

УДК 621.396.96

В.С. Вовченко

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В КАНАЛАХ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE И LTE-ADVANCED НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ MIMO

*В статье приведен анализ и статистическая оценка потерь в каналах связи цифровых систем передачи информации стандарта LTE и LTE-Advanced на базе многопользовательских систем MIMO. Показано, как изменяются уровни помех в каналах связи при различных трассах распространения, различной скорости движения абонентского терминала и различной конфигурации антенн на передающей и приемной стороне.*

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

### Введение

С ростом количества пользователей и объемов передаваемой информации важную роль в цифровых системах передачи информации (ЦСПИ) в последние годы 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) [2].

Важным этапом при анализе ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced с MIMO является компьютерное и статистическое моделирование потерь на трассе распространения радиоволн. Проблеме замираний и потерь в последние годы посвящено ряд работ [3 – 4], так как именно потери в первую очередь влияют на скорость передачи и их оценка и моделирование необходимы для анализа текущего состояния MIMO канала.

**Цель работы** состояла в проведении моделирования и статистической оценке учета потерь в каналах связи ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced построенных на базе MIMO систем.

### Основная часть

Для повышения эффективности ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced в плане противостояния межсимвольной интерференции и частотно-селективным замираниям используется разделение широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы – уплотнение (мультиплексирование) с помощью ортогональных поднесущих или ортогональное частотное разделение с мультиплек-

сированием (OFDM). Улучшение характеристик ЦСПИ в стандарте LTE достигается за счет многоэлементных антенн, как на передающей, так и на приемной стороне [5] – так называемые ЦСПИ со многими входами – многими выходами (MIMO). MIMO – это технология беспроводной передачи данных, в которой один поток передаваемых данных разбивается на подпотоки и передается по нескольким независимым пространственным каналам одновременно. Передача информации параллельно по нескольким каналам повышает пропускную способность, помехоустойчивость и надежность ЦСПИ. Технология MIMO позволяет уменьшить вероятность ошибок без снижения скорости передачи [6]. Важно подчеркнуть, что именно технология MIMO очень удачно подошла под активно развиваемую технологию уплотнения (мультиплексирования) посредством ортогональных поднесущих OFDM. Именно связка OFDM-MIMO позволила получить на сегодняшний день рост высокоскоростных и помехозащищенных ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced.

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 к пиковой ПС для LTE и LTE-Advanced с MIMO различной конфигурации представлены в табл. 1. Эти требования носят рекомендательный характер с учетом направления передачи и скоростей, но не учитывают потерь. Что, в свою очередь, без статистической оценки, может приводить к снижению пропускной способности.

Исходя из предыдущих рассуждений и анализа стандарта LTE-Advanced, не трудно заключить, что требования стандарта в основном сфокусированы на

повышении средних значений пропускной способности и параметров ПС на границе соты, уделено внимание скоростям, но не дана оценка влиянию потерь.

Таблица 1

Требования  
к стандарту LTE и LTE-Advanced [1]

	Направление передачи в канале	Схема антенн MIMO	Стандарты	
			LTE (Rel. 8)	LTE - Advanced
Пиковая скорость передаваемых данных	DL (downlink) UL (uplink)	8x8 4x4	- -	1 Gbps 500 Mbps
	DL	4x2	300 Mbps	-
	DL	2x2	100 Mbps	-
	UL	2x4	75 Mbps	-
	UL	2x2	50 Mbps	-
Пиковая спектральная эффективность (bps/Hz)	DL	8x8	-	30
	UL	4x4	-	15
Пропускная способность соты (bps/Hz/cell)	DL	4x2	1	-
		UL	2x4	5
		UL	2x2	3.75
	UL	2x2	1.69	2.4
		4x2	1.87	2.6
		4x4	2.67	3.7
Пропускная способность абонента на границе соты (bps/Hz/cell/user)	DL	1x2	0.74	1.2
		2x4	-	2.0
UL		2x2	0.05	0.07
	4x2	0.06	0.09	
	4x4	0.08	0.12	
Пропускная способность абонента на границе соты (bps/Hz/cell/user)	UL	1x2	0.024	0.04
		2x4	-	0.07

Концепция MIMO 8x8 представляет собой адаптивную многорежимную платформу. Для такой системы более высоких скоростей передачи и большего покрытия достигаются благодаря надлежащему выбору схемы MIMO согласно требованиям к ЦСПИ.

Стратегия адаптации выбирается на основе измерений характеристик канала на стороне базовой станции (БС) посредством низкоскоростного механизма обратной связи. В стандарте LTE-Advanced реализовано объединение различных режимов MIMO: расширенное или усовершенствованное предварительное кодирование (прекодирование), многопользовательский и однопользовательский режимы (рис. 1).

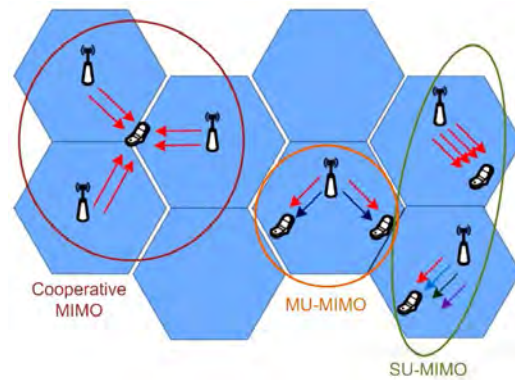


Рис. 1. Основные режимы работы MIMO в LTE-Advanced

Основные режимы работы MIMO в LTE-Advanced представлены на рис. 1, где [7]:

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

2) MU-MIMO (Многопользовательский 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).

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.

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. В ЦСПИ 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 в ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced является достаточно актуальной и ее исследует целый ряд ученых [3 – 4].

Обобщая математические модели для описания каналов в ЦСПИ, можно выделить детерминированные, структурно-детерминированные и стохастические модели. Общая классификация представлена на рис. 2.

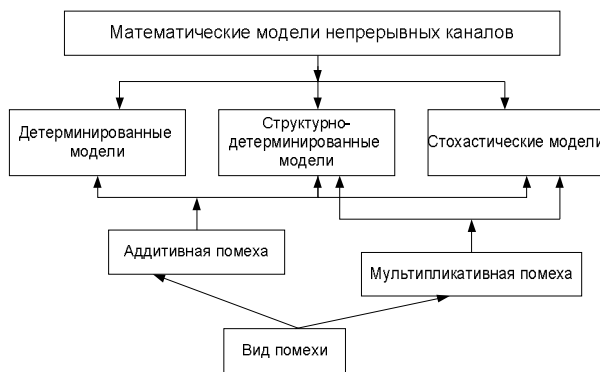


Рис. 2. Классификация математических моделей для описания ЦСПИ

Подавляющее большинство реальных волновых каналов, передающих информацию, являются стохастическими, т.е. представляют собой среды со случайными неоднородностями. 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 ЦСПИ – 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 сомнений 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, проходящих 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 рис. 3.

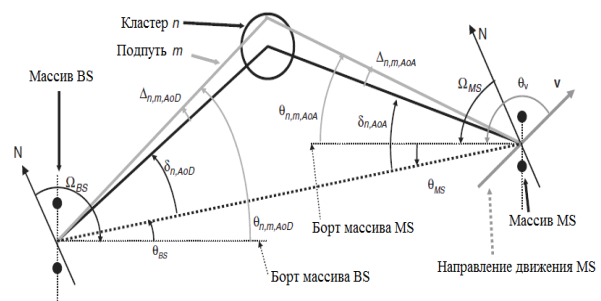


Рис. 3. ЛМРК цифровой системы передачи информации

Здесь  $P_n$  – 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.

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

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

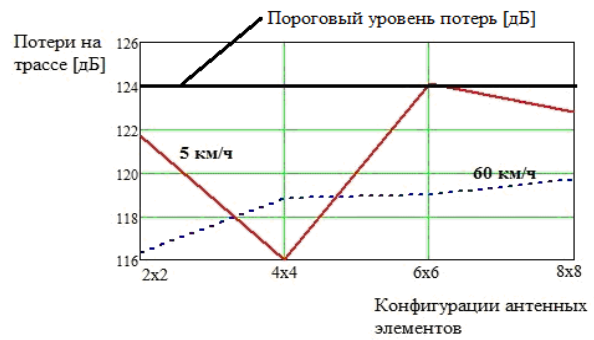
Новизна предложенного подхода по сравнению с известными работами (например [3 – 4]) заключается в том, что модель ЛМРК применена для статистической оценки потерь на трассе распространения ЦСПИ стандарта LTE и LTE-Advanced.

Опишем проведенные опыты, результаты которых приведены на рис. 4. Для моделирования использовался стандарт 3GPP TR 25.996 [10], где за основу работы, как базовая, выбрана ЛМРК. Для проведения расчетов, построения зависимостей и получения численных результатов выбраны следующие исходные данные каналов связи стандарта LTE и LTE-Advanced:

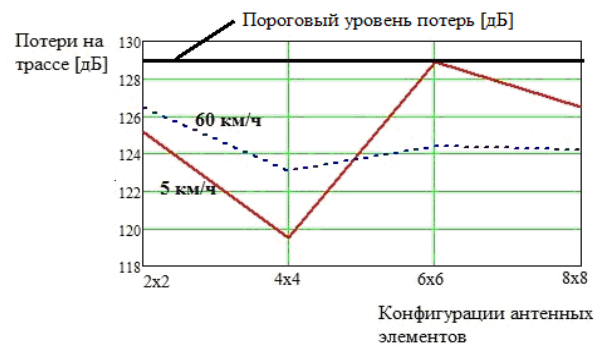
- расстояние между БС и абонентским терминалом 315 м;
- рабочая частота  $2 \times 10^9$  Гц;
- высота подвеса антенны БС 32 м;
- высота подвеса антенны абонентского терминала 1.5 м.

Основываясь на теории анализа MIMO 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 ЦСПИ. Полученные зависимости были получены для трех скоростей движения абонентского терминала: скорость движения человека 5 км/ч, скорость движения транспортного средства в городе 60 км/ч и скорости движения транспортного средства на трассе 150 км/ч. Графики представлены для трех типов трассы

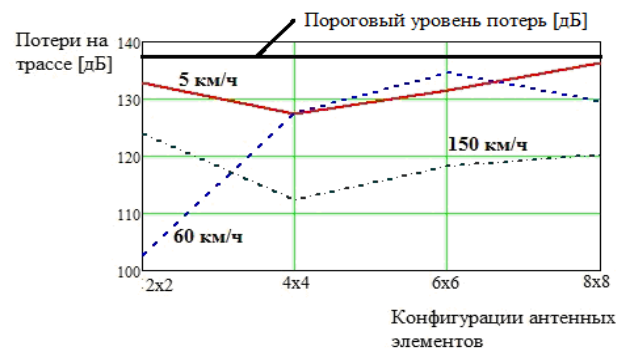
распространения – большой город (рис. 4, а), малый город (рис. 4, б) и пригород (рис. 4, в).



а – большой город



б – малый город



в – пригород

Рис. 4. Зависимость потерь на трассе распространения от конфигурации антенной системы на передающей и приемной стороне MIMO канала

Полученные нами данные по результатам моделирования потерь с учетом различной конфигурации передающей и приемной стороны MIMO канала и учетом скорости движения абонентского терминала показывают, что конфигурация 4x4 при любой трассе распространения и скорости абонентского терминала показывают наименьшие показатели по потерям. В большом городе она достигает 116 дБ при пороговом значении 124 дБ, в малом городе 119,5 дБ при пороге в 129 дБ, а в пригороде потери составляют 127,5 дБ при максимально допустимом значении 137 дБ. Так же немаловажно, что конфигурация антенных эле-

ментов 8×8 використовується тільки в LTE-Advanced і дає хороші показателі з відносно малими втратами в великому і малому місті, а в передмісті втрати при даній конфігурації досягають максимально допустимих значень.

В той же час отримані дані по значенням втрат для трьох типів середовища поширення добре корелюють з результатами, наведеними в [3 – 4]. Аналізуючи їх разом з даними проведеного моделювання, можна прийти до висновку, що при конфігурації антенних елементів стандарту LTE і LTE-Advanced на передавальній і приймачній стороні 6×6, швидкості руху абонентського терміналу 5 км/ч і траси поширення в умовах великого і малого міста, втрати досягають пікових значень серед максимально допустимих.

## Висновки

1. Показано, що один із методів підвищення якості та надійності передаваної інформації в ЦСПІ – це зниження втрат на трасі поширення. Для того щоб розробникам адекватно оцінити правильне побудоване ЦСПІ, необхідно знати, при яких конфігураціях MIMO досягаються мінімальні та максимальні втрати на трасі.

2. В результаті проведеного аналізу зроблено висновок, що для описання ЦСПІ з MIMO найбільш адекватною моделлю реальної середовища є JMRK. На основі JMRK було смодельовано канал зв'язу LTE на базі MIMO систем і отримані значення втрат на трасі поширення. Новизна запропонованої методики порівняно з відомими роботами полягає в статистичній оцінці втрат в каналах зв'язу стандарту LTE і LTE-Advanced з урахуванням конфігурації MIMO і швидкості руху абонентського терміналу.

3. Отримані нові дані про можливості застосування стандарту LTE і LTE-Advanced при проектуванні ЦСПІ. Показано, які конфігурації антенних систем з урахуванням втрат на БС і на стороні

абонентського терміналу є найбільш підходящими. Таким чином, ці результати мають практичний інтерес як для розробників ЦСПІ, так і для розробників абонентських пристроїв.

## Список літератури

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. Hanzo L. MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX / L. Hanzo, A. Yosef, L. Wang. United Kingdom. – 2011. – P. 214-227.
3. 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.
4. Факри Р. Расчет максимально допустимых потерь в каналах UL, DL для сети UMTS в условиях г. Амман / Р. Факри, В.Я. Воропаева // Вестник ДНТУ. – 2012. – С. 24-26.
5. Taoka H. MIMO and CoMP in LTE-Advanced / H. Taoka, S. Nagata, K. Takeda, Y. Kakishima, X. She, K. Kusume // Tehnology Raports. – 2012. – P. 20-28.
6. Goldsmith A. Fundamental Capacity of MIMO Channels / A. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath. – Stanford: Stanford University, 2002. – P. 5-27.
7. Akyildiz I.F. The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced / I.F. Akyildiz, D.M. Gutierrez-Estevez, E.C. Reyes. – 2010. – V. №3. – P. 217-244.
8. Jemmali A. 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.
9. Hess M.G. A ray-based MIMO propagation model / M.G. Hess // 3GPP2 Standards Contribution C50-SCM-20010820-027, August 2001, available at: [ftp.3gpp2.org/TSGC/Working/2001/TSG-C\\_0108/TSG-C-0801-Portland/WG5/](http://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.

Поступила в редколлегию 27.04.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.И.Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ВТРАТ В КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE І LTE-ADVANCED НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ MIMO

В.С. Вовченко

У статті наведено аналіз і статистичну оцінку втрат в каналах зв'язу цифрових систем передачі інформації стандарту LTE і LTE-Advanced на базі багатокористувачьких систем MIMO. Показано, як змінюються рівні переширок в каналах зв'язу при різних трасах поширення, різній швидкості руху абонентського терміналу і різній конфігурації антен на передавальній і приймачній стороні.

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

## STATISTICAL ESTIMATION OF LOSSES IN COMMUNICATION CHANNELS OF STANDARD LTE AND LTE-ADVANCED ON THE BASIS OF TECHNOLOGY MIMO

V.S. Vovchenko

In article the analysis and a statistical estimation of losses in communication channels of digital systems of an information transfer of standard LTE and LTE-Advanced on the basis of multiuser systems MIMO is resulted. It is shown, how levels of hindrances in communication channels change at various lines of distribution, various speed of movement of the user's terminal and a various configuration of arrays on the transferring and reception party.

**Keywords:** losses, standard LTE and LTE-Advanced, MIMO, Ray-based model.