

УДК 621.396.41

Д.Ю. Майков, А.Я. Демидов, Н.А. Каратаева, Е.П. Ворошилин

## Оценка сдвига частоты для процедуры Initial Ranging в системе «мобильный WiMax»

Предложен алгоритм оценки смещения частоты сигнала абонентской станции, для процедуры Initial Ranging в системе «мобильный WiMax». Проведено статистическое моделирование алгоритма, предложены способы повышения точности оценки.

**Ключевые слова:** OFDMA, сдвиг частоты, моделирование.

В настоящее время идет бурное развитие сети 4-го поколения «мобильный *WiMax*», которая основана на использовании технологии OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с ортогональным частотным разделением). Для этой системы характерна процедура Initial Ranging (IR), т.е. процедура начальной настройки абонентской станции (АС), путем передачи базовой станцией (БС) команд управления временным положением и частотой OFDMA-сигнала АС, основанных на оценке базовой станцией соответствующих параметров IR сигнала АС.

IR-сигнал формируется на основе 144-элементной псевдослучайной последовательности (ПСП) и выбирается из сформированного, согласно стандарту [1], ансамбля. При случайном доступе коллизии между IR-сигналами АС разрешаются методом кодового разделения каналов (CDMA).

Для IR-сигнала, обладающего сдвиговой симметрией во времени, стандарт предусматривает два типа конструкций, состоящих из двух (рис. 1) или четырех (рис. 2) OFDMA-символов [1]. При отсутствии смещения частоты в канале такой же симметрией будут обладать взаимно корреляционные функции (ВКФ) IR-сигналов, принятых от АС и опорного сигнала БС.

Нами предлагается метод оценки смещения частоты в многолучевом частотно-селективном канале, основанный на нарушении сдвиговой симметрии, проявляющейся в появлении фазовой асимметрии между ВКФ, сдвинутыми на интервал, кратный длительности OFDMA-символа.

Этой процедуре предшествует процесс обнаружения IR-сигнала и оценка его временного положения.

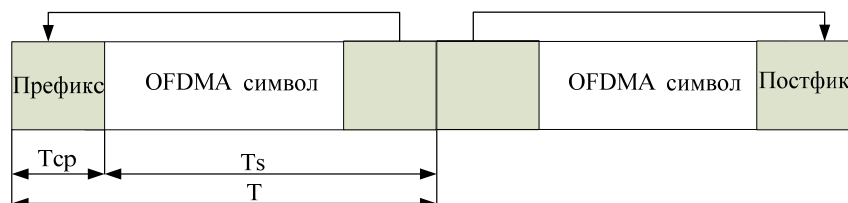


Рис. 1. Двухсимвольный IR-сигнал

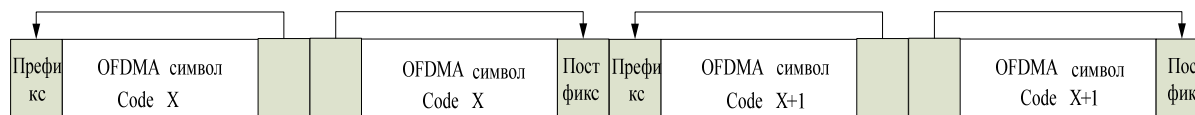


Рис. 2. Четырехсимвольный IR-сигнал

Предлагаемый метод оценки смещения частоты для одной АС будем рассматривать в одно-сигнальном приближении. Влияние системной помехи в многосигнальном режиме учитывается нами при моделировании.

АС формирует IR-сигнал путем преобразования входного потока данных (CDMA-код) в BPSK-код и последующую запись BPSK-кода как спектральных коэффициентов обратного дискретного преобразования Фурье (IFFT) (рис. 3).

$$C_k = I_k + j0, \quad (1)$$

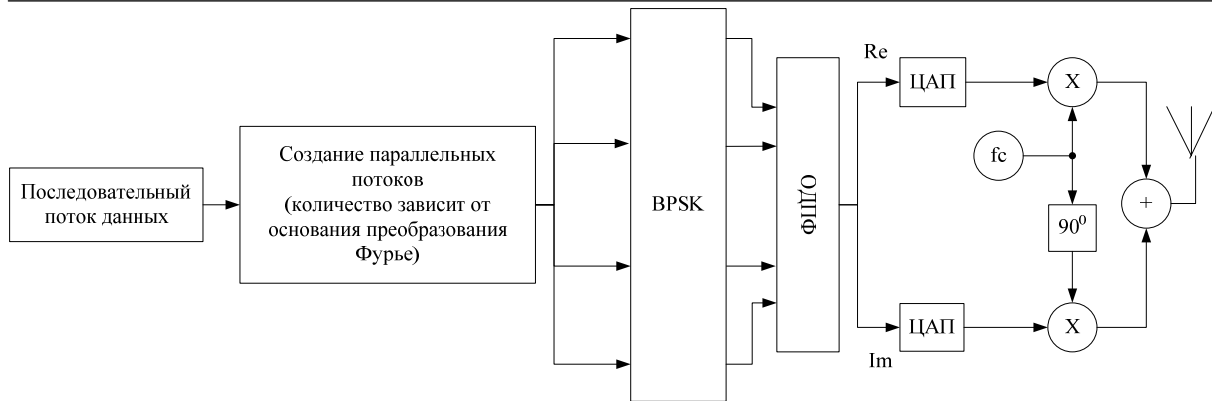


Рис. 3. Функциональная схема формирователя OFDMA-сигналов

После обработки подготовленного массива с помощью ОДПФ формируются отсчеты квадратурных составляющих (комплексный сигнал):

$$A(n) = IFFT[C_k = I_k + jQ] = I(n) + jQ(n). \quad (2)$$

Здесь  $I(n) = I(-n)$  и  $Q(n) = -Q(-n)$ .

На БС поступает сигнал

$$\tilde{A}(n) = A(n) \otimes h(n, l), \quad (3)$$

где  $\otimes$  – знак свертки;  $h(n, l)$  – импульсная характеристика канала РРВ.

При моделировании алгоритма оценки нами использованы характеристики шестилучевого канала, приведенные в таблице.

#### Характеристики канала связи [2]

Номер луча	Канал Б	
	Относительная задержка, нс	Средняя мощность, дБ
1	0	0
2	200	-0,9
3	800	-4,9
4	1200	-8,0
5	2300	-7,8
6	3700	-23,9

$$h(n, m) = \sum_{i=1}^k \gamma_i(n) \delta(m - m_i(n)). \quad (4)$$

Здесь  $\gamma_i(n), m_i(n)$  – зависящие от времени комплексные коэффициенты пропорциональности и зависящие от времени задержки лучей, причем в  $\gamma_i(n)$  входит смещение частоты в пределах  $0 \pm \frac{1}{T_s}$ , где  $T_s$  – интервал ортогональности (см. рис. 1) и случайная фаза  $(-\pi \dots \pi)$ .

В приемной части OFDMA-системы полезная часть принятого сигнала описывается выражением

$$\tilde{A}(n) = \sum_{i=1}^k \tilde{A}_i(n - n_{s_i}) = \sum_{i=1}^k \gamma_i(n) [\tilde{I}_i(n - n_{s_i}) + j\tilde{Q}_i(n - n_{s_i})] \cdot e^{j\Delta\hat{\omega}(n - n_{s_i})}, \quad (5)$$

где  $k$  – количество лучей;  $n_{s_i}$  – задержка в  $i$ -м луче;  $\Delta\hat{\omega}$  – нормированное смещение частоты.

Применяя прямое дискретное преобразование Фурье (FFT) к  $\tilde{A}(n)$ , получаем спектральное представление полезной части принятого сигнала:

$$\tilde{C}_k = \sum_{i=1}^6 \tilde{C}_{k_i} = FFT \left[ \sum_{i=1}^6 \tilde{A}_i(n - n_{s_i}) \right]. \quad (6)$$

Применив обратное дискретное преобразование Фурье к произведению BPSK-кода базовой станции и комплексно-сопряженного спектра (6) с таким же BPSK-кодом, принятым от АС, получим отсчеты взаимной корреляционной функции (ВКФ)  $R(n)$ , связывающей между собой коды БС и АС:

$$R_{BM}(n) = IFFT [C_k \cdot \tilde{C}_k^*]. \quad (7)$$

После обнаружения OFDMA-сигнала, измерения временной задержки  $\hat{\Delta t}$  выбранного луча значение ВКФ для него в точке можно приближенно представить как

$$R_{BM}(\hat{\Delta t}) = \left| \gamma(\hat{\Delta t}) \right| \cdot [\tilde{I}^2(\hat{\Delta t}) + \tilde{Q}^2(\hat{\Delta t})] \cdot e^{j(\Delta\omega \cdot T_s + \phi_\gamma)}, \quad (8)$$

где  $\text{Re}[R_{BM}(\hat{\Delta t})] = |\gamma(\hat{\Delta t})| \cdot [\tilde{I}^2(\hat{\Delta t}) + \tilde{Q}^2(\hat{\Delta t})] \cdot \cos(\Delta\omega \cdot T_s + \varphi_\gamma)$ ,

$$\text{Im}[R_{BM}(\hat{\Delta t})] = |\gamma(\hat{\Delta t})| \cdot [\tilde{I}^2(\hat{\Delta t}) + \tilde{Q}^2(\hat{\Delta t})] \cdot \sin(\Delta\omega \cdot T_s + \varphi_\gamma),$$

$\varphi_\gamma$  – случайная фаза;  $\hat{\Delta t}$  – оценка времени задержки сигнала;  $T_s$  – длительность OFDM символа.

Тогда из (8) оценка смещения частоты запишется как:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi \cdot T_s} \cdot \left\{ \text{arctg} \frac{\text{Im}[R_{BM}(\hat{\Delta t})]}{\text{Re}[R_{BM}(\hat{\Delta t})]} - \varphi_\gamma \right\}. \quad (9)$$

В оценку частоты (9) входит случайная фаза сигнала  $\varphi_\gamma$ , поэтому получить однозначную оценку сдвига частоты по одному OFDM-символу IR-сигнала невозможно. Для однозначной оценки частоты необходимо применять разностные схемы и использовать свойства симметрии IR-сигнала (рис. 1, 2).

Из рис. 2 видно, что код первой пары симметричных OFDM-символов отличается от кода второй пары симметричных символов. Так как символы имеют малую длительность, то многолучевой канал РРВ, который воздействует на две пары символов, остается неизменным и случайная фаза  $\varphi_\gamma$ , вносимая этим каналом, будет одинакова для всех символов. Чтобы исключить случайную фазу  $\varphi_\gamma$  из выражения (9), нужно рассчитать ВКФ для всех принятых символов с опорными последовательностями, после чего необходимо произвести операцию свертки двух ВКФ (одна из которых является комплексно-сопряженной) в пределах главного пика (10), который может быть найден при условии, что известна информация о временной задержке сигнала  $\hat{\Delta t}$  (рис. 4).

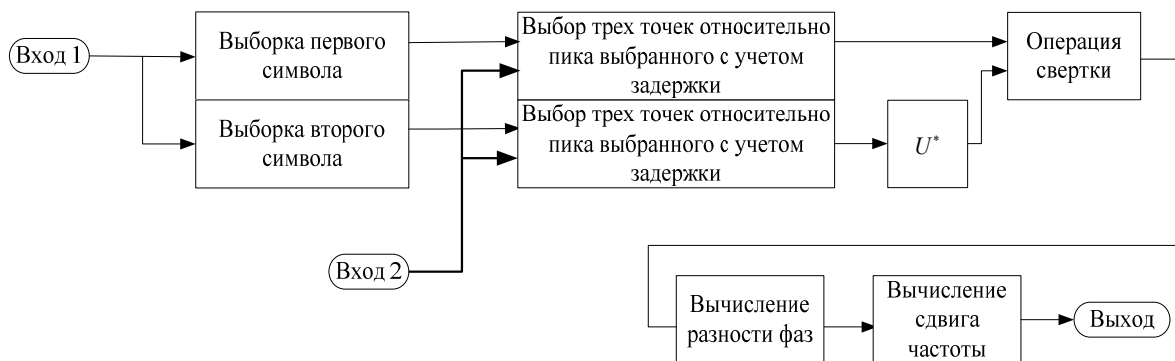


Рис. 4. Алгоритм оценки смещения частоты

$$\left. \begin{aligned} R_{12}(\hat{\Delta t}) &= R_1(\hat{\Delta t}) * R_2(\hat{\Delta t}) \\ R_{23}(\hat{\Delta t}) &= R_2(\hat{\Delta t}) * R_3(\hat{\Delta t}) \\ R_{34}(\hat{\Delta t}) &= R_3(\hat{\Delta t}) * R_4(\hat{\Delta t}) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

После этого, оценка частоты производится путем вычисления разности фаз  $\Delta\varphi$  :

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{12} &= \text{arctg} \left( \frac{\text{Im}(R_{12}(\hat{\Delta t}))}{\text{Re}(R_{12}(\hat{\Delta t}))} \right) \\ \Delta\varphi_{23} &= \text{arctg} \left( \frac{\text{Im}(R_{23}(\hat{\Delta t}))}{\text{Re}(R_{23}(\hat{\Delta t}))} \right) \\ \Delta\varphi_{34} &= \text{arctg} \left( \frac{\text{Im}(R_{34}(\hat{\Delta t}))}{\text{Re}(R_{34}(\hat{\Delta t}))} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где  $\Delta\varphi_{12}$ ,  $\Delta\varphi_{23}$ ,  $\Delta\varphi_{34}$  – разность фазы между соседними символами; Im и Re – значения мнимой и действительной частей свертки двух ВКФ, полученные в результате умножения взаимно корреляционной функции (ВКФ) одного символа с комплексно-сопряженной ВКФ соседнего.

Функциональная схема, изображенная на рис. 5, реализовывает предложенный алгоритм, описанный выше.

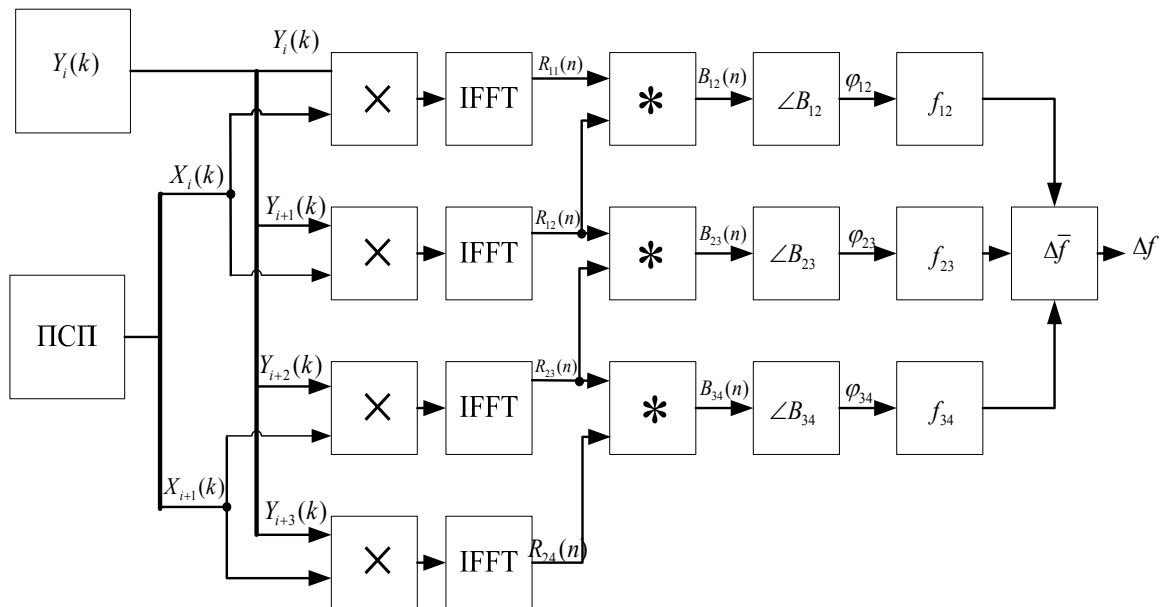


Рис. 5. Функциональная схема алгоритма оценки смещения частоты

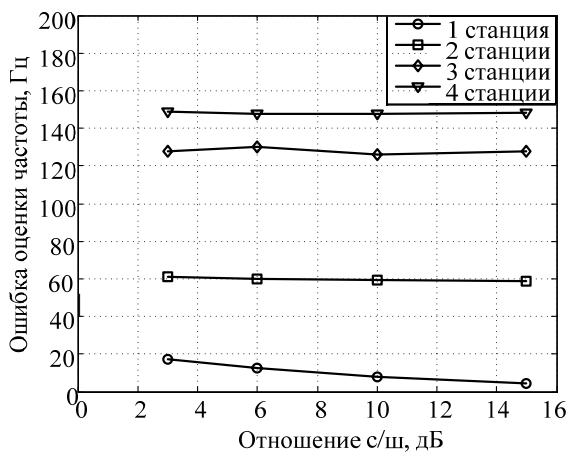


Рис. 6. Ошибка оценки частоты в зависимости от отношения с/ш

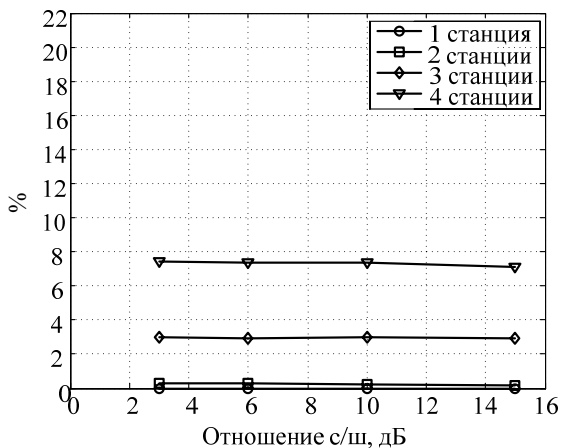


Рис. 7. Процент аномальных выбросов оценки частоты в зависимости от отношения с/ш

Для проверки предложенного алгоритма оценки смещения частоты проводилось моделирование в пакете MATLAB при разных значениях отношения с/ш и наличии канала РРВ с частотно-селективными замираниями. Метод был проверен в ситуации, когда процедура IR выполняется одновременно несколькими абонентами. Частотно-селективный канал для каждого абонента изменялся случайным образом в пределах данных, приведенных в таблице. Для выборки результатов измерений частоты рассчитывалось среднеквадратическое отклонение (СКО) при различных отношениях с/ш. Результаты моделирования приведены в виде зависимости СКО ошибки оценки частоты от отношения с/ш и изображены на рис. 6.

Также производился подсчет аномальных выбросов ошибки определения частоты. Аномальными здесь считаются ошибки оценки частоты, которые в петле управления частотой приводят к нарушению ортогональности (согласно стандарту IEEE 802.16e отклонения больше 2% от интервала между поднесущими приводят к нарушению ортогональности) и к межчастотной интерференции. Причиной таких выбросов может послужить неверная оценка временного сдвига либо совпадение CDMA-кодов разных абонентов. Результаты приведены в виде зависимости процента выбросов от отношения с/ш и изображены на рис. 7.

Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм устойчив к искажениям, вызванным многолучевым каналом РРВ. На его работу значительное влияние оказывает системная помеха, вносимая сигналами АС, одновременно участвующими в процедуре Initial Ranging, что объясняется недостаточно хорошими свойствами ВКФ CDMA-кодов АС.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки по контракту 13.G25.31.0011 от 7 сентября 2010 г. в соответствии с Постановлением № 218 Правительства России.

*Литература*

1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems 802.16-2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/802.16-2009.pdf>, свободный (дата обращения: 20.08.2011).

2. Recommendation ITU-R V M.1225 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itu.int/oth/R0A0E00000C/en>, свободный (дата обращения: 15.08.2011).

---

**Майков Денис Юрьевич**

Студент каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: 8-923-409-06-85

Эл. почта: dum\_tusur@mail.ru

**Демидов Анатолий Яковлевич**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. телекоммуникации основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа

Тел.: 8-913-840-36-28

Эл. почта: rtf@tu.tusur.ru

**Каратаева Нина Александровна**

Канд. техн. наук, профессор каф. ТОР ТУСУРа

Тел.: 8-960-977-98-27

Эл. почта: KarataevaNA@tor.tusur.ru

**Ворошилин Евгений Павлович**

Канд. техн. наук, зав. каф. ТОР ТУСУРа

Тел.: 8-(382-2)-41-36-70

Эл. почта: nvi@sibmail.com

Maykov D.U., Demidov A.Y., Karataeva N.A., Voroshilin E.P.

**Evaluation of the frequency shift for Initial Ranging procedure in the «Mobile WiMax» system**

We proposed an algorithm for estimating the carrier frequency shift – the mobile station for procedure Initial Ranging in the «Mobile WiMax». The gained results of statistical modeling of algorithm proposed ways to improve the accuracy of the estimation.

**Keywords:** OFDMA, frequency shift, simulation.