

УДК 621.391.26

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНОГО СДВИГА В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С OFDM МОДУЛЯЦИЕЙ

Е. В. РОГОЖНИКОВ, Г. П. БАБУР-КАРАТЕЛЛИ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, Томск, 634050, пр-т Ленина, 40*

Аннотация. В статье предложен метод повышения точности оценки частотного сдвига для систем связи с OFDM модуляцией. Повышение точности в предлагаемом методе достигается за счет совместного использования пилотных и информационных символов OFDM сигнала. Выделены основные факторы, определяющие точность предложенного метода. Произведено математическое моделирование предложенного метода для многолучевого канала распространения радиоволн. Эффективность предложенного метода показана в сравнении с существующими методами оценок частотного сдвига. Описаны достоинства и недостатки существующих и предложенного методов. Построены зависимости среднеквадратической ошибки оценки частотного сдвига от отношения сигнал–шум для предлагаемого и существующих методов. Достижимая высокая точность оценки частотного сдвига с использованием предложенного метода делает целесообразным его использование в контрольно-измерительном оборудовании. Сделаны выводы о полученных результатах моделирования и целесообразности применения предложенного метода.

Ключевые слова: частотная синхронизация; оценка частотного сдвига; OFDM модуляция; преамбула; информационные символы

ВВЕДЕНИЕ

Технология ортогонального частотного уплотнения с мультиплексированием OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) находит широкое применение во многих современных беспроводных телекоммуникационных системах, например LTE, WiMAX, IEEE 802.11, DAB, DVB-T2, и др. [1–4]. Одним из главных достоинств OFDM модуляции является возможность устранения искажений, вызванных прохождением сигнала через многолучевой канал распространения радиоволн.

Важными вопросами при разработке систем связи с использованием OFDM сигналов являются вопросы временной и частотной синхронизации при обработке сигналов [5]. Ошибки временной синхронизации приводят к

фазовому набегу в частотной области. Они достаточно просто устраняются с помощью эквалайзера [6]. Ошибки частотной синхронизации приводят к нарушению ортогональности поднесущих частот, что в свою очередь приводит к зашумлению сигнального созвездия и к дополнительным ошибкам при демодуляции данных.

Точность оценки частотного сдвига, обеспечиваемая существующими методами, достаточна для работы систем связи. Однако, в измерительном оборудовании повышение точности оценки частотного сдвига является актуальной задачей, поскольку требуется обеспечение максимальной точности оценки параметров сигнала.

Имеется ряд публикаций, посвященных оценке частотного сдвига по тренировочной

DOI: [10.20535/S0021347018080022](https://doi.org/10.20535/S0021347018080022)

© Е. В. Рогожников, Г. П. Бабур-Карателли, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sesia, S.; Toufik, I.; Baker, M. *LTE – the UMTS long term evolution*. New Jersey: John Wiley, 2015.
2. Kumar, A. *Mobile broadcasting with WiMAX: principles, technology, and applications*. CRC Press, 2014.
3. Майков, Д.Ю.; Демидов, А.Я.; Каратаева, Н.А.; Ворошилин, Е.П. “Оценка сдвига частоты для процедуры Initial Ranging в системе «мобильный WiMax»,” *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, Т. 24, №. 2–1, С. 59–63, 2011.
4. Eizmendi, I.; Velez, M.; Gómez-Barquero, D.; Morgane, J.; Baena-Lecuyer, V.; Slimani, M.; Zoellner, J. “DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system,” *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. 60, No. 2, P. 258-271, 2014. DOI: [10.1109/TBC.2014.2312811](https://doi.org/10.1109/TBC.2014.2312811).
5. Pollet, T.; Van Bladel, M.; Moeneclaey, M. “BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 43, No. 2, P. 191-193, 1995. DOI: [10.1109/26.380034](https://doi.org/10.1109/26.380034).
6. Suyama, S.; Suzuki, H.; Fukawa, K. “An OFDM receiver employing turbo equalization for multipath environments with delay spread greater than the guard interval,” *Proc. of 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conf.*, VTC 2003-Spring, 22-25 Apr. 2003,

Jeju, South Korea. IEEE, 2003, Vol. 1, P. 632-636. DOI: [10.1109/VETECS.2003.1207619](https://doi.org/10.1109/VETECS.2003.1207619).

7. Minn, H.; Bhargava, V. K.; Letaief, K. B. "A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 2, No. 4, P. 822-839, 2003. DOI: [10.1109/TWC.2003.814346](https://doi.org/10.1109/TWC.2003.814346).

8. Schmidl, T. M.; Cox, D. C. "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 45, No. 12, P. 1613-1621, 1997. DOI: [10.1109/26.650240](https://doi.org/10.1109/26.650240).

9. Mir, Z. H.; Filali, F. "LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation," *EURASIP J. Wireless Commun. Networking*, Vol. 2014, No. 1, P. 89, 2014. DOI: [10.1186/1687-1499-2014-89](https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-89).

10. Van de Beek, J. J.; Sandell, M.; Borjesson, P. O. "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 45, No. 7, P. 1800-1805, 1997. DOI: [10.1109/78.599949](https://doi.org/10.1109/78.599949).

11. Chin, W.-L. "ML estimation of timing and frequency offsets using distinctive correlation characteristics of OFDM signals over dispersive fading

channels," *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, Vol. 60, No. 2, P. 444-456, 2011. DOI: [10.1109/TVT.2010.2102058](https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2102058).

12. Sladkikh, V. A.; Tokarev, A. B. "Increase of time-and-frequency synchronization accuracy in communication systems with orthogonal subcarriers," *Proc. of Int. Siberian Conf. on Control and Communications*, SIBCON, 21-23 May 2015, Omsk, Russia. IEEE, 2015, P. 1-4. DOI: [10.1109/SIBCON.2015.7147219](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147219).

13. Baumgartner, S.; Shehadeh, Y. E. H.; Hirtz, G. "A modified symbol timing and frequency synchronization method based on cyclic prefix for OFDM systems," *Proc. of 25th Int. Conf. Radioelektronika*, 21-22 Apr. 2015, Pardubice, Czech Republic. IEEE, 2015, P. 331. DOI: [10.1109/RADIOELEK.2015.7129058](https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2015.7129058).

14. Jain, R. *Channel Models A Tutorial*. Feb. 2007, WiMAX Forum AATG.

15. Toeltsch, M.; Laurila, J.; Kalliola, K.; Molisch, A. F.; Vainikainen, P.; Bonek, E. "Statistical characterization of urban spatial radio channels," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, Vol. 20, No. 3, P. 539-549, 2002. DOI: [10.1109/49.995513](https://doi.org/10.1109/49.995513).

Поступила в редакцию 07.07.2017

После переработки 03.07.2018