

# ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

УДК621.396.677.49

Ю. Ю. Коляденко, А. М. Алалі  
Харківський національний університет радіоелектроніки

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОКАНАЛІВ МЕРЕЖІ LTE

© Коляденко Ю. Ю., Алалі А. М., 2015

Проведено вимірювання відношення сигнал / завада + шум у частотному діапазоні 1920–1980 МГц на суміжних частотах 1920000 кГц і 1920015 кГц. За отриманими вибірками розраховані їх середні значення і дисперсії. Побудовані автокореляційні функції цих вибірок та взаємні кореляційні функції. На підставі розрахованих за отриманими вибірками середніх значень процесів, дисперсій та інтервалів кореляцій розроблена двовимірна марківська модель у вигляді рівнянь стану та рівнянь спостереження.

Ключові слова: мережа LTE, вимірювання параметрів, оцінка вимірювань, статистичні характеристики.

Yu. Yu. Kolyadenko, A. M. Alali  
Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine

## RESEARCH OF THE RADIO CHANNEL PARAMETERS OF LTE NETWORK

© Kolyadenko Yu. Yu., Alali A. M., 2015

To be successful, efficient operation of networks apply the relevant methods of network and systems management, which require constant and reliable metrological provision and receipt of appropriate and effective estimates of the parameters measured random variables, processes or fields. To obtain estimates of the measured parameters can be used: sampling methods optimal estimate of random variables, recursive methods for estimating random variables or recursive evaluation methods of random processes. More constructive type ratings are recursive estimation procedure, which gives the current evaluation process in real time, and in the evaluation of the random variable recursive procedure tends asymptotically to the true value.

In the recursive methods for estimating the parameters evaluated included the process or the amount, and therefore the mathematical model. Therefore, actual scientific task is to develop a mathematical model of radio network LTE.

In LTE network every 0.5 ms to measure the characteristics of the channel, and every 40 ms reports are sent to the mean values of the measured parameters.

To provide access and distribution of resources subscribers can measure the following parameters: average power of the received pilot signal; quality of received pilot signals; ratio of the instantaneous data rate to an average speed; the ratio of signal power to interference power and noise power (SINR). The most obvious indicator is the SINR, as 1st and 2nd figures do not take into account the interference power in the channels, and the third figure is derived indicator of SINR. Therefore, measurements and assessments of quality indicators channels LTE networks rational use indicator SINR.

Measured SINR in uplink frequency band 1920–1980 MHz frequencies in adjacent 1920000 1920015 kHz. According to the obtained samples calculated their mean values and variances. Built

autocorrelation functions of sample data and cross-correlation function. Maximum values, these functions are at the value of the time shift is zero and slowly decreases with increasing time shift. Based on this schedule, we can conclude that they have an exponential form. According to Theorem J. Doob can be argued that the results obtained are Markov processes.

According to the correlation functions defined intervals correlation and cross-correlation intervals. To process one correlation interval is 21 count, which corresponds to the time interval 9.0006 ms. Process 2 correlation interval of 13 samples, which corresponds to the time interval 5.5718 ms. Cross-correlation interval is 7.5 counts. Consequently, during the time it is 3.2145 ms. Thus, it can be argued that the processes in the adjacent channels are statistically dependent.

Invited to the processes occurring in the channels to approximate a multivariate Markov model in the form of equations of state and observation equations. Calculated on the basis of the obtained samples of the average values of processes, variances and correlations intervals developed two-dimensional model equations of state and observation equations.

**Key words:** Network LTE, parameter measurement, evaluation of measurements, statistical characteristics.

### Вступление

Функционирование мобильных сетей сотовой связи третьего поколения к настоящему времени стало реальностью. Стандарты третьего поколения позволили обеспечить представление пользовательских услуг (потокосвое вещание, передача мультимедийной информации, высокоскоростной интернет и др.), недоступных в традиционных сетях второго поколения [1, 2].

Дальнейшим развитием мировых телекоммуникационных технологий в области мобильной связи является разработка и внедрение стандартов четвертого поколения (4G), обеспечивающих еще большие скорости передачи данных и повышение качества предлагаемых пользовательских услуг при общем снижении затрат в эксплуатации. Одной из технологий, используемых для решения насущных задач современных телекоммуникаций, является технология Long Term Evolution (LTE). Соответственно этому, сети мобильной связи, реализованные на основе такой технологии, называют LTE-сети. Для успешной, эффективной работы этих сетей применяют соответствующие методы сетевого и системного управления, которые требуют постоянного и надежного метрологического обеспечения и получения соответствующих эффективных оценок параметров измеряемых случайных величин, процессов или полей [3, 4]. Для получения оценок измеряемых параметров могут использоваться: выборочные методы оптимальной оценки случайных величин, рекурсивные методы оценки случайных величин или рекурсивные методы оценки случайных процессов.

Получаемые выборочные оценки статистических параметров могут далее использоваться для задач управления и принятия решений по распределению частотного ресурса между абонентскими станциями. Однако для автоматических систем выборочные оценки не очень удобны из-за того, что для их получения необходимо затратить определенный интервал времени. Более конструктивным типом оценок являются рекурсивные процедуры оценивания, которые дают текущую оценку процессу в реальном времени, а при оценке случайной величины рекурсивная процедура асимптотически стремится к истинному значению. В рекурсивные методы оценки входят параметры оцениваемого процесса или величины [5], а соответственно и математические модели. Поэтому актуальной научной задачей является разработка математической модели радиоканалов сети LTE.

### Измеряемые параметры радиоканалов и их статистические характеристики

Для предоставления доступа и распределения ресурсов между абонентскими станциями в сети LTE может производиться измерение таких показателей [2, 6–11]:

- 1) средней мощности принятых пилотных сигналов  $P_{cp}$  (дБм) – RSRP;
- 2) качество принятых пилотных сигналов – RSRQ (отношение средней мощности принятых пилотных сигналов  $P_{cp}$  к средней мощности сигналов в OFDMA символах  $P_{OFDM}$  на одну поднесущую):

$$RSRQ = \frac{P_{cp}}{P_{OFDM}/N}, \text{ дБ}; \quad (1)$$

3) отношение мгновенной скорости передачи данных к средней скорости:

$$k = \arg \max_i \frac{I_i'}{\overline{I_i'}} \quad (2)$$

где  $I_i'$  – мгновенная скорость передачи данных для пользователя  $i$ , и  $\overline{I_i'}$  – средняя скорость данных для пользователя  $i$ . Средняя величина рассчитывается за определенный период  $T_{PF}$ . Обычно  $T_{PF}$  задается до одной секунды;

4) отношение мощности сигнала  $P_c$  к мощности помех  $P_n$  и мощности шума  $P_{ш}$  (ОСПШ), дБ:

$$h^2 = \frac{P_c}{P_n + P_{ш}} \quad (3)$$

В сети LTE каждые 0,5 мс производятся измерения характеристик канала, и каждые 40 мс отправляются отчеты о средних значениях измеренных параметров. Кроме того, анализ литературы [6–10] показал, что параметры радиоканалов являются статистически независимыми.

В LTE используется схема передачи SC-FDMA (Single-carrier frequency-division multiple access). Распределение частотного ресурса между абонентами осуществляется ресурсными блоками, каждому из которых соответствует полоса частот 180 кГц в частотной области, что при разносе между соседними поднесущими частотами в 15 кГц соответствует 12 поднесущим, и временной интервал 0,5 мс во временной области (1 слот). В режиме работы с нормальным циклическим префиксом ресурсный блок содержит 7 SC-FDMA-символов, а в режиме работы с расширенным циклическим префиксом – 6 SC-FDMA-символов [11].

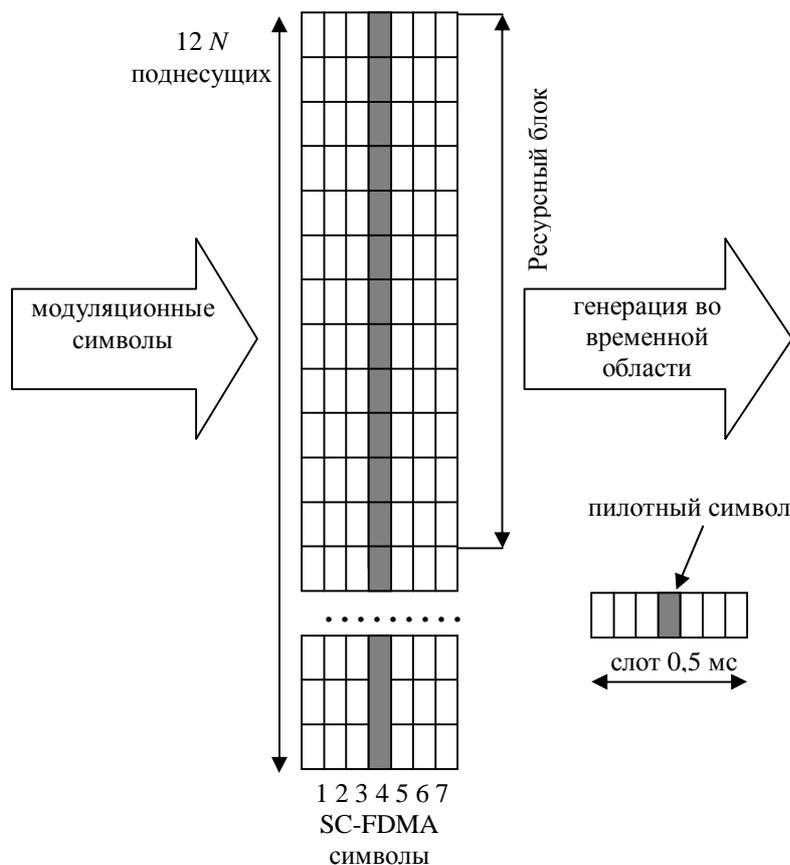


Рис. 1. Структура слота сигнала SC-FDMA

Максимальное количество доступных ресурсных блоков зависит от выделенного системе диапазона частот, значение которого может достигать до 20 МГц, однако на краях выделенного диапазона предусмотрены защитные интервалы, которые не используются для передачи информации. Так, при выделении системе LTE полосы в 10 МГц реально будет использоваться только 9 МГц, что соответствует 50 ресурсным блокам.

При формировании сигнала восходящих каналов комплексные модуляционные символы размещаются по доступным частотно-временным ресурсам (ЧВР), не занятым пилотными символами (рис. 1, где пилотные символы выделены тёмным цветом). Пилотные символы располагаются в середине слота, они используются на приемной стороне для оценки качества канала. После размещения данных по ЧВР генерируется SC-FDMA-сигнал с периодическим добавлением циклического префикса (ЦП) во временной области.

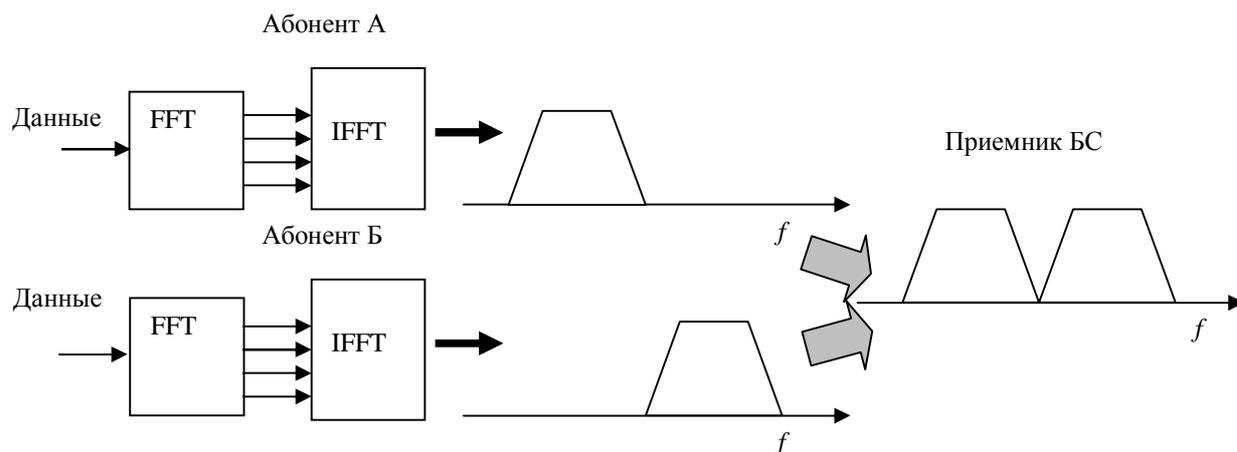


Рис. 2. Частотное разнесение сигналов различных абонентов

Выделяемый абоненту ресурс всегда кратен в частотной области полосе шириной 180 кГц, а во временной – интервалу длительностью 1 мс, что соответствует двум слотам радиосигнала или одному подкадру. Контроль за сигналами абонентов осуществляется базовой станцией (БС) таким образом, чтобы их сигналы не перекрывались по частоте или во времени. Изменяя номера используемых входов блока обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) передатчика, абонентский терминал (АТ) может передавать свой сигнал в нужной полосе (рис. 2).

Как сказано выше, для предоставления доступа и распределения ресурсов между абонентскими станциями в сети LTE может производиться измерение показателей: RSRP, RSRQ  $k$  или ОСПШ. На наш взгляд, наиболее наглядным показателем является ОСПШ, так как, во-первых, показатели RSRP и RSRQ не учитывают мощностей помех в каналах, во-вторых, показатель  $k$  является производным показателем от ОСПШ. Поэтому для измерений и оценок показателей качества каналов LTE сетей воспользуемся показателем ОСПШ.

Проведены измерения ОСПШ восходящего канала в частотном диапазоне 1920–1980 МГц на смежных частотах 1920000 кГц и 1920015 кГц. Эксперимент проводился так. Генерировались тестовые сигналы на частотах 1920000 кГц (канал 1) и 1920015 кГц (канал 2). На приемной стороне в автоматическом режиме производились измерения ОСПШ в каждом канале. Для набора статистики было произведено 1000 измерений на протяжении 428,6 мс через интервал времени  $\Delta t = 0,4286$  мс (рис. 1).

По полученным реализациям в среде Matlab построены зависимости ОСПШ от времени наблюдения. На рис. 3 представлены результаты измерений ОСПШ двух смежных каналов. Судя по этим зависимостям, можно сказать, что ОСПШ представляет собой случайный процесс как для канала 1, так и для канала 2.

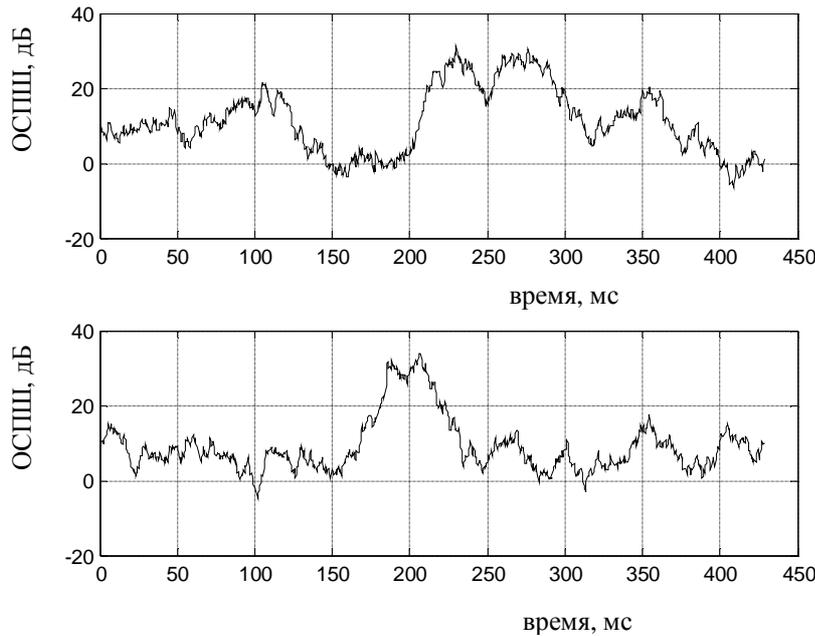


Рис. 3. Результаты измерений ОСПИ двух смежных каналов

В предположении о том, что такие процессы являются эргодическими, по одним достаточно длинным реализациям получены:

– математические ожидания (средние значения):

$$m = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T h^2(t) dt ,$$

для процесса 1 математическое ожидание  $m_1 = 11.0671$ ,

для процесса 2 математическое ожидание  $m_2 = 10.9773$ ;

– дисперсии (разброс относительно средних значений):

$$s^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [h^2(t) - m]^2 dt ,$$

для процесса 1 дисперсия  $s_{11}^2 = 33.2875$ ,

для процесса 2 дисперсия  $s_{22}^2 = 27.0391$ ;

– автокорреляционные функции  $R(t)$  ( $t$  – временной сдвиг):

$$R(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T h^2(t) h^2(t+t) dt - m^2 .$$

Данные зависимости представлены на рис. 4, а. Из графиков видно, что максимальные значения,  $R_{\max}$  эти функции имеют при  $t=0$  и медленно убывают с увеличением временного сдвига. На основании графиков можно сделать вывод о том, что они имеют экспоненциальный вид. В соответствии с теоремой Дж. Дуба можно утверждать, что полученные процессы являются марковскими.

Числовой характеристикой, служащей для оценки “скорости изменения” реализаций случайного процесса, является интервал корреляции  $t_{kor}$ , определяемый выражением:

$$t_{kor} = \frac{1}{R(0)} \int_0^{\infty} |R(t)| dt . \quad (4)$$

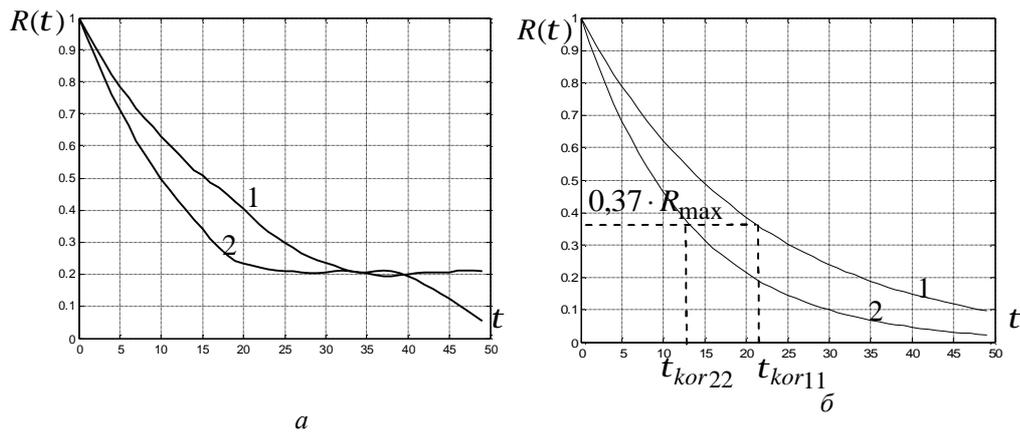


Рис. 4. Графики нормированных корреляционных функций процессов 1 и 2

Полученные функции корреляции можно аппроксимировать выражением:

$$R(t) = e^{-a \cdot t}, \quad (5)$$

где  $a = 1/t_{kor}$ .

По экспериментальным графикам корреляционных функций построены аппроксимированные экспоненты (рис. 4, б). Очевидно, при  $t = t_{kor}$  экспонента  $e^{-1} \cong 0.37$ . Считается, что интервал корреляции  $t_{kor}$  определяется в точке, где корреляционная функция  $R(t) = 0.37 R_{max}$ .

Для определения скорости изменения процессов по полученным графикам корреляционных функций определены интервалы корреляции. Для процесса 1 интервал корреляции составляет  $t_{kor11} = 21$  временной сдвиг, что соответствует временному интервалу  $t_{kor11} \cdot \Delta t = 21 \cdot 0,4286 = 9,0006$  мс. Для процесса 2 интервал корреляции составляет  $t_{kor22} = 13$  временных сдвигов, что соответствует временному интервалу  $t_{kor22} \cdot \Delta t = 13 \cdot 0,4286 = 5,5718$  мс.

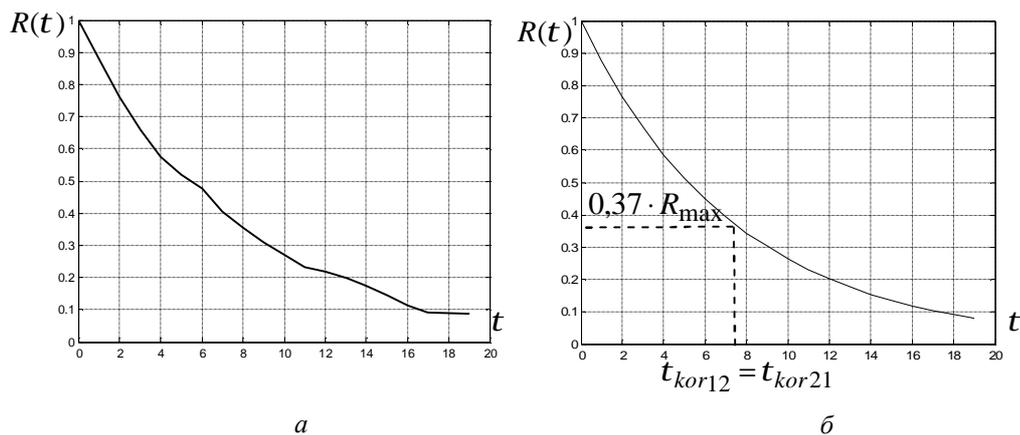


Рис. 5. График нормированной взаимной корреляционной функции

Для определения статистической зависимости двух процессов построена взаимная корреляционная функция. На рис. 5 представлен график нормированной корреляционной функции двух процессов. По экспериментальному графику взаимной корреляционной функции построена аппроксимированная экспонента (рис. 5, б).

По этому графику определен интервал взаимной корреляции между двумя процессами. Интервал корреляции составляет  $t_{kor}=7,5$  временных сдвигов. Следовательно, во времени он составляет  $t_{kor} \cdot \Delta t = 7,5 \cdot 0,4286 = 3,2145$  мс. Таким образом, можно утверждать, что процессы в смежных каналах являются статистически зависимыми.

Для оптимального управления доступом к среде и распределения ресурсов в сети LTE необходимо представление процессов (состояние каналов) в виде математической модели.

### Математические модели марковских процессов

Векторный марковский процесс  $\vec{x}(t)$  можно представить в форме уравнений состояния:

$$\frac{d \vec{x}(t)}{dt} = F(t) \vec{x}(t) + G(t) \vec{x}(t), \quad (6)$$

где  $\vec{x}(t)$  – вектор состояния, который зависит от времени;  $F(t), G(t)$  матрицы (для одномерного случая коэффициенты) состояния и возбуждения соответственно;  $\vec{x}(t)$  – порождающее векторное белое гауссовское поле с нулевым средним.

Для стационарного случая коэффициенты  $F, G$  не зависят от времени. Коэффициенты  $F$  имеют физический смысл величин, обратных интервалу корреляции  $t_{kor}$  процесса  $x(t)$ . Для одномерного случая:

$$F = -a = -\frac{1}{t_{kor}}.$$

Коэффициенты  $G$  определяют масштаб случайных изменений процесса  $x(t)$ :

$$G = \sqrt{2as^2},$$

где  $a = 1/t_{kor}$ ,  $s^2$  – спектральная плотность мощности порождающего процесса  $x(t)$ .

Для дискретного представления система уравнений состояния имеет вид:

$$\vec{x}(k+1) = F \cdot \vec{x}(k) + G \cdot \vec{x}(k), \quad (7)$$

где  $F$  – матрица состояния с элементами  $f_{ij} = \exp\{-a_{ij}\Delta t\}$ ,  $a_{ij} = 1/t_{korij}$ ,  $\Delta t = k - (k-1)$  – шаг;  $G$  – матрица возбуждения с элементами  $g_{ij} = \sqrt{s^2 f_{ij}(1 - f_{ij})}$ .

Система уравнений (7) может распасться на  $n$  независимых одномерных систем, когда коэффициенты  $f_{ij}$  и  $g_{ij}$ , играющие роль связей между  $i$  и  $j$  уравнениями, а следовательно и процессами, приобретают значения  $f_{ij}=0$  и  $g_{ij}=0$  при  $i \neq j$ . Уровень этих связей может изменяться под действием управляющих воздействий.

Представим двумерную модель состояния каналов

$$h^2(k+1) = F \cdot h^2(k) + G \cdot \vec{x}(k), \quad (8)$$

где  $h^2$  – ОСПШ в канале.

Матрица состояния  $F$  представляется в виде:

$$F = \begin{pmatrix} \exp(-a_{11}\Delta t) & \exp(-a_{12}\Delta t) \\ \exp(-a_{21}\Delta t) & \exp(-a_{22}\Delta t) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где  $a_{11} = \frac{1}{t_{kor11}}$ ,  $a_{12} = \frac{1}{t_{kor12}}$ ,  $a_{21} = \frac{1}{t_{kor21}}$ ,  $a_{22} = \frac{1}{t_{kor22}}$ ,  $\Delta t$  - шаг.

При  $\Delta t = 1$  и полученным данным  $a_{ij}$  нормированная матрица состояния выглядит так:

$$F = \begin{pmatrix} 0.5253 & 0.4822 \\ 0.4822 & 0.5102 \end{pmatrix}.$$

Матрица возбуждения  $G$  представляется в виде:

$$G = \begin{pmatrix} \sqrt{s_{11}^2 f_{11}(1-f_{11})} & \sqrt{s_{12}^2 f_{12}(1-f_{12})} \\ \sqrt{s_{21}^2 f_{21}(1-f_{21})} & \sqrt{s_{22}^2 f_{22}(1-f_{22})} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $f_{ij} = \exp(-a_{ij}\Delta t)$ .

При значениях дисперсий  $s_{11}^2 = 33.2875$ ,  $s_{12}^2 = s_{21}^2 = 19$ ,  $s_{22}^2 = 27.0391$  нормированная матрица возбуждения выглядит так:

$$G = \begin{pmatrix} 0.5852 & 0.4424 \\ 0.4424 & 0.5280 \end{pmatrix}.$$

Модель (8) дополняется уравнениями наблюдения. Модель наблюдения задается системой линейных алгебраических соотношений:

$$\vec{y}(k) = H \cdot \left( \vec{h}^2(k) + \vec{m} \right) + \vec{n}(k) \quad (11)$$

где  $H$  – матрица, которая задает ослабление измеряемых процессов; шум наблюдения  $\vec{n}(k)$  является векторным белым гауссовским шумом с дисперсией  $s_n^2$  и нулевым средним;  $\vec{m}$  – вектор средних значений.

### Выводы

1. В сети LTE каждые 0,5 мс производятся измерения характеристик канала и каждые 40 мс отправляются отчеты о средних значениях измеренных параметров.

2. Для предоставления доступа и распределения ресурсов абонентам может производиться измерение таких показателей: средней мощности принятых пилотных сигналов; качество принятых пилотных сигналов; отношение мгновенной скорости передачи данных к средней скорости; отношение мощности сигнала к мощности помех и мощности шума (ОСПШ). Наиболее наглядным показателем является ОСПШ, так как первый и второй показатели не учитывают мощностей помех в каналах, а третий показатель является производным показателем от ОСПШ. Поэтому для измерений и оценок показателей качества каналов LTE сетей рациональнее воспользоваться показателем ОСПШ.

3. Проведены измерения ОСПШ восходящего канала в частотном диапазоне 1920 – 1980 МГц на смежных частотах 1920000 кГц и 1920015 кГц. По полученным выборкам рассчитаны их средние значения и дисперсии. Построены автокорреляционные функции данных выборок и взаимные корреляционные функции. Максимальные значения  $R_{\max}$  эти функции имеют при

значении временного сдвига  $t = 0$  и медленно убывают с увеличением временного сдвига. Судя по графикам, можно сделать вывод о том, что они имеют экспоненциальный вид. В соответствии с теоремой Дж. Дуба можно утверждать, что полученные процессы являются марковскими.

4. По экспериментальным графикам корреляционных функций построены аппроксимированные экспоненты, с помощью которых определены интервалы корреляции и интервалы взаимной корреляции. Для процесса 1 интервал корреляции составляет  $t_{kor11} = 21$  временной сдвиг, что соответствует временному интервалу  $t_{kor11} \cdot \Delta t = 21 \cdot 0,4286 = 9,0006$  мс. Для процесса 2 интервал корреляции составляет  $t_{kor22} = 13$  временных сдвигов, что соответствует временному интервалу  $t_{kor11} \cdot \Delta t = 13 \cdot 0,4286 = 5,5718$  мс. Интервал взаимной корреляции составляет  $t_{kor} = 7,5$  временных сдвигов. Следовательно, во времени он составляет  $t_{kor} \cdot \Delta t = 7,5 \cdot 0,4286 = 3,2145$  мс. Таким образом, можно утверждать, что процессы в смежных каналах являются статистически зависимыми.

5. Предложено процессы, происходящие в каналах, аппроксимировать в виде многомерной марковской модели в виде уравнений состояния и уравнений наблюдения. На основании рассчитанных по полученным выборкам средних значений процессов, дисперсий и интервалов корреляций разработана двумерная модель уравнений состояния и уравнений наблюдения.

1. Лихтциндер Б. Я. *Интеллектуальные сети связи* / Б. Я. Лихтциндер, М. А. Кузякин, А. В. Росляков, С. М. Фомичев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 200 с. 2. Олифер В. *Искусство оптимизации трафика* / В. Олифер, Н. Олифер. – М., 2001. – С. 38–47. 3. Бакланов И. Г. *Технологии измерений в современных телекоммуникациях* / И. Г. Бакланов – М.: Эко-Трендз, 1997. 4. Иванов А. Б. *От сквозного контроля сети к контролю качества услуг* / А. Б. Иванов, И. В. Соколов // *Электросвязь*. – 2001. – № 2. – С. 37–41. 5. Новиков И. О. *Анализ точности оценки измеряемых параметров в задачах управления сетевыми элементами LTE сети* / И. О. Новиков // *Тезисы доклада 67-й научно-техн. конф. Одесской нац. академии связи им. А. С. Попова*. – 2012. – Том 2. – С. 62–64. 6. Гельгор А. Л. *Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие* / Гельгор А. Л., Попов Е. А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с. 7. ITU-R, *International mobile telecommunications-2000 (IMT-2000), Recommendation ITU-R M.687-2, February 1997*. 8. ITU-R, *Detailed specifications of the radio interfaces of international mobile telecommunications-2000 (IMT-2000), Recommendation ITU-R M.1457-9, May 2010*. 9. ITU-R, *Principles for the process of development of IMT-advanced, Resolution ITU-R 57, October 2007*. 10. 3GPP, *3rd generation partnership project; Technical specification group radio access network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 7), 3GPP TR 25.913*. 11. Dahlman E. *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband* / Dahlman E., Parkvall S., Skold J. / Academic Press is an imprint of Elsevier., 2011. – 431 p.