

**АНАЛИЗ НИСХОДЯЩИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ LONG TIME EVOLUTION  
НА БАЗЕ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СИСТЕМ****Введение**

В основе современных цифровых радиосистем передачи информации (ЦРСПИ) лежит технология (Long Time Evolution (LTE) и ее улучшенная версия LTE-Advanced, которая строится на базе систем с многими входами и многими выходами MIMO (Multiple Input Multiple Output). LTE и LTE-Advanced является решением по совершенствованию потребностей увеличения скорости передачи данных, улучшению спектральной эффективности, а также увеличению качества передаваемой информации и снижению вероятности битовых ошибок (ВБО) в канале связи.

Важным параметром ЦРСПИ является надежность. Для определения надежности канала связи используют такой показатель, как ВБО. Для каналов связи LTE на базе MIMO систем ВБО рассмотрена в работах [1, 2], где показано, как ведет себя ВБО при изменении показателя отношение сигнал-шум (ОСШ). В работе [1] рассмотрены одиночные каналы связи и MIMO конфигурации 2x1 и 4x2 для ОСШ до 50 дБ. В работе [2] рассмотрены каналы LTE на базе многопользовательских систем с различной модуляцией. В этих работах широко освещен вопрос надежности LTE сетей, но не учтена ширина полосы пропускания и изменение ВБО.

Цель работы – исследование нисходящих каналов связи на базе технологии LTE-Advanced и компьютерное моделирование ВБО от изменения ширины полосы пропускания при различной конфигурации передающей и приемной стороны MIMO системы.

**Технология LTE**

Архитектура сети LTE разработана так, чтобы обеспечить поддержку пакетного трафика с минимальными задержками доставки пакетов и высокими показателями качества обслуживания. В основу принципов построения ЦРСПИ LTE положено два аспекта: физическая реализация отдельных сетевых блоков и формирование функциональных связей между ними. Функционирование LTE может осуществляться в частотных каналах различной ширины. Сигналы нисходящего или восходящего направления могут занимать полосы от 1,4 до 20 МГц в зависимости от количества активных ресурсных блоков. Границы частотного диапазона, занимаемого сигналом, всегда определяются симметрично относительно несущей частоты [3].

Система LTE-Advanced – это улучшенная версия системы LTE. Она строится на базе технологии MIMO, суть которой состоит в параллельной передаче данных по нескольким подканалам.

В LTE-Advanced используются следующие режимы работы с MIMO [3]:

- однопользовательский режим (SU-MIMO – Single User MIMO) с пространственным предварительным кодированием;
- многопользовательский режим (MU-MIMO – Multi User MIMO) с пространственным предварительным кодированием;
- адаптивное лучеформирование.

В спецификациях LTE-Advanced определены режимы работы MIMO с пространственным разнесением или пространственным кодированием, адаптивным формированием диаграммы направленности, реализуемой на БС, которая дает возможность увеличить дальность связи и помехоустойчивость системы. Система LTE-Advanced полностью строится на основе пакетной коммутации каналов, а режим двойной передачи дает возможность одновременно поддерживать голосовую связь и передачу данных. Скорость передачи данных по спецификации 3GPP LTE в теории достигает 326,4 Мбит/с в нисходящем канале и 172,8 Мбит/с – на

восходящем канале. В системе LTE-Advanced удалось добиться сокращения времени задержки отклика, т.е. времени между отправкой запроса и получением данных. Рабочая ширина полосы в системе LTE-Advanced гибкая и может варьировать от 1,25 до 20 МГц, при том, что сеть сможет функционировать в широком диапазоне частот от 450 МГц до 2,6 ГГц [3].

Предварительное кодирование в LTE-Advanced основано на использовании заранее сформированных таблиц наилучших весовых коэффициентов для максимального согласования передаваемого сигнала с пространственным нисходящим каналом между передатчиком и приемником. Вид матрицы предварительного кодирования задается с учетом индикатора матрицы предварительного кодирования, который также известен АТ. В приемнике после оценивания канала выбирается соответствующая матрица предварительного кодирования и ее номер посылается на передатчик (рис. 1) [3].

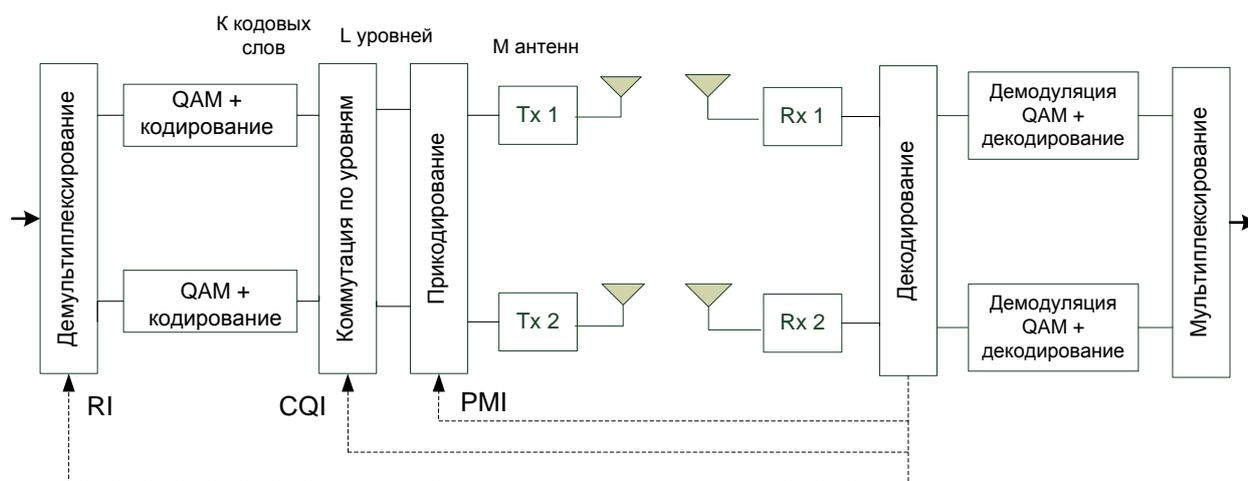


Рис. 1

Для полноценной работы ЦРСПИ, приемник передает на передатчик следующую сигнализацию:

- индикатор матрицы предварительного кодирования PMI (Precoding Matrix Indicator);
- индикатор ранга RI (Rank Indicator);
- индикатор качества канала CQI (Channel Quality Indicator).

Индикатор ранга RI показывает количество пространственных уровней, которые могут обеспечить текущий канал. БС определяет ранг передачи  $M$ , используя переданный от приемника индикатор ранга RI, а также такие факторы, как модель трафика, доступная мощность передатчика и т.д. Индикатор качества канала CQI указывает, какую комбинацию схемы модуляции и скорости кодирования в канале следует использовать БС для того, чтобы вероятность ошибок в приемнике не превышала 10 %.

Многопользовательский режим MU-MIMO позволяет назначить множественные пространственные уровни разным пользователям в одном частотно-временном ресурсе при передаче по нисходящим и восходящим каналам. В нисходящих каналах БС может назначать более одного пользователя для передачи в одном частотно-временном ресурсе, что позволяет создавать многопользовательскую конфигурацию MU-MIMO. БС назначает несколько приемников, настроенных в одном частотно-временном ресурсе, используя различные матрицы предварительного кодирования первого ранга для двух и четырех передающих АЭ [4]. Следует отметить, что каждый приемник получает информацию только о своей матрице PMI. Каждый приемник из полученной управляющей сигнализации декодирует данные, используя общий опорный сигнал совместно с информацией о предварительном кодировании. Приемник формирует PMI и CQI и передает их на БС при отсутствии сведений о других работаю-

щих в зоне обслуживания приемниках. Несоответствие между передаваемым и действующим CQI может быть вызвано интерференцией от других приемников [5].

Применение систем OFDMA с пространственным разнесением антенн помогает значительно уменьшать негативные эффекты многолучевости, интерференции и затенения при распространении радиоволн. Также снижаются замирания в каналах. Как следует из принципа работы с разнесенными антеннами, каждая антенна будет иметь независимые характеристики по замираниям. Каждая антенна будет иметь свою пространственную избирательность или свою поляризацию, или комбинацию своих свойств. Для оптимальной работы процесс выбора и сбора данных должен быть завершен в пределах времени когерентности. Время когерентности – это такой период времени, в течение которого распространяющаяся волна сохраняет практически постоянным фазовое соотношение как во времени, так и в пространстве. После истечения времени когерентности антенны должны быть перенастроены, чтобы соответствовать ожидаемым изменениям в канале и позволить выбрать оптимальную антенну [6].

Усиление принимаемого сигнала достигается за счет двух факторов:

- усиление за счет разноса;
- усиление за счет решетки антенны.

Одновременно с увеличением уровня сигнала, принимаемого в многоантенной системе, уменьшается и глубина замираний, так как один и тот же сигнал, принятый на несколько антенн, можно при обработке выровнять по уровню и произвести оптимальное сложение принятых на антенну сигналов по времени.

Другой фактор — усиление за счет решетки антенн, суммирование антенного усиления, связанного с увеличением направленности луча в многоантенной системе.

Таким образом, многообразие схем MIMO в LTE-Advanced и возможность выбора схемы, адаптированной к условиям распространения радиоволн гарантируют достижение высокой спектральной эффективности.

### **Средство для моделирования систем LTE на базе MIMO**

Адекватное и полное моделирование систем LTE и LTE-Advanced на данный момент – важная задача. Для моделирования данных систем был разработан математический аппарат LTE Toolbox в программе MatLAB 2014 года. Данный аппарат имеет функции и инструменты для проектирования и симуляции систем связи, соответствующих стандартам LTE и LTE-Advanced. Набор инструментов ускоряет разработку алгоритмов и устройств физического уровня стандарта LTE, предоставляет эталонную среду для верификации проектов и их проверки на соответствие стандарту, а также функции для генерации тестовых сигналов.

Немаловажным параметром для оценки канала связи является ВБО. С помощью математического аппарата LTE Toolbox были посчитаны зависимости ВБО от ОСШ и от ширины полосы пропускания канала связи.

### **Результаты моделирования**

Было проведено компьютерное моделирование ЦРСПИ нисходящих каналов LTE-Advanced на базе технологии MIMO с конфигурацией АЭ на передающей и приемной стороне 2x2 и 4x4. Моделирование проводилось без учета замираний в канале, использовалась QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) модуляция, значение ширины полосы пропускания принимали 10 МГц, ОСШ 10 дБ. Результатом моделирования являются импульсные характеристики для конфигурации 2x2, представленные на рис. 2, а для конфигурации 4x4 – рис. 3. На рис. 2 и 3 приняты следующие обозначения: Transmitted – импульсная характеристика передаваемого сигнала, Received – импульсная характеристика принимаемого сигнала.

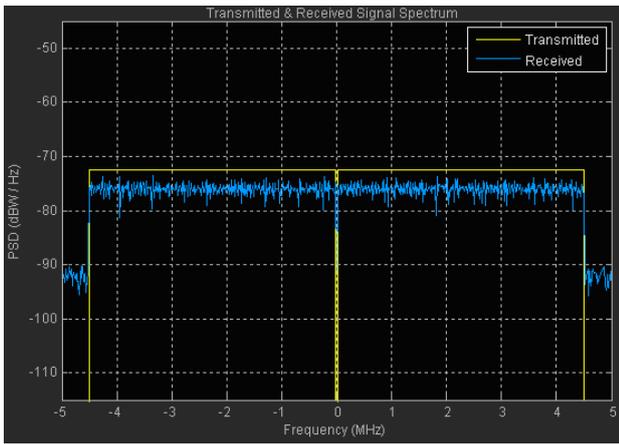


Рис. 2

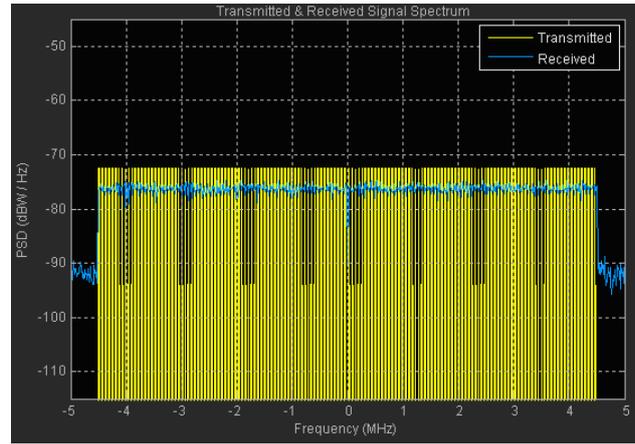


Рис. 3

Была построена зависимость ВБО от ОСШ ЦРСПИ для нисходящего канала LTE-Advanced без учета замираний, при ширине полосы пропускания 3 МГц и QPSK модуляции. Конфигурации передающей и приемной части были взяты 2x2 и 4x4.

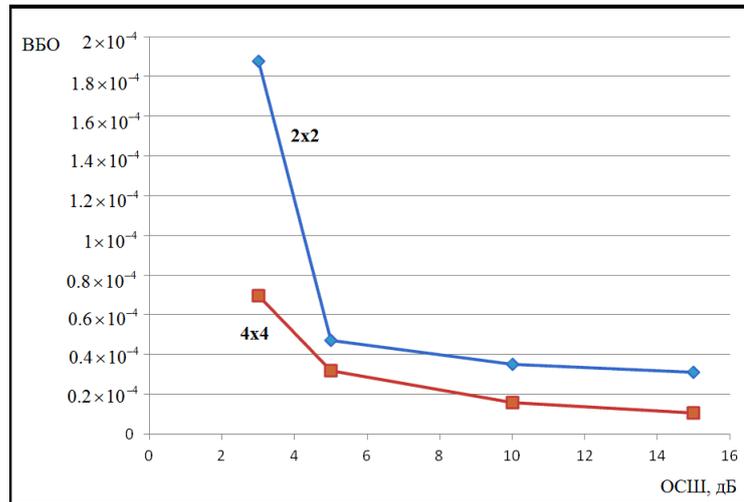


Рис. 4

Как видно из рис. 4, при ОСШ в 5 дБ ВБО для конфигурации 2x2 составляет  $0,5 \times 10^{-4}$ , а при конфигурации АЭ 4x4 –  $0,3 \times 10^{-4}$ . При ОСШ 10 дБ ВБО составляет  $0,4 \times 10^{-4}$  при конфигурации 2x2 и  $0,2 \times 10^{-4}$  при конфигурации 4x4.

На рис. 5 представлена зависимость ВБО от изменения ширины полосы пропускания для нисходящего канала LTE-Advanced без учета замираний, при конфигурациях АЭ 2x2 и 4x2. При построении использовалась QPSK модуляция, ОСШ было принято 10 дБ.

Как видно из рис. 5, при ширине полосы пропускания в 10 МГц ВБО канала связи, где на БС четыре АЭ, а на приемной два –  $0,4 \times 10^{-4}$ , а при четырех АЭ на приемной стороне ВБО составляет  $0,2 \times 10^{-4}$ . При ширине полосы пропускания в 20 МГц в канале, где на передающей стороне четыре АЭ, а на приемной два, ВБО составляет  $0,5 \times 10^{-4}$ , а при четырех АЭ на приемной стороне ВБО достигает  $0,2 \times 10^{-4}$ .

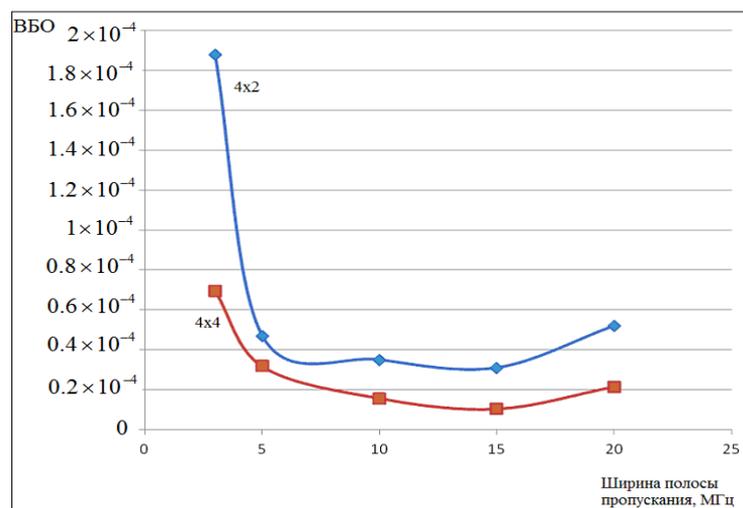


Рис. 5

## Выводы

К последним достижениям в области пространственной обработки сигналов можно отнести технологию ЦРСПИ, где применяются многоэлементные антенны как на передающей, так и на приемной стороне – ММО. Технология ММО позволяет уменьшить вероятность ошибок без снижения скорости передачи в условиях замираний вследствие многолучевого распространения радиоволн. Важно подчеркнуть, что именно технология ММО удачно подошла под активно развиваемую технологию мультиплексирования посредством ортогональных поднесущих или ортогонального частотного мультиплексирования. Эффективность технологии ММО можно продемонстрировать на примере системы LTE-Release 8.

Необходимо отметить, что при увеличении ширины полосы пропускания в каналах LTE и LTE-Advanced ВБО снижается, до значения в 15 МГц, после чего начинает расти.

Адаптивное формирование диаграммы направленности антенны позволяет увеличить площади покрытия, повысить качество сигнала и увеличить эффективность подавления помех. Все это приводит к увеличению ПС системы. Принцип работы такой системы состоит в когерентном объединении передаваемых и принимаемых антенной лучей для формирования М излучающих элементов от каждого приемопередатчика.

Таким образом, применение технологии ММО в современных системах LTE-Advanced видится эффективным средством дальнейшего повышения ПС и помехозащищенности.

**Список литературы:** 1. Jemmali A., Conan J., Torabi M. Bit Error Rate Analysis of MIMO Schemes in LTE Systems / A. Jemmali, J. Conan, M. Torabi. The Ninth International Conference on Wireless and Mobile Communications. – 2013. P. 190 – 194. 2. Zhou B., Jiang L., Zhao S., He C. BER analysis of TDD downlink multiuser MIMO systems with imperfect channel state information / B. Zhou, L. Jiang, S. Zhao, C. He / EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2011. P. 104-113. 3. Taoka H., Nagata S., Takeda K., Kakishima Y., She X., Kusume K. MIMO and CoMP in LTE-Advanced / H. Taoka, S. Nagata, K. Takeda, Y. Kakishima, X. She, K. Kusume. Tehnology Raports. – 2012. – P. 20 – 28. 4. Лухограй, В.Г., Вовченко, В.С., Нух, Т.Н. Пропускная способность случайных каналов ММО // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С. 182 – 189. 5. Goldsmith A., Jafar S.A., Jindal N., Vishwanath S. Fundamental Capacity of MIMO Channels. Stanford: Stanford University, 2002. – p. 5 – 27. 6. Lykhograi V.G., Vovchenko V.S., Nasif N.T. 2012, Capacity analysis of deterministic and stochastic multiple input multiple output channel // European Science and Technology. «Bildungszentrum Rodnik e. V.». Ed. Wiesbaden, January. pp. 261 – 264.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.11.2014