

УДК 621.396.62

МЕТОД ДВУХЭТАПНОГО СОВМЕСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ И ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С OFDM

А. Ю. МИРОНЧУК, А. А. ШПИЛЬКА, С. Я. ЖУК

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»
Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37*

Аннотация. Синтезированы оптимальный и квазиоптимальный алгоритмы двухэтапного совместного оценивания информационных символов и частотной характеристики (ЧХ) многолучевых каналов в системах связи на базе технологии OFDM. Они состоят в вычислении апостериорной плотности вероятности оцениваемых процессов. На первом этапе выполняется рекуррентное вычисление совместных апостериорных распределений информационных символов и частотной характеристики с двух сторон вектора измерений. На втором этапе выполняется объединение апостериорных распределений на каждой из поднесущих, которые получены в результате оценивания на первом этапе. На основе полученных апостериорных распределений, оценки информационного символа и ЧХ канала определяются по критериям максимума апостериорной вероятности и минимума среднего квадрата ошибки соответственно. Для функционирования синтезированных алгоритмов необходимо, как и для известного алгоритма MMSE, знание статистических свойств канала связи. Устройство, реализующее оптимальный алгоритм, является многоканальным, каждый канал которого согласован с соответствующим значением символа из модуляционного созвездия. Квазиоптимальный алгоритм получен путем гауссовской аппроксимации апостериорных плотностей вероятности и сохраняет многоканальную структуру. Апробация представленного алгоритма проведена путем статистического моделирования на ЭВМ для различных параметров многолучевых каналов связи и сравнения результатов с результатами, полученными алгоритмами MMSE и LS.

1. ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время модуляция с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) считается хорошо зарекомендовавшей себя технологией для приложений цифрового вещания и беспроводных широкополосных систем. На ее базе построены стандарты наземного радиовещания DAB и DRM, телевидение DVBT и ISDB-T, сети мобильной связи 4G и 5G, беспроводные сети доступа к интернету Wi-Fi и др.

Благодаря достоинствам этой технологии, она является приоритетной при исследованиях в области создания широкополосных систем нового поколения. Основное преимущество

OFDM состоит в том, что данная технология позволяет передавать высокоскоростные потоки информации по частотно-избирательным каналам, при относительно низкой стоимости реализации приемника.

Одной из самых ресурсоемких задач, при реализации приемников в высокоскоростных системах передачи информации, является задача оценивания параметров частотной характеристики (ЧХ) меняющегося во времени канала связи [1, 2]. Для узкополосных систем передачи информации существуют методы оценивания ЧХ, построенные с использованием обучающей последовательности [3], и без нее [4]. В частности, существуют методы совместного

DOI: [10.20535/S002134702008004X](https://doi.org/10.20535/S002134702008004X)

© А. Ю. Мирончук, А. А. Шпилька, С. Я. Жук, 2020

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. Speth, S. A. Fechtel, G. Fock, H. Meyr, "Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. I," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 11, pp. 1668–1677, 1999, doi: [10.1109/26.803501](https://doi.org/10.1109/26.803501).
2. M. Speth, S. Fechtel, G. Fock, H. Meyr, "Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 4, pp. 571–578, 2001, doi: [10.1109/26.917759](https://doi.org/10.1109/26.917759).
3. P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering*. Cham: Springer International Publishing, 2020, doi: [10.1007/978-3-030-29057-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29057-3).
4. A. Moussa, M. Pouliquen, M. Frikel, S. Bedoui, K. Abderrahim, M. M'saad, "An overview of blind equalization algorithms for digital communications," in *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2019, pp. 491–496, doi: [10.1109/STA.2019.8717267](https://doi.org/10.1109/STA.2019.8717267).
5. А.А.Шпилька, С.Я.Жук, "Совместная интерполяция данных и фильтрация параметров многолучевого канала связи," *Известия вузов. Радиоэлектроника*.

троники, vol. 53, no. 1, pp. 26–30, 2010, doi: [10.20535/s0021347010010048](https://doi.org/10.20535/s0021347010010048).

6. Z. Jiang, X. Shen, H. Wang, Z. Ding, “Joint PSK data detection and channel estimation under frequency selective sparse multipath channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 2726–2739, 2020, doi: [10.1109/TCOMM.2020.2975172](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2975172).

7. T.-D. Chiueh, P.-Y. Tsai, I.-W. Lai, *Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications*, 2nd ed. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012, doi: [10.1002/9781118188194](https://doi.org/10.1002/9781118188194).

8. N. Suga, R. Sasaki, T. Furukawa, “Channel estimation using matrix factorization based interpolation for OFDM systems,” in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019, vol. 2019-Sept, pp. 1–5, doi: [10.1109/VTCFall.2019.8891572](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891572).

9. J.-J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, P. O. Borjesson, “On channel estimation in OFDM systems,” in *1995 IEEE 45th Vehicular Technology Conference. Countdown to the Wireless Twenty-First Century*, 1995, vol. 2, pp. 815–819, doi: [10.1109/VETEC.1995.504981](https://doi.org/10.1109/VETEC.1995.504981).

10. O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, S. K. Wilson, P. O. Borjesson, “OFDM channel estimation by singular value decomposition,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 931–939, 1998, doi: [10.1109/26.701321](https://doi.org/10.1109/26.701321).

11. X. Dai, W. Zhang, J. Xu, J. E. Mitchell, Y. Yang, “Kalman interpolation filter for channel estimation of LTE downlink in high-mobility environments,” *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 1, p. 232, 2012, doi: [10.1186/1687-1499-2012-232](https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-232).

12. С.В.Вишневы, С.Я.Жук, “Двухэтапная совместная каузальная фильтрация и сегментация неоднородных изображений,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 54, no. 1, pp. 46–53, 2011, doi: [10.20535/s0021347011010067](https://doi.org/10.20535/s0021347011010067).

13. А.Ю.Мирончук, А.А.Шпилюк, С.Я.Жук, “Метод оценивания частотной характеристики канала в OFDM системах на основе фильтрации и экстраполяции

пилот-сигналов,” *Вестник НТУУ “КПИ” . Сер. Радио-техника Радиоаппаратостроение*, no. 78, pp. 36–42, 2019, uri: <http://doi.radap.kpi.ua/article/view/185287>.

14. М.Н.Служивый, “Рекуррентные адаптивные алгоритмы приема сигналов в каналах с замираниями,” *Вестник УлГТУ*, no. 4, pp. 24–26, 2009, uri: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20171746>.

15. М.Н.Служивый, Я.В.Куканова, “Авто-регрессионные модели замираний в многолучевом канале связи,” *Вестник УлГТУ*, no. 3, pp. 44–46, 2008, uri: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20186491>.

16. Wei Chen, Ruifeng Zhang, “Kalman-filter channel estimator for OFDM systems in time and frequency-selective fading environment,” in *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004, vol. 4, pp. iv-377–iv-380, doi: [10.1109/ICASSP.2004.1326842](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1326842).

17. В.И.Тихонов, В.Н.Харисов, *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. Москва: Радио и связь, 2004.

18. Т.В.Барингольц, Д.В.Демин, С.Я.Жук, В.В.Цисарж, “Адаптивный алгоритм сопровождения маневрирующих целей в сложной помеховой обстановке для многофункциональной радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 62, no. 7, pp. 413–426, 2019, doi: [10.20535/s0021347019070021](https://doi.org/10.20535/s0021347019070021).

19. А.П.Трифонов, Ю.С.Шинаков, *Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех*. Москва: Радио и связь, 1986.

20. C. K. Chui, G. Chen, *Kalman Filtering*, 5th ed. Cham: Springer International Publishing, 2017, doi: [10.1007/978-3-319-47612-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47612-4).

21. L. M. Correia, *Mobile Broadband Multimedia Networks*, 1st ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2006, uri: <https://www.elsevier.com/books/mobile-broadband-multimedia-networks/correia/978-0-12-369422-5>.

Поступила в редакцию 16.12.2019

После доработки 04.08.2020

Принята к публикации 07.08.2020