

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СЛОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПЕРЕДАЧИ OFDM/QAM И OFDM/OQAM

Рассмотрены математическая модель и особенности формирования сигналов OFDM/OQAM, проведена оценка увеличения сложности реализации OFDM/OQAM в сравнении с OFDM/QAM, проведено сравнение спектральных эффективностей OFDM/OQAM и OFDM/QAM.

Ключевые слова: OFDM, QAM, OQAM, циклический префикс, ICI, ISI, ортогональный базис, хорошо локализованные импульсные фильтры.

О.А. ORYABINSKAYA

Odessa National Academy of Telecommunication named after A.S. Popov

SPECTRAL EFFICIENCY AND IMPLEMENTATION COMPLEXITY METHOD OF TRANSMITTING OFDM / QAM AND OFDM / OQAM

Abstract – The features and mathematical model of signal generation OFDM/OQAM, assessed the implementation of increasing complexity OFDM/OQAM compared with OFDM/QAM, the comparison of the spectral efficiencies of OFDM/OQAM and OFDM/QAM.

Keywords: OFDM, QAM, OQAM, cyclic prefix, ICI, ISI, orthogonal basis, well localized pulse filters.

Состояние проблемы. В настоящее время одним из наиболее перспективных решений в области высокоскоростной передачи данных по каналам мобильной связи является использование технологии OFDMA (множественный доступ с ортогонально-частотным разделением). Обычная OFDM/QAM система достаточно устойчива к многолучевому распространению сигнала, за счет использования защитного интервала, который образуется циклическим префиксом. Однако этот защитный интервал уменьшает спектральную эффективность системы на соответствующую величину.

Целью данной работы является оценка эффективности использования OFDM/OQAM с точки зрения спектральной эффективности и сложности реализации.

Математическая модель сигналов OFDM/QAM и OFDM/OQAM. В канальном символе QAM-M информация закладывается в амплитуде и начальной фазе. Для распознавания канального символа в случае канала с быстрыми частотно-селективными замираниями необходима сложная обработка. Если QAM-M реализуется в канале связи посредством OFDM, то принципиальным является вопрос выбора базиса при формировании сигнала. В существующих системах связи с сигналами OFDM/QAM используется базис на основе обратного преобразования Фурье, использующий прямоугольные базисные функции с дальнейшим ограничением спектра оконной функцией. Данный базис обеспечивает распознавание элементов сигнала при наличии соответствующей внешней синхронизации, поскольку является хорошо локализованным во временной области, и обладает ортогональностью в частотной. Ортогональность между базисными функциями, как правило, получают с использованием либо временного, либо частотного ограничения функции прототипа. Например, прямоугольные функции, обладающие медленно спадающим спектром ограничивают с помощью временного окна функцией половины косинуса. Для сохранения ортогональности в частотной области базисные функции растягивают во времени за счет циклического префикса и получают ортогональный относительно быстро спадающий по частоте и локализованный по времени базис, используемый в системах OFDM/QAM рис. 3 а). Попытки замены ортогонального базиса, приводили к сильной потере спектральной эффективности, так как согласно теореме Балиан-Лоу, невозможно использовать хорошо локализованные базисные функции в случае высокой частотно-временной плотности, когда спектральная эффективность максимальна $TF = 1$ [1]. Снижение спектральной эффективности является нежелательным для устройств, в которых требуется высокоскоростная передача данных. Из теории Габора о базисных функциях – основной недостаток OFDM/QAM-систем, заключается в том, что невозможно создать хорошо локализованные импульсные фильтры в случае высокой частотно-временной плотности, т. е. в случае высокой спектральной эффективности [1]. При использовании таких систем требуется придерживаться компромисса между локализацией импульсных фильтров и спектральной эффективностью.

Для достижения лучшей спектральной эффективности одновременно с улучшением ISI/ICI была предложена другая OFDM-схема с использованием QAM со сдвигом (OQAM – offset QAM). Данный метод позволил получить наилучшее частотно-временное уплотнение модулирующих символов, что обеспечило сохранение ортогональности даже в случае максимальной частотно-временной плотности $TF = 1$ [1]. Использование временного сдвига между передачей действительной и мнимой части QAM-символа (квадратурная амплитудная модуляция со сдвигом Offset QAM (OQAM)) позволило использовать хорошо локализованный базис, сохранив максимальную спектральную эффективность.

Как вариант базисной функции была попытка использовать идеально локализованную функцию Гаусса рис. 3 б). Существенным недостатком такой функции является то, что функция не является ортогональной как во временной, так и в частотной области. В результате спектральная эффективность

снижается, в сравнении с базисом половины косинуса. Другой подход, использующий формирование хорошо локализованного базиса получил название алгоритм изотропного ортогонального преобразования (ЮТА). Данный алгоритм построения базиса основан на синтезе базиса Вейля-Гейзенберга, в основе которого лежит сингулярное разложение матрицы базиса Габора. Получаемый базис обладает хорошей локализацией одновременно во временной и частотной области за счет близости его инициализирующего импульса к идеально локализованной функции Гаусса. В отличие от базиса на основе идеально локализованной функции Гаусса ЮТА-базис обладает ортогональностью, что обеспечивает такую же спектральную эффективность как система OFDM/QAM без учета потерь за счет циклического префикса рис. 3 в) [2].

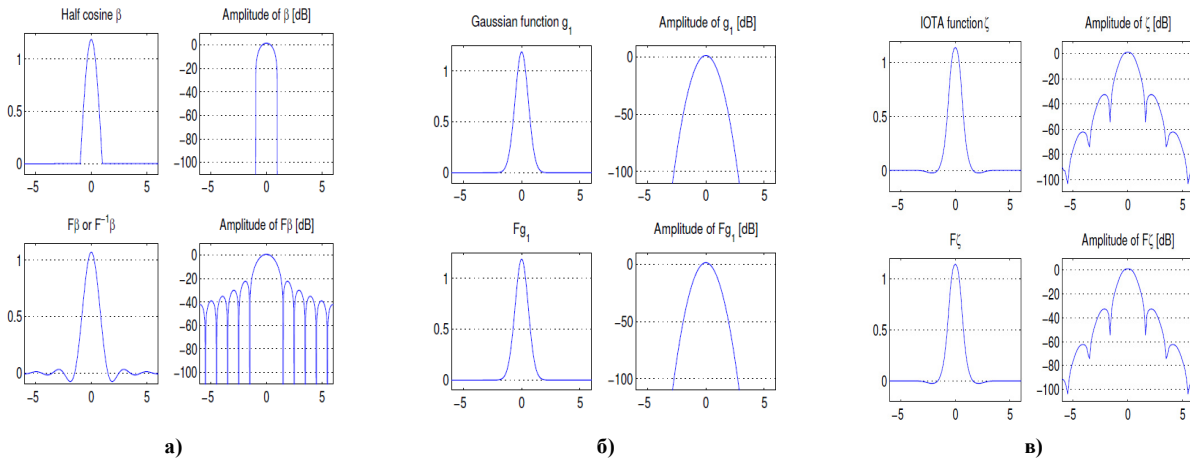


Рисунок 3 – Базисные функции и их преобразования Фурье в линейном и логарифмическом масштабе (а) – функцией половины косинуса; б) – идеально локализованной функции Гаусса; в) – ЮТА функция

Особенности формирования OFDM/OQAM. При формировании сигнала OFDM/OQAM символы QAM (c_{mn}) разделяются на две комплексные составляющие: вещественную часть $\text{Re}\{c_{mn}\} = a_{mn}$ и мнимую $\text{Im}\{c_{mn}\} = b_{mn}$, причем мнимая часть сдвигается во времени на величину $T/2$ относительно вещественной.

Классический OFDM сигнал записывается в виде выражения (без учета циклических префиксов) [2]:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \sum_{m=0}^{m=N-1} c_{mn} e^{j2\pi m \Delta f t} g(t - nT), \quad (1)$$

где $g(t - nT) = \begin{cases} 1, & nT < t < (n+1)T \\ 0, & t < nT, \quad t > (n+1)T \end{cases}$ – прямоугольный видеоимпульс.

Формирование сигнала OFDM/OQAM при разложении c_{mn} на комплексные составляющие может быть представлено выражением:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \sum_{m=0}^{m=N-1} a_{mn} j^m e^{j2\pi m \Delta f t} g(t - nT) + j b_{mn} j^m e^{j2\pi m \Delta f t} g(t + T/2 - nT) = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \sum_{m=0}^{m=N-1} a_{mn} j^m e^{j2\pi m \Delta f t} g(t - nT) + b_{mn} j^{m+1} e^{j2\pi m \Delta f t} g(t + T/2 - nT). \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение (2) можно упростить

$$s(t) = \sum_n \sum_{m=0}^{N-1} d_{m,n} j^{m+n} e^{j2\pi m \Delta f t} \mathfrak{T}(t - n\tau_0) = \sum_n \sum_{m=0}^{N-1} d_{m,n} \mathfrak{T}_{m,n}(t), \quad \tau_0 = T/2 \quad (3)$$

где

- $d_{m,n} = a_{m,n}$ или $b_{m,n}$ в зависимости от значения n ;
- j^{m+n} определяет тип слагаемого: real (если $m+n$ четное) или imaginer (если $m+n$ нечетное);
- $\mathfrak{T}_{m,n}(t)$ – фильтрующая функция ЮТА (Isotropic Orthogonal Transfer Algorithm), обеспечивающая ортогональность поднесущих в OFDM-символе, а также OFDM-символов.

Для функции $\mathfrak{T}_{m,n}(t)$ справедливо выражение $\text{Re} \left\{ \int_{\mathfrak{R}} \mathfrak{T}_{m,n}(t) \cdot \mathfrak{T}_{m',n'}^*(t) dt \right\} = \delta_{m,m'} \delta_{n,n'}$ [2].

Важным отличием OFDM/OQAM от сигнала OFDM/QAM является использование многофазной

фільтрації (используется фильтрующая функция ЮТА – $\mathfrak{F}_{m,n}(t)$) которая позволяет исключить использование циклических префиксов после преобразования IFFT. На рис. 1 показана частотно-временная матрица комплексных сигналов OFDM/QAM а) и OFDM/OQAM б) [3].

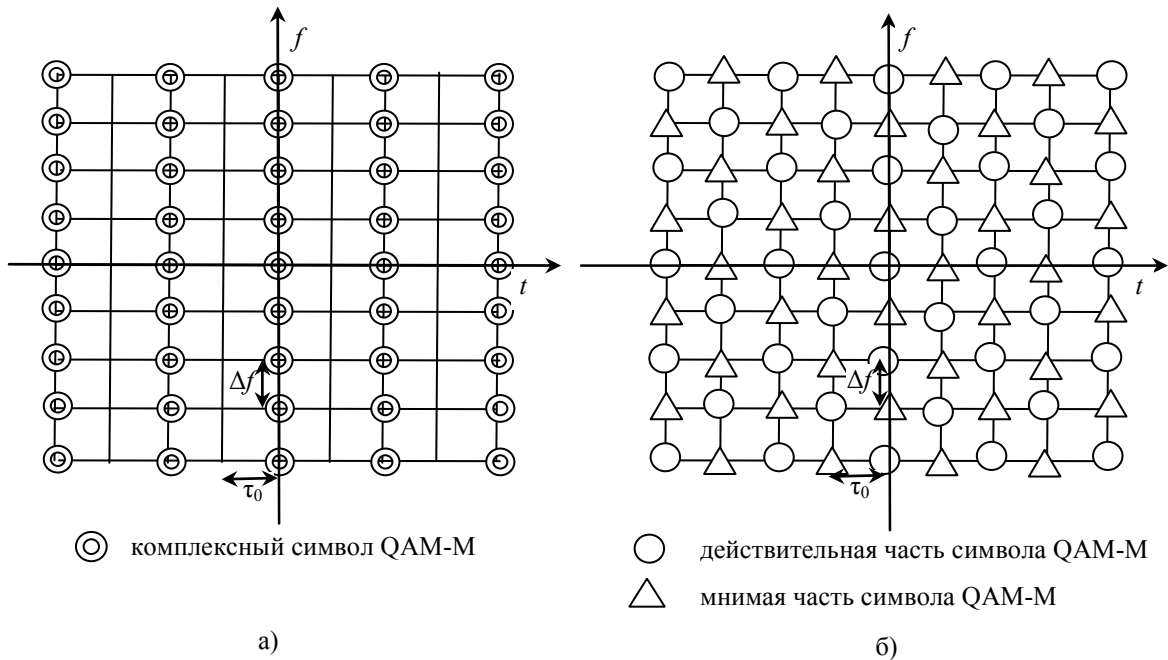


Рис. 1. Частотно-временная матрица формирования а) OFDM/QAM, б) OFDM/OQAM

Алгоритм функционирования передатчика и приемника сигналов OFDM/OQAM представлен на рис. 2 [3]. Первым этапом является преамбуляция, которая обеспечивает чередование мнимой и действительной частей QAM-символа, как во времени, так и по частоте. В схеме, приведенной на рис. 2, модулятор генерирует N вещественных символов (real) через $\tau_0 = T/2$. Затем (до преобразования IFFT) они мультиплексируются с учетом составляющей i^{m+n} , которая при четном $m+n$ является вещественной, при не четном – мнимой (при этом значения могут быть как положительными, так и отрицательными). Затем выполняется N -точечное обратное преобразование Фурье. Прямая реализация OFDM/OQAM системы на базе фильтров с конечными импульсными характеристиками (КИХ) на каждой ветви поднесущей приводит к значительным задержкам, что недопустимо при передаче сигналов реального времени [2]. Эффективной структурой системы фильтрации является использование так называемой многофазной (полифазной) фильтрации. Полифазное разложение может быть использовано для того, чтобы реализовать равномерный ДПФ банк фильтров, который за счет эффекта распараллеливания позволяет при разложении на N полифазных компонент, сократить объем вычислений в единицу времени для каждого фильтра в N раз. Также преимуществом такой системы является возможность использования более длинного фильтра $G_0(z)$ при неизменном размере матрицы ДПФ.

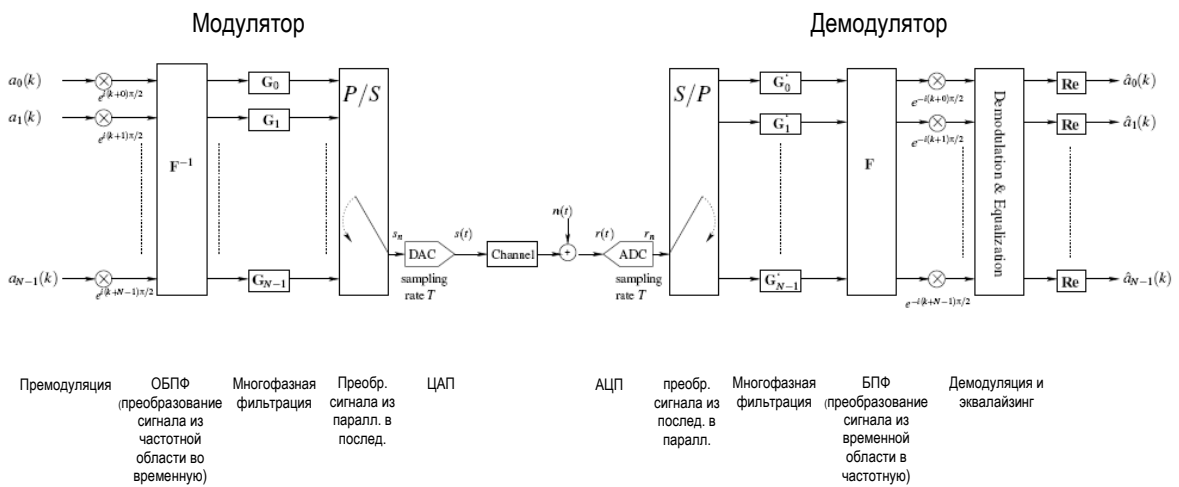


Рис. 2. Алгоритм функционирования передатчика и приемника сигналов OFDM/OQAM

На приемной стороне снова выполняется многофазная согласованная фильтрация, затем

выполняется N -точечное преобразование Фурье и фазирование сдвинутых компонент QAM-символа. Для устранения ISI выполняется амплитудно-фазовая коррекция, после чего выносится решение о переданном канальном символе.

Анализ спектральной эффективности. Оценку спектральной эффективности проводим на основании стандартов для LTE сети, так как в ней предусмотрены оба режима OFDM/QAM и OFDM/OQAM. Оценка спектральной эффективности определяется по формуле [4]

$$\gamma = \frac{C}{\Delta F}, \text{ (бит·с)/Гц.} \quad (4)$$

Предварительно необходимо оценить пропускную способность в заданной полосе ΔF .

В LTE системе данные передаются блоками (так называемыми кластерами) в частотно-временной области. Каждый кластер обрабатывается (кодируется и декодируется) независимо и характеризуется следующими величинами: N_s – число несущих; N_t – число OFDM-символов; N_p – число пилотных несущих, n – уровень модуляции (битовая загрузка символа), $R_{\text{код}}$ – скорость кода [3].

Кластер состоит из $N_s N_t$ символов. При этом общее число информационных символов равно $N_s N_t - N_p$. Если битовая загрузка символа составляет n , то общее число информационных бит, переданных при помощи одного кластера, равно $I_{\text{кластера}} = R_{\text{код}} n (N_s N_t - N_p)$.

Учтем, что длительность OFDM-символа равна T . Тогда число информационных бит, переданных за единицу времени (секунду) составляет $I = \frac{I_{\text{кластера}}}{N_t T}$ или $I = \frac{I_{\text{кластера}} \Delta f}{N_t}$, где $\Delta f = 1/T$ – частота прохождения символов.

Обозначим PER (packet error rate) – вероятность ошибки передачи пакета (кластера). Если все биты в пакете декодированы верно, то данный пакет считаем переданным правильно. У случае, если хотя бы один бит в пакете с ошибкой, считается, что пакет передан с ошибкой. Тогда ошибка передачи пакета определяется отношением числа ошибочно переданных пакетов к общему числу пакетов.

Пропускная способность, обеспечиваемая в одном ресурсном блоке без учета циклического префикса [4]:

$$C = (1 - \text{PER}) I = (1 - \text{PER}) R_{\text{код}} n (N_s N_t - N_p) \Delta f / N_t \quad (5)$$

где PER (packet error rate) – вероятность ошибки передачи пакета. В полосе 10 МГц предусмотрена возможность передачи одновременно 50 ресурсных блоков.

Добавление циклического префикса равноценно снижению пропускной способности на величину T_{cp} / T , где T_{cp} – длительность циклического префикса. Рассчитаем потенциальные пропускные способности системы LTE (PER $\rightarrow 0$) в различных режимах работы. Результаты занесены в табл. 1. В расчетах учтем, что $T_{\text{cp}} = 5,21$ мкс для первого OFDM-символа и $T_{\text{cp}} = 4,69$ мкс для следующих шести OFDM-символов. Таким образом среднее значение $T_{\text{cp}} = 4,764$ мкс. Также в системе LTE предусмотрен разнос между поднесущими $\Delta f = 15$ кГц и $T = 66,67$ мкс [3].

Таблица 1

Сравнение потенциальных спектральных эффективностей систем OFDM/OQAM и OFDM/QAM с коротким циклическим префиксом в LTE

Модуляция	$R_{\text{код}}$	n	N_s	N_t	N_p	Выделенная полоса, МГц	C, Мбит/с для полосы в 10 МГц		γ , бит·с/Гц спектральная эффективность	
							OFDM/OQAM	OFDM/QAM	OFDM/OQAM	OFDM/QAM
ФМ-4	1/2	2	8	12	8	10	5,5	5,12	0,55	0,512
ФМ-4	3/4	2					8,25	7,67	0,825	0,767
КАМ-16	1/2	4					11	10,23	1,1	1,023
КАМ-16	3/4	4					16,5	15,35	1,65	1,535
КАМ-64	2/3	6					22	20,46	2,2	2,046
КАМ-64	3/4	6					24,75	23,02	2,475	2,302

Оценка сложности реализации. В случае OFDM/QAM сложность реализации определяется количеством операций БПФ и составляет порядка $O(N \log_2 N)$ операций [5]. В системах с OFDM/OQAM к необходимым операциям БПФ добавляются операции необходимые для осуществления полифазной фильтрации.

Предположим, функция форма импульса прототипа $\mathfrak{S}_{m,n}(t)$ (или его усечение) имеет конечную

длительность в интервале $-M\tau_0 \leq t \leq M\tau_0$, его дискретный вариант $g_k[n]$ отличен от нуля при $n = -MN/2, \dots, MN/2$, следовательно, длина $g_k[n]$ будет $MN + 1$. Для того чтобы иметь то же самое число отводов в каждом фильтре компонента, мы просто отбрасываем последнюю выборку $g_k[n]$ так, чтобы длина каждого фильтра компонента была равна M [5].

Для синтеза сигнала OFDM/OQAM необходимо умножить матрицу базиса на вектор информационных символов. Эта операция требует $(2M-1)M$ комплексных сложений и $2M^2$ комплексных умножений [5].

Процесс демодуляции кроме такого же числа комплексных сложений и умножений, как для модуляции, требуется еще произвести операцию взятия реальной части вектора, что требует еще $4M^2$ действительных умножений и $(4M^2 - 3M)$ действительных сложений [5].

Т.о. для проведения модуляции и демодуляции требуется порядка $O(M \log_2 N + 16M^2 - 4M)$ операций, что, конечно, значительно больше классической OFDM схемы.

Выводы. В этой работе проведен анализ потенциальной спектральной эффективности методов передачи OFDM/OQAM и OFDM/QAM реализованных в системе LTE, а также оценено увеличение сложности реализации OFDM/OQAM, за счет применения фильтрации. Метод передачи OFDM/OQAM за счет хорошей локализации во времени и по частоте, в отличие от традиционной OFDM/QAM, не требует наличия защитных интервалов (циклических префиксов), что повышает спектральную эффективность (рис. 1, табл. 1). Использование фильтрации усложняет реализацию на порядка $O(16M^2 - 4M)$ операций. Как видим чем выше порядок фильтра, тем больше требуется вычислительного ресурса.

Литература

1. Волчков В.П. Новые технологии передачи и обработки информации на основе хорошо локализованных сигнальных базисов / В.П. Волчков // Научные ведомости БелГУ Серия "Информационные – телекоммуникационные технологии" № 15 (70) – Белгород: Изд-во БелГУ, 2009 – С. 182-189
2. Jinfeng Du, Svante Signell Classic OFDM Systems and Pulse Shaping OFDM/OQAM Systems // Electronic, Computer, and Software Systems Information and Communication Technology KTH - Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden // TRITA-ICT/ECS R 07:01 ISSN 1653-7238 ISRN KTH/ICT/ECS/R-07/01-SE
3. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
4. Ермолаев В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи (Электронное методическое пособие) Учебная дисциплина: – Теория электрической связи / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Национальный исследовательский университет, Нижний Новгород 2010, 107 с.
5. Волчков В.П. Оптимизация ортогонального базиса Вейля-Гейзенберга для цифровых систем связи, использующих принцип FDM/OQAM передачи / В.П. Волчков, Д.А. Петров // Научные ведомости БелГУ Серия " История Политология Экономика Информатика" № 1 (56) Выпуск 9/1 – Белгород: Изд-во БелГУ, 2009 – С. 104-114 f-sur-Yvette, France Received 1 August 2001; received in revised form 1 February 2003

References

1. V.P. Volchkov Novyie tehnologii peredachi i obrabotki informatsii na osnove horosho lokalizovannyih signalnyih bazisov// Nauchnyie vedomosti BelGU Seriya "Informatsionnyie – telekommunikatsionnyie tehnologii" № 15 (70) – Belgorod: Izd-vo BelGU, 2009 – P. 182-189
2. Jinfeng Du, Svante Signell Classic OFDM Systems and Pulse Shaping OFDM/OQAM Systems // Electronic, Computer, and Software Systems Information and Communication Technology KTH - Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden // TRITA-ICT/ECS R 07:01 ISSN 1653-7238 ISRN KTH/ICT/ECS/R-07/01-SE
3. Tihvinskiy V.O., Terentev S.V., Yurchuk A.B. Seti mobilnoy svyazi LTE: tehnologii i arhitektura. – М.: Eko-Trendz, 2010. – 284 p.
4. Ermolaev V.T. Flaksman A.G. Teoreticheskie osnovy obrabotki signalov v sistemah mobilnoy radiosvyazi (Elektronnoe metodicheskoe posobie) Uchebnaya distsiplina: – Teoriya elektricheskoy svyazi– Nizhegorodskiy gosudarstvennyiy universitet im. N.I. Lobachevskogo Natsionalnyiy issledovatel'skiy universitet, Nizhniy Novgorod 2010, 107 p.
5. V.P. Volchkov, D.A. Petrov Optimizatsiya ortogonalnogo bazisa Veylya-Geyzenberga dlya tsifrovyyih sistem svyazi, ispolzuyuschih printsip FDM/OQAM peredachi // Nauchnyie vedomosti BelGU Seriya " Istoriya Politologiya Ekonomika Informatika" № 1 (56) Vyipusk 9/1 – Belgorod: Izd-vo BelGU, 2009 – P. 104-114 f-sur-Yvette, France Received 1 August 2001; received in revised form 1 February 2003

Рецензія/Peer review : 10.5.2015 р.

Надрукована/Printed :22.6.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією