

Метод повышения точности оценки временного смещения сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием

Е. В. Рогожников

Данная статья посвящена разработке метода оценки временного смещения сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием, позволяющим повысить точность оценки по сравнению с известными существующими методами. Приведены теоретические сведения о OFDM-сигналах, а также сделан обзор известных подходов к оценке временного смещения. Проведено моделирование предложенного и известных методов. Приведен анализ результатов моделирования. В заключении сделаны выводы о работе.

Ключевые слова: корреляционная обработка, OFDM-сигналы, оценка временного смещения, двухэтапный алгоритм, моделирование.

1. Введение

По всему миру получили внедрение технологии OFDM, OFDMA, SC-FDMA. К ним относятся мобильная связь 4-го поколения, системы беспроводного широкополосного доступа в интернет и др. Сигналы, излучаемые такими системами, используются в пассивных радиолокационных системах [1], в задачах определения местоположения источника излучения [2], системах радиомониторинга, а также в контрольно-измерительном оборудовании. Высокоточная оценка времени приема сигнала обеспечивает требуемую точность оценки местоположения источника сигнала. Существуют различные подходы и методы для оценки временного смещения, к примеру, разработанные авторами Minn, Choi и др. [3, 4].

Для оценки временного смещения в перечисленных методах необходима специальная структура сигнала. Существуют также и более универсальные подходы, позволяющие производить оценку временного смещения для произвольной структуры пилотного сигнала [5–8]. Именно эти методы будут рассмотрены в данной статье, также предложен новый метод оценки временного смещения. Точность, обеспечиваемая данными алгоритмами, достаточна для работы систем связи, поскольку ошибки временной синхронизации в последующем могут быть устранены с помощью эквалайзера, однако в системах пассивной локации, радиомониторинга и контрольно-измерительном оборудовании актуальной задачей является высокоточная оценка моментов приема радиосигнала.

2. Теория

OFDM-символ, состоящий из N_d отсчетов, может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \hat{s}(k) &= \frac{1}{N_d} \cdot \sum_{n=1}^{N_d} \hat{x}(k) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot n / N_d}, \\ k &= [1 : N_d], \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{x}(k)$ – комплексная модулированная последовательность. OFDM-символ включает циклический префикс (ЦП), размер которого N_g регламентируется стандартом системы связи. Число отсчетов в OFDM-символе с учетом циклического префикса равно: $N = N_d + N_g$.

С учетом случайного временного смещения, не кратного интервалу дискретизации, математическая запись OFDM-символа соответствует выражению:

$$\dot{s}(k) = \frac{1}{N_d} \cdot \sum_{n=1}^{N_d} \dot{x}(k) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot (n/N_d + \Delta\tau \cdot df)}, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ – значение временного смещения, df – частотный интервал между поднесущими.

Излученный OFDM-сигнал проходит через многолучевой канал распространения, импульсная характеристика которого в дискретном виде может быть описана как:

$$\dot{h}(m) = \sum_{l=1}^L \dot{c}_l \cdot \delta(m - \tau_l), \quad (3)$$

где $\dot{c}_l$ – амплитудный множитель каждого из лучей $l = 1 : L$. Каждому лучу соответствует задержка τ_l , $\delta(m - \tau_l)$ – дискретная дельта-функция, m – дискретное время.

Помимо многолучевости на принимаемый сигнал оказывает влияние частотный сдвиг, вызванный эффектом Доплера либо рассинхронизацией опорных генераторов. В этом случае принятый OFDM-символ может быть записан в виде:

$$\dot{s}_r(k) = e^{j \cdot k \cdot \Delta f \cdot 2 \cdot \pi / f_s} \cdot \sum_{m=1}^M \dot{s}(k) \cdot \dot{h}(m - k) + \dot{w}(k), \quad (4)$$

где Δf – частотный сдвиг, f_s – частота дискретизации, $\dot{w}(k)$ – отсчеты аддитивного белого гауссовского шума. Всю последовательность принятых OFDM-символов, включая пилотные и информационные символы, обозначим как $\dot{s}_\Sigma(k)$, где $k = [1 : (N_d \cdot K)]$, K – общее число OFDM-символов в принятой последовательности.

3. Существующие подходы к оценке временного смещения

3.1. Корреляционный метод оценки временного смещения

Классическим методом оценки временного смещения является корреляционный метод [7, 5]. Приемным устройством принимается и оцифровывается сигнал и сохраняется в буферную память. В приемнике производится расчет корреляционной функции между принятой последовательностью и опорным сигналом, хранящимся в памяти приемника. Положение максимума взаимокорреляционной функции позволяет определить момент приема пилотного сигнала (рис. 1).

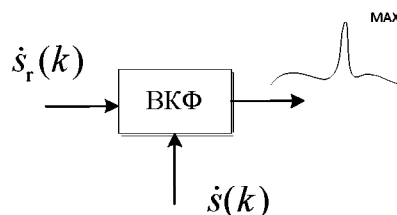


Рис. 1. Корреляционный метод приема сигнала

Расчет взаимокорреляционной функции между принятой последовательностью $\dot{s}_T(m)$, $m = [1:M]$, M – число отсчетов в принятой последовательности, и опорным сигналом $\dot{s}_{\text{ref}}(m)$, хранящимся в памяти устройства, производится согласно выражению:

$$R(m) = \text{ОДПФ}(\text{ДПФ}(\dot{s}_T(m)) \times \text{ДПФ}(\dot{s}_{\text{ref}}(m))^*), \quad (5)$$

где ОДПФ – обратное дискретное преобразование Фурье, ДПФ – дискретное преобразование Фурье, $*$ – знак комплексного сопряжения.

Стоит отметить, что размерность принятой последовательности $\dot{s}_T(m)$, хранящейся в буферной памяти, превышает размер опорного сигнала $\dot{s}_{\text{ref}}(m)$, в связи с этим в окончании сигнала $\dot{s}_{\text{ref}}(m)$ добавляется нулевая последовательность, чтобы размерность массивов была одинакова.

Оценка смещения по времени принятого сигнала соответствует положению максимума модуля ВКФ: $\Delta \hat{\tau} = m_{\text{max}} / f_s$, m_{max} – номер отсчета, соответствующий максимальному значению модуля ВКФ.

Недостатком данного подхода является то, что точность оценки времени приема зависит от ширины полосы частот сигнала и частоты дискретизации. Ошибка оценки времени приема прямого сигнала в данном случае будет находиться в интервале $\partial = 0 \dots t_s / 2$, где t_s – интервал дискретизации, равный $1 / f_s$. Для достижения измерения дальности с ошибкой менее 1 м потребуется оцифровка сигнала с частотой дискретизации более 150 МГц, что увеличивает сложность обработки сигнала и стоимость оборудования.

3.2. Оценка времени приема сигнала с использованием интерполяции корреляционной функции

Данный подход описан в работах [6, 8] и заключается в следующем. Приемным устройством принимается и оцифровывается сигнал. Отсчеты сигнала сохраняются в буферную память устройства. Оценка времени производится в два этапа – грубая и точная оценки. Грубая оценка смещения по времени принятого сигнала соответствует положению максимума модуля ВКФ (1). Точная оценка необходима для устранения неоднозначности положения максимума ВКФ, которая возникает в результате того, что смещение по времени не кратно длительности интервала дискретизации. Для уточнения оценки временного смещения максимум ВКФ восстанавливается функцией интерполяции. Могут использоваться различные функции интерполяции, к примеру, $y = ax^2 + bx + c$. Для ее вычисления используется три отсчета ВКФ в окрестности максимума. Точная оценка может быть записана в виде:

$$\Delta \hat{\tau} = \frac{(m_{\text{max}} - 1) + g_{\text{max}} / G}{f_s}, \quad (6)$$

где g_{max} – номер отсчета, соответствующий положению максимума модуля ВКФ после квадратичной интерполяции пика, G – число отсчетов функции квадратичной интерполяции.

Недостатком такого подхода является то, что на точность оценки временного смещения оказывает влияние геометрический фактор. Три точки ВКФ образуют треугольник, погрешность интерполяции в данном случае будет определяться значениями углов треугольника и его сторонами [9].

4. Предлагаемый метод оценки временного смещения

Предлагается метод оценки временного смещения, позволяющий повысить точность оценки по сравнению с известными методами.

Оценка временного смещения в предлагаемом методе производится в два этапа. На первом этапе производится прием и оцифровка принятой последовательности. Рассчитывается взаимокорреляционная функция принятого сигнала с опорным. Определяется положение максимального значения модуля ВКФ $m_{\max}$. По положению максимума модуля ВКФ производится грубая оценка временного смещения $\Delta \hat{\tau}_1$ и определение первого отсчета пилотной последовательности k_1 :

$$\Delta \hat{\tau}_1 = k_{\max} / f_s, \quad (7)$$

Далее рассчитывается спектр опорного OFDM-символа $\dot{S}_{\text{ref}}(k) = \text{БПФ}(\dot{s}_{\text{ref}}(l))$ и спектр принятого пилотного OFDM-символа $\dot{S}_r(k) = \text{БПФ}(\dot{s}_r(l))$, $l = k_1 \dots k_1 + N_d - 1$. На интервале длительности пилотного символа производится расчет коэффициентов корреляции между спектрами опорного и принятого символов. Расчет коэффициентов корреляции производится следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{R}_1 &= \sum_{k=1}^{N_d/2} \dot{S}_r(k) \cdot \dot{S}_{\text{ref}}^*(k), \\ \dot{R}_2 &= \sum_{k=N_d/2+1}^{N_d} \dot{S}_r(k) \cdot \dot{S}_{\text{ref}}^*(k). \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка временного смещения производится с использованием коэффициентов корреляции:

$$\Delta \hat{\tau}_2 = \frac{\text{atan2}(Y, X)}{\pi \cdot \Delta F}, \quad (9)$$

где

$$\text{atan2}(Y, X) = \begin{cases} \arctan(Y/X), & \text{если } X > 0, \\ \arctan(Y/X) + \pi, & \text{если } X < 0 \text{ и } Y \geq 0, \\ \arctan(Y/X) - \pi, & \text{если } X < 0 \text{ и } Y < 0, \\ +\pi/2, & \text{если } X = 0 \text{ и } Y > 0, \\ -\pi/2, & \text{если } X = 0 \text{ и } Y < 0, \\ \text{неопределено,} & \text{если } X=0 \text{ и } Y=0, \end{cases}$$

$$Y = \text{imag}(\dot{R}_1^* \cdot \dot{R}_2),$$

$$X = \text{real}(\dot{R}_1^* \cdot \dot{R}_2),$$

ΔF – ширина полосы частот сигнала.

Общая последовательность операций, выполняемых в предлагаемом методе, показана на рис. 2.

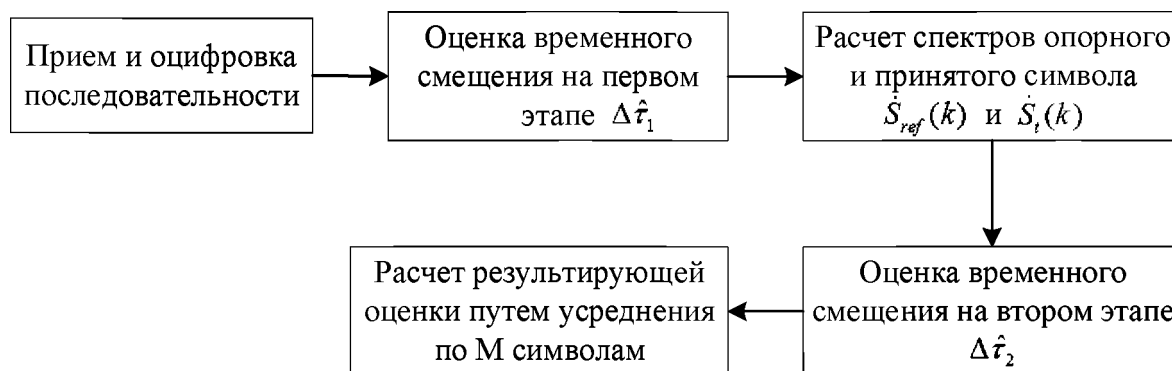


Рис. 2. Функциональная схема работы предложенного метода

Точность предложенного метода может быть увеличена за счет использования служебных и информационных OFDM-символов, передаваемых системой связи. Для этого необходимо произвести реконструкцию этих символов и сформировать для каждого из символов, участвующих в оценке частотного сдвига, свой опорный сигнал. Последовательность операций, необходимых для формирования опорных сигналов, поясняется на рис. 3.

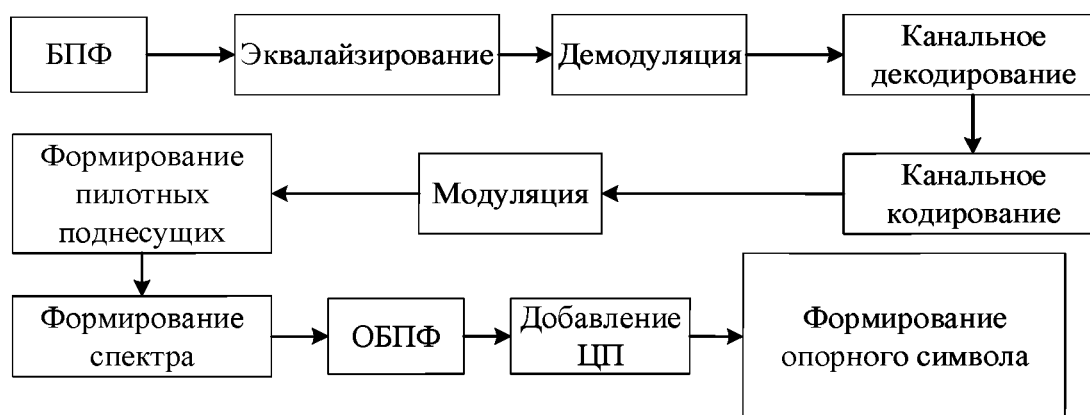


Рис. 3. Алгоритм формирования опорного сигнала

Описанная выше 2-этапная оценка временного смещения проводится для M информационных символов. После чего рассчитывается среднее значение.

5. Результаты моделирования

Демонстрация эффективности предложенного метода и его сравнение с известными методами производится с помощью математического моделирования. Параметры сигналов, используемые при моделировании, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сигналов, используемых при моделировании

Параметр	Значение
Количество OFDM-символов, K_1	10
Ширина полосы частот сигнала, МГц	10
Частота дискретизации, f_s , МГц	10
Размер преобразования Фурье ($NFFT$)	1024
Длительность OFDM-символа без защитного интервала (T_b), мкс	102.4
Длительность циклического префикса (ЦП) $T_g = 1/8 \cdot T_b$, мкс	12.8
Интервал между поднесущими, кГц	9.765
Вид модуляции	QPSK

Структура сформированной последовательности OFDM-символов во временной области показана на рис. 4.



Рис. 4. Структура кадра, используемая для моделирования

При моделировании учитывалась многолучевость канала распространения радиоволн. Параметры многолучевого канала задавались в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (ITU-R) [10]. Используемые параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры многолучевого канала, $L = 6$

Номер луча, l	Задержка τ_l , нс	Ослабление $\hat{c}_l$, дБ
1	0	0
2	310	-0.9
3	710	-4.9
4	1090	-8.0
5	1730	-7.8
6	2510	-20

Существующие исследования канала распространения радиоволн на приземных трассах показывают, что для городской среды время когерентности канала распространения радиоволн составляет 7–14 мс [11]. Поэтому можно считать, что время когерентности канала распространения радиоволн превышает длительность последовательности, используемой при моделировании. Следовательно, влияние беспроводного многолучевого канала связи на передаваемый сигнал в данной модели является одинаковым для всех OFDM-символов.

Как сказано выше, величина ошибки оценки временного смещения в рассматриваемых методах будет зависеть от значения временного смещения. Для выявления такой зависимости проведено исследование зависимости среднего значения ошибки от значения временного смещения в диапазоне от 200 до 299 нс при отношении сигнал/шум 50 дБ. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

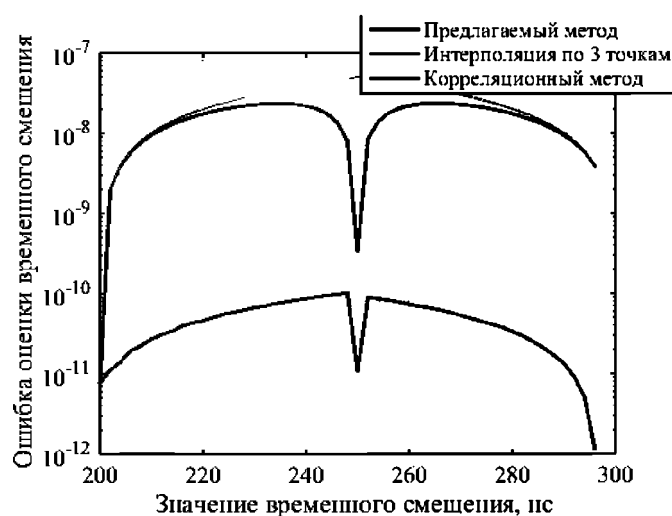


Рис. 5. Зависимость среднего значения ошибки временного смещения от значения смещения в диапазоне от 200 до 299 нс при отношении сигнал/шум 50 дБ

Как видно из рис. 5, корреляционный метод обеспечивает наименьшую величину ошибки для значений частотного сдвига, кратных интервалу дискретизации. Метод с использованием интерполяции вершины корреляционной функции позволяет повысить точность оценки. Минимальная ошибка достигается по краям и ближе к центру исследуемого диапазона. На точность метода оказывает влияние геометрический фактор – расположение на плоскости трех точек, по которым производится интерполяция [9]. Предлагаемый метод также зависит от значения временного смещения, но обеспечивает меньшую ошибку во всем исследуемом диапазоне временного смещения.

Точность предлагаемого метода также зависит от отношения сигнал/шум. На рис. 6 приведена зависимость среднего значения ошибки оценки временного смещения от отношения сигнал/шум для значения временного смещения 250 нс.

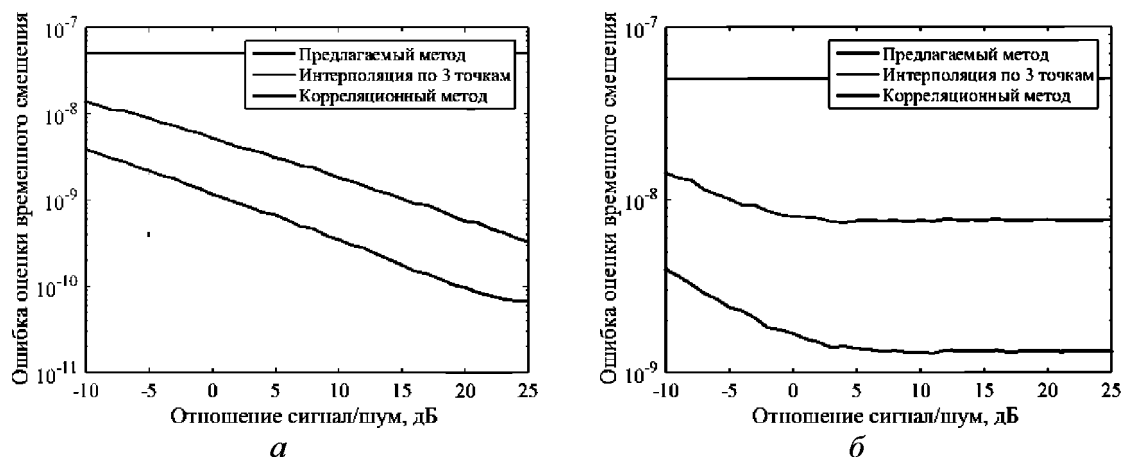


Рис. 6. Зависимость ошибки оценки временного смещения от отношения сигнал/шум:
а) однолучевой канал, б) канал с многолучевостью

Как видно из рис. 6, при увеличении отношения сигнал/шум среднее значение ошибки оценки временного смещения снижается для метода интерполяции вершины ВКФ и предлагаемого метода. Аддитивный белый гауссовский шум в исследуемом диапазоне не оказывает влияния на работу корреляционного метода. Стоит отметить, что на работу предлагаемого метода оказывает влияние многолучевой канал распространения радиоволн, точность предлагаемого метода снижается. Параметры многолучевого канала приведены в табл. 2.

6. Заключение

В данной работе предложен новый метод оценки временного смещения, позволяющий повысить точность оценки временного смещения сигналов систем связи с использованием технологии OFDM в 10 и более раз по сравнению с существующими методами. Предложенный метод позволяет с высокой точностью оценить момент приема пилотного сигнала произвольного формата. Точность оценки временного смещения предлагаемого метода зависит от значения временного смещения, отношения сигнал/шум и многолучевости распространения радиоволн и может быть повышена за счет использования информационных и служебных символов после их реконструкции.

Литература

1. *Paichard Y., Inggs M. R.* Multistatic passive coherent location radar systems // IEEE European Radar Conference (EuRAD). 2009. P. 45–48.
2. *Денисов В. П.* Совместная обработка ортогонально поляризованных сигналов в фазовых пеленгаторах систем радиомониторинга // Доклады ТУСУР. 2009. № 2 (20). С. 16–20.
3. *Minn H., Bhargava V. K., Letaief K. B.* A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2003. V. 2, №. 4. P. 822–839.
4. *Choi, S. D., Choi J. M., Lee J. H.* An initial timing offset estimation method for OFDM systems in Rayleigh fading channel // Vehicular Technology Conference. 2006. P. 1–5.
5. *Schmidl, T. M., Cox D. C.* Robust frequency and timing synchronization for OFDM // IEEE Transactions on Communications. 1997. V. 45, №. 12. P. 1613–1621.
6. *Майков Д. Ю.* Алгоритмы оценки параметров символьной и частотной синхронизации в мобильных OFDM-системах радиосвязи: дис. канд. техн. наук. Томский гос. университет систем управления и радиоэлектроники. Томск. 2014.
7. *Tal B. et al.* Cross-correlation based time delay estimation for turbulent flow velocity measurements: Statistical considerations // Physics of Plasmas. 2011. V. 18, № 12. ID 122304.
8. *Lai X., Torp H.* Interpolation methods for time-delay estimation using cross-correlation method for blood velocity measurement // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1999. V. 46, №. 2. P. 277–290.
9. *Латыпова Н. В.* Погрешность кусочно-параболической интерполяции на треугольнике // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2009. №. 3. С. 91–97.
10. Channel Models, A Tutorial [Электронный ресурс]. URL: http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf (дата обращения 17.05.2017).
11. *Juha L.* Wide-Band 3-D Characterization of Mobile Radio Channels in Urban Environment // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2002. V. 50, № 2. P. 233–243.

*Статья поступила в редакцию 12.09.2017;
переработанный вариант – 8.12.2017.*

Рогожников Евгений Васильевич

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУР (634045, Томск, ул. Вершинина, 47), тел. (382) 2- 41-33-98, e-mail: udzhon@mail.ru.

Method for improving the accuracy of time offset estimation for signals with orthogonal frequency multiplexing

E. Rogozhnikov

This article is devoted to the development of methods for estimating signals time offset with orthogonal frequency multiplexing, making it possible to improve the accuracy of the estimation in comparison with known existing methods. Theoretical information about OFDM signals is presented, an overview of known approaches for estimating time offset is made. The proposed and known methods are simulated. The analysis of simulation results is carried out. The conclusions about the work are given.

Keywords: correlation processing, OFDM signals, estimation of time displacement, two-stage algorithm, simulation.