

УДК 621.396.67

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ОТНОСИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE В УСЛОВИЯХ ПРИГОРОДА

Шарапова Е.В., Дейнеко Д.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье приведена аналитическая оценка потерь в каналах связи сетей стандарта LTE и LTE-Advanced на базе технологии MIMO в условиях сельской местности. Показано, как изменяются уровни помех в каналах связи при различной скорости движения абонента в пригороде и различном числе антенных элементов на передатчике и приемнике.

**Ключевые слова:** MIMO, LTE, LTE-Advanced, потери, лучевая модель радиоканала.

**Постановка проблемы.** В последние годы значительно увеличивается количество пользователей и объемы передаваемой информации. Поэтому важную роль в каналах связи сейчас играет пропускная способность (ПС) и помехозащищенность. Одной из технологий, позволяющей решить вопрос повышения ПС и помехозащищенности является стандарт долгосрочной перспективы Long Term Evolution (LTE) и его улучшенная версия LTE-Advanced партнерского проекта 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [1]. В основе данных стандартов лежит связка технологий пространственной обработки Multiple Input Multiple Output (MIMO) и ортогонального частотного мультиплексирования Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

Крайне важным вопросом в настоящий момент является обеспечение качественной связи не только в городе, но и в сельской местности и пригороде. В больших городах активно занимаются расширением инфраструктуры, оборудования и обеспечением хорошего покрытия. При этом в сельской местности качество каналов связи ожидается желать лучшего.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Важным этапом при анализе каналов связи стандарта LTE и LTE-Advanced с MIMO является компьютерное моделирование и анализ потерь на трассе распространения радиоволн. Проблеме замираний и потерь в последние годы посвящено ряд работ [2–3], так как именно потери в первую очередь влияют на скорость передачи и их оценка и моделирование необходимы для анализа текущего состояния MIMO канала.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Улучшение характеристик каналов связи на базе стандарта LTE достигается за счет многоэлементных антенн, как на передающей, так и на приемной стороне [4–5] – так называемые ЦСПИ с многими входами – многими выходами (MIMO) – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Передающие и приёмные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой. Передача информации параллельно по нескольким каналам повышает пропускную способность, помехоустойчивость и надежность каналов связи. Технология

MIMO позволяет уменьшить вероятность ошибок без снижения скорости передачи [6–8].

**Цель статьи.** Главной целью этой работы является проведение моделирования и статистическая оценка учета потерь в каналах связи стандарта LTE и LTE-Advanced построенных на базе MIMO систем в условиях пригорода.

**Изложение основного материала.** Большинство научных и технических решений MIMO, представленных в стандарте LTE, также применяются и в LTE-Advanced, а именно: лучеформирование, пространственное мультиплексирование и пространственное разнесение. Назначение MIMO в стандарте LTE-Advanced – это дальнейшее повышение ПС: пиковой, средней и пропускной способности на границе ячейки. Требования стандарта LTE в основном сфокусированы на повышении средних значений пропускной способности и параметров ПС на границе соты, уделено внимание скоростям, но не дана оценка влиянию потерь.

В стандарте LTE-Advanced реализовано объединение различных режимов MIMO: расширенное или усовершенствованное предварительное кодирование (прекодирование), многопользовательский и однопользовательский режимы (рис. 1).

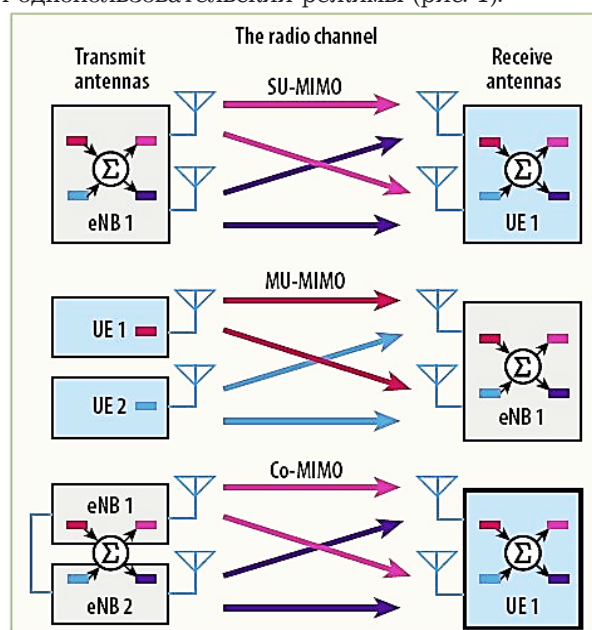


Рис. 1. Основные режимы работы MIMO

Источник: [4]

Основными режимами работы MIMO в LTE-Advanced (рис. 1) являются:

1) Co-MIMO: способствует повышению ПС пользователя на границе ячейки и включает методы совместной передачи – приема сигналов несколькими близлежащими базовым станциям (БС), что позволяет уменьшить уровень межсотовой интерференции. К таким методам относится технология совместного многоточечного приема-передачи БС [8].

2) MU-MIMO (Многopользовательский MIMO): обеспечивает лучший компромисс между производительностью системы и ее сложностью. При MU-MIMO увеличивается гибкость Space-Division Multiple Access, что позволяет различным потокам достигать каждого пользователя, увеличивая при этом среднюю скорость передачи данных в ячейке. SU-MIMO и MU-MIMO еще называется однопользовательским MIMO (single site MIMO) [8].

3) SU-MIMO (Однопользовательский MIMO): метод пространственного разнесения и мультиплексирования в сочетании с лучеформированием. SU-MIMO вместе с большим количеством многоэлементных антенн позволяет существенно увеличить пиковые скорости передачи данных пользователей [8].

Заметим, что требования к LTE-Advanced намного выше, чем к LTE, но и возможностей в стандарте LTE-Advanced больше. Реализация LTE-Advanced наиболее перспективна, так как в ней есть целых три режима планирования сети. Исходя из представленных данных, следует, что стандарт LTE уже достигает скоростей передачи данных, близких к пределу Шеннона, следовательно, основные усилия проектировщиков сети должны быть сосредоточены на улучшении соотношения сигнал/интерференция + шум, что снизит потери и обеспечит в конечном итоге максимально возможные скорости передачи данных в большей части соты.

Стандарт LTE Advanced, позволяющий, помимо прочего, объединить разные несущие, значительно повышает пропускную способность сети в целом. А на конечных устройствах пользователя демонстрирует высокие скорости передачи данных и стабильность передачи благодаря работе на двух несущих одновременно. В каналах связи стандарта LTE и LTE-Advanced с MIMO преимущественно отсутствует прямая видимость между БС и абонентским терминалом. Вследствие этого, принимаемый сигнал представляет сумму отдельных волн, переотраженных от большого числа отражателей и рассеивателей, расположенных случайным образом в среде передачи. Это в значительной мере ухудшает показатели по скорости, так как здесь появляется проблема замираний и потерь при распространении радиоволн. На сегодняшний день эта проблема является достаточно актуальной и ее исследует целый ряд ученых [3–4].

Решение задачи по снижению потерь в городе уделяется большое внимание. Это происходит потому что в городской застройке больше застройка, и количество подвижных абонентских терминалов также выше. При этом нельзя забывать, что в пригороде, а особенно на трассе или магистрали намного больше скорость передвижения абонентских терминалов и меньше объектов для переотражения, за счет которых увеличивается скорость передачи в каналах MIMO. Условия для качественного канала связи в сельской местности значительно хуже, и поэтому появляются высокие потери.

Обобщая математические модели для описания каналов можно выделить детерминированные, структурно-детерминированные и стохастические модели. Подавляющее большинство реальных волновых каналов, передающих информацию, являются стохастическими, т.е. представляют собой среды со случайными неодно-

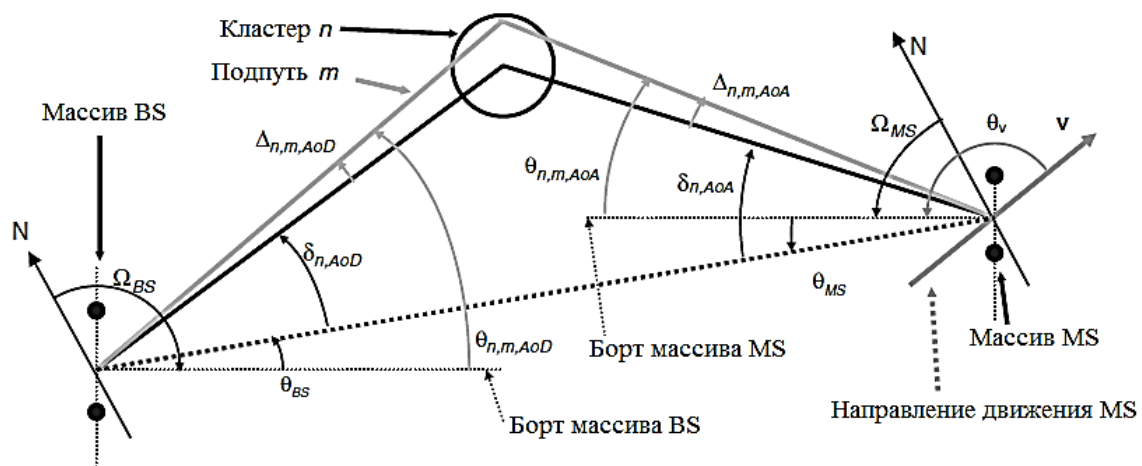


Рис. 2. ЛМРК цифровых систем передачи информации

Источник: [1]

Где  $P_n$  – мощность подлуча  $n$ -го пути;  $\sigma_{SF}$  – стандартное отклонение лог-нормального затенения;  $M$  – количество подлучей на пути;  $\theta_{n,m,AoD}$  – AoD  $m$ -го подлуча для  $n$ -го пути;  $\theta_{n,m,AoA}$  – AoA  $m$ -го подлуча для  $n$ -го пути;  $\phi_n$  – случайная начальная фаза  $m$ -го подлуча для  $n$ -го пути;  $G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})$  – коэффициент усиления антенны БС для каждого АЭ решетки;  $G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})$  – коэффициент усиления антенны АТ для каждого АЭ решетки;  $k$  – волновое число  $\frac{2\pi}{\lambda}$  где  $\lambda$  – длина волны;  $d_s$  – расстояние между АЭ решетки  $s$  и опорным АЭ ( $s = 1$ ) на БС;  $d_u$  – расстояние между АЭ решетки  $u$  и опорным АЭ ( $u = 1$ ) на АТ;  $\|v\|$  – величина вектора скорости АТ;  $\theta_v$  – угол вектора скорости АТ.

родностями. К стохастическим моделям каналов относятся те модели, которые описывают каналы связи, где предполагается, что форма передаваемого сигнала изменяется случайным образом. Существует ряд стохастических моделей для цифровых систем передачи информации – это двухлучевая модель, экспоненциальная модель, модель Saleh-Valenzuela, модель Джейкса и лучевая модель радиоканала (ЛМРК) [8].

Для описания простейших радиоканалов с интерференционными замираниями используется двухлучевая модель. Данная модель справедлива на гектометровых волнах в пределах зоны эффективного распространения земной волны (наличие однократно и двукратно отраженных лучей) и имеет место только для SISO каналов. Без сомнения простота двухлучевой модели это достоинство, но при этом важным недостатком является невозможность применения ее к MIMO системам.

Экспоненциальная модель представляет собой дальнейшую модификацию двухлучевой модели, когда увеличивается число каналов и средняя мощность в канале уменьшается по экспоненциальному закону. Экспоненциальная модель больше подходит для моделирования каналов в помещениях. Ограничением экспоненциальной модели является то, что она отлично подходит для каналов закрытого типа, но не применима для открытого пространства и больших расстояний.

Для моделирования ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced с MIMO на практике часто используется модель Джейкса. Модель Джейкса широко применима для описания нестационарных рэлеевских затуханий с П-образным спектром мощности. Каждый элемент матрицы MIMO канала самостоятельно подчиняется модели, т.е. с помощью нескольких колец рассеяния, теоретически, можно получить независимые и одинаково распределенные, изменяющиеся во времени MIMO каналы, что дает возможность анализировать ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced. Модель Джейкса получена в результате сложения плоских волн при их взаимодействии с различными рассеивателями в окружающем пространстве вокруг антенны абонентского терминала [9]. Согласно модели Джейкса все лучи, возникшие в результате рассеяния, представляют плоские волны, имеющие равномерный азимутальный спектр мощности, что не всегда выполняется в реальных условиях. Мобильные абонентские терминалы в реальных условиях могут иметь различное положение и удаление от БС. Поэтому модель Джейкса можно рассматривать только как теоретическую базу, т.к. на практике в реальной среде она имеет большие погрешности.

В отличие от модели Джейкса, в основе ЛМРК [9] лежит процедура сложения плоских волн, приходящих из разных направлений по отношению к абонентскому терминалу. Абонентский терминал может взаимодействовать с различными рассеивателями на различном расстоянии в окружающем пространстве. Так как в ЛМРК азимутальный спектр мощности неравномерный, ее доплеровский спектр будет иметь не классическую U-образную форму, а вид характерный расположению рассеивателей в окружающем пространстве. ЛМРК модель представлена на рисунке 2.

Импульсная характеристика ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced на базе MIMO систем при использовании ЛМРК рассчитывается по формуле (1) [7]:

$$h_{u,v}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SP}}{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,tot})} \cdot \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,tot}) + \phi_N]) \cdot \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,tot})} \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,tot})) \cdot \exp(jk \|v\| \cos(\theta_{n,m,tot} - \theta_v)) \quad (1)$$

Новизна предложенного подхода по сравнению с известными работами (например [3–4]) заключается в том, что модель ЛМРК применена для статистической оценки потерь на трассе распространения каналов связи стандарта LTE и LTE-Advanced.

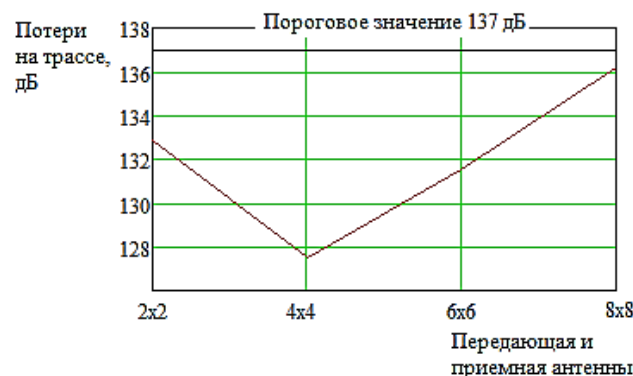


Рис. 3. Потери при скорости абонентского терминала 5 км/ч

Результаты моделирования проведенного авторами

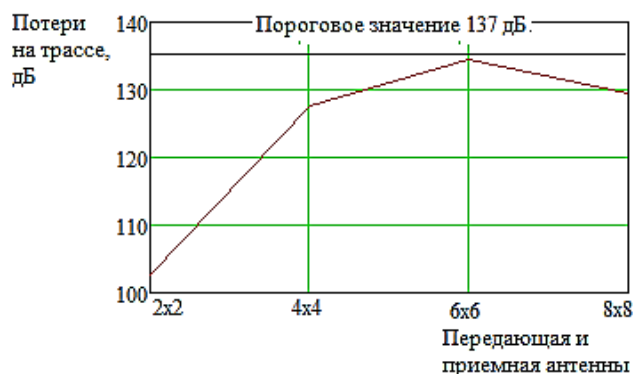


Рис. 4. Потери при скорости абонентского терминала 60 км/ч

Результаты моделирования проведенного авторами

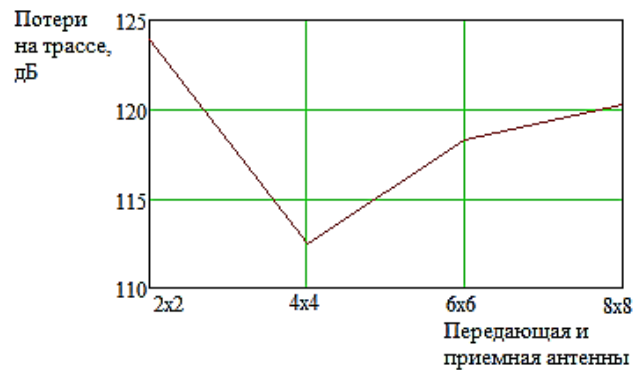


Рис. 5. Потери при скорости абонентского терминала 150 км/ч

Результаты моделирования проведенного авторами

Опишем проведенные опыты, результаты которых приведены на рис. 3-5. Для моделирова-

ния использовался стандарт 3GPP TR 25.996 [10], где для работы выбрана ЛМРК. Для проведения расчетов, построения зависимостей и получения численных результатов выбраны следующие исходные данные каналов связи стандарта LTE и LTE-Advanced: расстояние между БС и абонентским терминалом 315 м; рабочая частота  $2 \times 10^9$  Гц; высота подвеса антенны БС 32 м; высота подвеса антенны абонентского терминала 1.5 м. Моделирование проводилось с учетом распространения радиоволн в условиях пригорода для различной скорости движения абонентского терминала. Основываясь на теории анализа ММО каналов связи стандарта LTE и LTE-Advanced, с помощью ЛМРК были получены зависимости потерь на трассе распространения от конфигурации антенных элементов на передающей и приемной стороне систем связи. Полученные зависимости были получены для трех скоростей движения абонентского терминала: скорость движения человека 5 км/ч (рис. 3), скорость движения транспортного средства в городе 60 км/ч (рис. 4) и скорости движения транспортного средства на трассе 150 км/ч (рис. 5).

**Выводы и предложения.** Полученные данные по результатам моделирования потерь при различной конфигурации антенной системы на передающей и приемной стороне ММО канала и учетом скорости движения абонентского терминала показывают, что в условиях пригорода наименьшие потери достигаются при количестве антенных элементов  $2 \times 2$  и скорости движения

абонента 60 км/ч. Полученные данные по значениям потерь для сельской местности хорошо коррелируют с результатами, приведенными в [3–4]. Анализируя их совместно с данными проведенного моделирования, можно прийти к выводу, что при скорости абонента в 5 км/ч и количестве антенных элементов на передатчике и приемнике  $6 \times 6$  потери достигают пикового значения по отношению к максимально допустимому в 137 дБ.

Для того чтобы разработчикам правильно построить каналы связи в сельской местности необходимо знать при каких конфигурациях антенных элементов на передающей и приемной стороне ММО системы достигаются минимальные и максимальные потери на трассе. В результате проведенного анализа сделан вывод, что для описания каналов связи ММО наиболее адекватной моделью реальной среды является ЛМРК. На основе ЛМРК был смоделирован канал связи LTE на базе ММО систем имитирующий условия распространения в пригороде и получены значения потерь на трассе. Новизна предложенной методики по сравнению с известными работами заключается в подходе, который оценивает потери в каналах связи стандарта LTE и LTE-Advanced не исключая скорость движения абонентского терминала. Результаты проведенных исследований и математическое моделирование представляет интерес для разработчиков систем передачи информации и разработчиков абонентских устройств.

### Список литературы:

1. 3GPP TS 33.401 V8.6.0 (2009-12) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP System Architecture Evolution (SAE): Security architecture; (Release 8).
2. Дюсенова О. С. Исследование использования новых стандартов сотовой связи и широкополосного доступа LTE и WIGIG для предоставления услуг Triple Play [Текст] / О. С. Дюсенова, О. Н. Пищин, Г. С. Павленко // Молодой ученый. – 2013. – № 5. – С. 45-49.
3. Факри Р., Воропаева В. Я. Расчет максимально допустимых потерь в каналах UL, DL для сети UMTS в условиях г. Амман / Р. Факри, В. Я. Воропаева. Вестник ДНТУ. – 2012, pp. 24-26.
4. Ngo H. Q. and Larsson E. G. Blind estimation of effective downlink channel gains in Massive MIMO, in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brisbane, Australia, April 2015, submitted.
5. Rafati A., Lou H. and Xiao C. «Low-complexity soft-decision feedback turbo equalization for MIMO systems with multilevel modulations.» IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, pp. 3218-3227, Sept. 2011.
6. Goldsmith A., Jafar S. A., Jindal N., Vishwanath S. Fundamental Capacity of MIMO Channels. Stanford: Stanford University, 2002, pp. 5-27.
7. 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.
8. Akyildiz I. F., Gutierrez-Estevez D. M., Reyes E. C. The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced / I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, E. C. Reyes. – 2010, № 3, pp. 217-244.
9. Hess M. G. «A ray-based MIMO propagation model» 3GPP2 Standards Contribution C50-SCM-20010820-027, August 2001, available at: ftp: // ftp.3gpp2.org/TSGC /Working/2001 /TSG-C 0108/TSG-C-0801-Portland /WG5/.
10. 3GPP Spatial Channel Model (3GPP TR 25.996) Implementation Documentation Date: July 5, 2006.

**Шарапова О.В., Дейнеко Д.В.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

## **АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ ВТРАТ ЩОДО ДОПУСТИМОГО РІВНЯ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE В УМОВАХ ПЕРЕДМІСТІ**

### **Анотація**

В статті приведена аналітична оцінка втрат в каналах зв'язку стандарту LTE і LTE-Advanced на базі технології MIMO в умовах сільської місцевості. Показано, як змінюються рівні перешкод в каналах зв'язку при різній швидкості руху абонента в передмісті та різній кількості антенних елементів на передавачі та приймачі.

**Ключові слова:** MIMO, LTE, LTE-Advanced, втрати, променева модель радіоканалу.

**Sharapova E.V., Deineko D.V.**

Kharkiv National University of Radioelectronics

## **ANALYTICAL EVALUATION OF DISTRIBUTION LOSSES REGARDING PERMISSIBLE LEVELS NETWORKS LTE STANDARDS IN THE SUBURBS**

### **Summary**

The article presents the analytical estimation of losses in the communication channels of the LTE and LTE-Advanced networks based on MIMO technology in the suburbs. It shows the variation in interference levels in the communication channels with different local velocity in the suburbs, and a different number of antenna elements at the transmitter and receiver.

**Keywords:** MIMO, LTE, LTE-Advanced, losses, Ray Based Model.