

УДК 621.396

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЕ БЛОЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ С ДВУХРЕЖИМНОЙ ИНДЕКСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ OFDM И ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ КАНАЛА

В. И. СОЛОДОВНИК, Н. И. НАУМЕНКО

*Военный институт телекоммуникаций и информатизации имени Героев Крут,  
Украина, Киев, 01011 ул. Московская, 45/1*

**Аннотация.** Рассмотрена технология совместного применения многоантенных систем MIMO и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов OFDM для современных систем беспроводной связи специального назначения. Определены области приоритетного использования временного и частотного варианта разнесенной передачи сигналов по принципу Аламути для беспроводных каналов связи с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами. Показано, что применение фиксированной матрицы предкодирования Уолша–Адамара к исходящим символам пространственно-частотного кодера Аламути позволяет повысить устойчивость метода SFBC-OFDM к частотной селективности канала без усложнения системы. Проанализирована концепция индексной модуляции поднесущих OFDM-IM. Продемонстрированы преимущества двойного режима (Dual-Mode) OFDM-IM с оптимизированными ансамблями сигналов на базе BPSK, QPSK и 16-QAM. Предложена новая сигнально-кодовая конструкция (СКК) с объединением двухрежимной индексной модуляцией поднесущих OFDM, ортогонального пространственно-частотного блочного кодирования с ядром Аламути, и кодера Уолша–Адамара WH-SFBC-DM-OFDM-IM. Такой метод, по сравнению с классическим SFBC-OFDM, позволяет одновременно повысить спектральную и энергетическую эффективность систем передачи информации в условиях частотно-временной селективности канала связи. Предложенный метод является полностью инвариантным к частотной селективности канала при применении BPSK, и частично инвариантным — при QPSK и 16-QAM. Результаты моделирования показали, что помехоустойчивость такой СКК является значительно лучше по сравнению с другими методами, благодаря обеспечению идентичности пространственно-частотного кодового слова на длительности символа OFDM. Метод целесообразно использовать для обеспечения качественной связи с высокодинамичными наземными объектами, беспилотными и другими летательными аппаратами в условиях критического снижения шумовой защищенности канала, которое имеет место при влиянии средств радиоэлектронного подавления.

**Ключевые слова:** MIMO; SFBC; OFDM; индексная модуляция; двойной режим; частотная селективность; нестационарность

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований к современным системам беспроводной связи специального назначения (СБССН) является обеспечение высоких показателей помехоустойчивости и скорости передачи информации. В условиях влияния средств радиоэлектронного подавления (РЭП), когда шумовая защищен-

ность каналов связи критически снижается, для поддержки объемных информационных мультимедийных приложений эффективность использования таких каналов должна приближаться к теоретическим пределам. При сложной помеховой обстановке высокоэффективное использование реальных беспроводных каналов связи существенно ус-

DOI: [10.20535/S0021347020040020](https://doi.org/10.20535/S0021347020040020)

© В. И. Солодовник, Н. И. Науменко, 2020

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина, and В. Б. Крейнделин, *Технология MIMO: принципы и алгоритмы*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2014.
2. L. Hanzo, Y. J. Akhtman, L. Wang, and M. Jiang, *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent Versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers*. Chichester, UK: Wiley-IEEE Press, 2010.
3. J. G. Andrews, A. P. D. Ghosh, and R. Muhamed, “Fundamentals of WiMAX?: understanding broadband wireless networking,” *Prentice Hall Commun. Eng. Emerg. Technol. Ser.*, 2007.
4. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd, 2013.
5. S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998, doi: [10.1109/49.730453](https://doi.org/10.1109/49.730453).
6. C. M. Li, G. W. Li, and H. Y. Liu, “Performance comparison of the STBC-OFDM decoders in a fast fading channel,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 5, pp. 534–540, Oct. 2012, doi: [10.6119/JMST-011-0506-3](https://doi.org/10.6119/JMST-011-0506-3).
7. M. A. Youssefi, N. Bounouader, Z. Guennoun, and J. El Abbadi, “Adaptive Switching between Space-Time and Space-Frequency Block Coded OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel,” *Int. J. Commun. Netw. Syst. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 316–323, Jun. 2013, doi: [10.4236/ijcns.2013.66034](https://doi.org/10.4236/ijcns.2013.66034).
8. “Specification # 36.211.” Accessed: 17-Apr-2020. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2425>.
9. F. Kalbat, A. Al-Dweik, B. Sharif, and G. Karagiannidis, “Robust precoded MIMO-OFDM for mobile frequency-selective wireless channels,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, WCNC, 2016, vol. 2016-September, doi: [10.1109/WCNC.2016.7564880](https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564880).
10. E. Basar, “Index modulation techniques for 5G wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, Jul. 2016, doi: [10.1109/MCOM.2016.7509396](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7509396).
11. M. Wen, X. Cheng, and L. Yang, *Index Modulation for 5G Wireless Communications*. Springer International Publishing, 2017.
12. E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, “Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693–16746, Aug. 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2737528](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2737528).
13. X. Cheng, M. Zhang, M. Wen, and L. Yang, “Index modulation for 5G: Striving to do more with less,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 126–132, Apr. 2018, doi: [10.1109/MWC.2018.1600355](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1600355).
14. E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, “Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, 2013, doi: [10.1109/TSP.2013.2279771](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2279771).
15. M. Wen, X. Cheng, M. Ma, B. Jiao, and H. V. Poor, “On the Achievable Rate of OFDM with Index Modulation,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 8, pp. 1919–1932, Apr. 2016, doi: [10.1109/TSP.2015.2500880](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2500880).
16. E. Basar, U. Aygöl, and E. Panayirci, “Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation in the presence of high mobility,” in *2013 1st International Black Sea Conference on Communications and Networking, BlackSeaCom 2013*, 2013, pp. 147–151, doi: [10.1109/BlackSeaCom.2013.6623399](https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2013.6623399).
17. Н. И. Науменко and В. И. Солодовник, “Сигнально-кодіві конструкції з індексною модуляцією піднесних OFDM та просторово-часовим блочним кодуванням для частотно-селективних та нестационарних каналів безпроводового зв’язку,” *Проблеми телекомунікацій*, no. 1, pp. 51–67, Nov. 2019, doi: [10.30837/pt.2019.1.04](https://doi.org/10.30837/pt.2019.1.04).
18. В. И. Солодовник, “Методы пространственно-временного блочного кодирования с индексной модуляцией поднесущих OFDM для частотно-селективных и нестационарных каналов беспроводной связи,” in *XIII Международная научно-техническая конференция “Перспективы телекоммуникаций” ПТ-2019*, 2019, pp. 153–155.
19. K. H. Kim and H. Park, “New design of constellation and bit mapping for dual mode OFDM-IM,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52573–52580, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2912704](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912704).
20. Н. И. Науменко, В. И. Солодовник, and Л. М. Погребняк, “Метод пространственно-временного блочного кодирования с двухрежимной индексной модуляцией поднесущих OFDM для частотно-селективных каналов беспроводной связи,” *Сборник научных трудов ВИТИ им. Героев Крут*, no. 2, pp. 53–60,

2019. URI: [http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2019/7\\_2\\_2019.pdf](http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2019/7_2_2019.pdf).

21. M. Naumenko and V. Solodovnick, "Signal-Code Construction Based on Space-Time Block Coding with Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM," in *2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2019, pp. 57–62, doi: [10.1109/PICST47496.2019.9061467](https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061467).

22. T. Mao, Z. Wang, Q. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 50–60, 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2016.2601648](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2601648).

23. K. Fazel and S. Kaiser, *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. Wiley, 2008.

24. X. Zhang, H. Bie, Q. Ye, C. Lei, and X. Tang, "Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM with Constellation Power Allocation and Low-Complexity Detector Design," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23871–23880, Sep. 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2756679](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756679).

25. IEEE, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," 2004. doi: [10.1109/ieeestd.2004.226664](https://doi.org/10.1109/ieeestd.2004.226664).

Поступила в редакцию 19.11.2019

После доработки 07.04.2020

Принята к публикации 14.04.2020