

2. Наличие взаимной интерференции на соседних (adjacent channel) и на непересекающихся по частоте каналах обусловлен недостаточной “развязкой” каналов при отсутствии защитного частотного интервала. В системах WiMAX с каналной шириной 5÷7 МГц и более в условиях ограниченности частотного ресурса применение защитных частотных полос зачастую невозможно.

3. Одним из ключевых преимуществ технологии WiMAX является возможность эффективной работы канала связи в условиях отсутствия прямой видимости. Однако многолучевое распространение приводит к так называемым замираниям. Наиболее эффективным способом борьбы с замираниями являются временные задержки импульсов поднесущих OFDM. Достаточно длительный временной защитный интервал в системах WiMAX может быть установлен благодаря большой длительности импульсов поднесущих OFDM. Кроме того, дополнительно применяются методы рандомизации и коррекции FEC.

4. Увеличение скорости передачи данных за счет увеличения количества стволов, работающих на тех же частотах и имеющих разделение сигналов по параметру линейной поляризации электромагнитных волн (в рассматриваемом примере четырехствольная система

обеспечивает развязку сигналов в соседних стволах не менее чем на 15 дБ) позволит повысить эффективность системы в несколько раз.

1. Выговский Р.В. Использование многопозиционных сигналов с АФМ в технологии WiMax. *Моделювання та інформаційні технології* // 36. наук. праць. – 2008. – Вип. 49. – С. 159–165.
2. Васильев В.Г. Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004 // ЮНИДАТА – 2009.
3. Сундучков А.К. Новый метод повышения пропускной способности сети // Труды 19-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. (CriMiCo-09), с. 255, том 1.
4. *Satellite Communications Fixed - satellite service* // International Radio Consultative Commitee, International Telecommunication Union. - Geneva, 1988.
5. Бобков В., Ефимов М., Киселев А. и др. Поляризация развязка: взгляд эксперта. Оценка требований по кросс-поляризационным характеристикам антенн земных станций спутниковой связи // *Connect*. – 2004. – № 2. – С. 85–89.
6. Петрович Н.Т., Камнев Е.Ф., Каблукова М.В. Космическая радиосвязь // Под ред. Н.Т. Петровича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1979.

УДК 621.395

А.Г. Ложковський, В.Ю. Гордієнко

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

## ФУНКЦІЯ РОЗПОДІЛУ СТАНІВ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ЙМОВІРНІСТЬ ВІДМОВ ДЛЯ МОДЕЛІ ТИПУ НМ/Д/М

© Ложковський А.Г., Гордієнко В.Ю., 2010

**Запропоновано апроксимацію усіченим нормальним законом імовірнісної функції розподілу станів повнодоступної системи з втратами, яка обслуговує мультисервісний трафік з постійною тривалістю обслуговування вимог. На основі цієї апроксимації запропонована формула розрахунку ймовірності втрати вимоги.**

**For the full-accessible lossy system with multi-services traffic flow and constant holding time the approximating of probability distribution function by the truncated Gauss law is offered. On the basis of the given approximating the account formula of loss probability of the request is offered.**

**Вступ.** Для проектування систем розподілу інформації необхідно знати окремі ймовірності функції розподілу станів системи. Для пуассонівського потоку ця задача розв'язується відомим розподілом Ерланга, для примітивного – розподілом Енгсета [1]. Однак для реальних потоків мультисервісних мереж зв'язку адекватних методів розрахунку не існує. Метою цієї роботи є обґрунтування використання усіченого нормального закону для апроксимації імовірнісної функції розподілу станів повнодоступної системи з втратами, яка обслуговує гіперекспонентний потік вимог з постійною їхньою тривалістю.

Фундаментом досліджень систем розподілу інформації (СРІ) є їх типізована математична модель. Для повного опису СРІ необхідно вказати ймовірнісні процеси, що описують вхідний потік вимог, структуру системи та дисципліну обслуговування. Очевидно, що оцінка якості обслуговування (*QoS*) або пропускної здатності СРІ потребує врахування всіх цих елементів її моделі. Найскладнішим є врахування математичної моделі вхідного потоку вимог. Незалежно від