

УДК 621.396

КОНЦЕПЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Д. А. ПОКАМЕСТОВ, Я. В. КРЮКОВ, Е. В. РОГОЖНИКОВ, Р. Р. АБЕНОВ, А. Я. ДЕМИДОВ

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

Аннотация. Рассмотрены наиболее перспективные с точки зрения использования частотно-временного ресурса технологии формирования сигналов и множественного доступа: технология полного дуплекса, метод формирования поднесущих с помощью банка гребенчатых фильтров, метод неортогонального множественного доступа и метод множественного доступа с разреженным кодом. Описаны основные существующие схемы реализации полнодуплексной связи, основанные на аналоговой и цифровой компенсации сигнала собственного передатчика в приемном канале. Рассмотрена система фильтрации многочастотного сигнала с помощью банка гребенчатых фильтров. Показано, что спектр такого сигнала имеет значительно меньшее внеполосное излучение по сравнению с существующими способами формирования ортогональных поднесущих. Исследован метод неортогонального множественного доступа и метод множественного доступа с разреженным кодом, приведены зависимости вероятностей битовых ошибок от отношения сигнал/шум для систем связи, построенных с использованием этих методов. Показано, что рассматриваемые методы множественного доступа более эффективно используют частотно-временной ресурс по сравнению с существующими технологиями.

Ключевые слова: 5G; система связи пятого поколения; полный дуплекс; аналоговая компенсация; цифровая компенсация; банк гребенчатых фильтров; FBMC; неортогональный множественный доступ; NOMA; SIC; множественный доступ с разреженным кодом; SCMA

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжают развиваться системы передачи данных, в том числе мобильные сети беспроводного широкополосного доступа. Практически во всей зоне покрытия мобильных операторов развернуты сети четвертого поколения LTE. При этом объемы передаваемого трафика год от года увеличиваются, как и количество подключаемых к сети устройств. Если на момент разработки стандарта LTE это были в основном мобильные абонентские устройства, то сейчас все большую долю занимают различные датчики и «умные» устройства, что входит в концепцию «интернета вещей» IoT (internet of things).

В научных кругах идет обсуждение технического облика сетей связи пятого поколения. Крупнейшими компаниями, работающими в сфере электроники и телекоммуникаций, создан ряд проектов, в рамках которых идет работа по формированию концепции стандарта системы 5G. Из этих проектов стоит выделить группу METIS [1], созданную Европейской комиссией при поддержке Alcatel, Ericsson, Nokia, Huawei и др., работающую совместно с ней группу 5GPPP, немецкую команду NGMN [2], проект китайского правительства IMT-2020 (5G) Promotion Group [3], южнокорейский 5G Forum [4, 5]. При этом в документах различных проектов рассматриваются схемы

DOI: [10.20535/S0021347017070019](https://doi.org/10.20535/S0021347017070019)

© Д. А. Покаместов, Я. В. Крюков, Е. В. Рогожников, Р. Р. Абенов, А. Я. Демидов, 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marsch, P.; Da Silva, I.; El Ayoubi, S. E.; Boldi, O. M.; et al. 5G RAN Architecture and Functional Design. METIS White Paper. 2016. 27 p.
2. 5G Initiative Team. NGMN 5G White Paper. 2015. 125 p.
3. 5G PPP Architecture Working Group. View on 5G Architecture (white paper). 2016. 61 p.
4. 5G Network Architecture Design. IMT-2020 White Paper. 2016, 25 p.
5. Тихвинский, В. О.; Бочечка, Г. С. Концептуальные аспекты создания 5G. Электросвязь, № 10, С. 29–34, 2013. URL: http://w.raenitt.ru/publication/5G_projects_elsv.pdf.
6. Jain, M.; Choi, Jung Il; Kim, Taemin; Bharadia, Dinesh; Seth, Siddharth; Srinivasan, Kannan; Levis, Philip; Katti, Sachin; Sinha, Prasun. Practical, real-time, full duplex wireless. *Proc. of 17th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2011. С. 301–312. DOI: [10.1145/2030613.2030647](https://doi.org/10.1145/2030613.2030647).
7. Choi, Jung Il; Jain, Mayank; Srinivasan, Kannan; Levis, Phil; Katti, Sachin. Achieving single channel, full duplex wireless communication. *Proc. of Sixteenth Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2010, pp. 1–12. DOI: [10.1145/1859995.1859997](https://doi.org/10.1145/1859995.1859997).
8. Duarte, M.; Dick, C.; Sabharwal, A. Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 11, No. 12, p. 4296–4307, 2012. DOI: [10.1109/TWC.2012.102612.111278](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.102612.111278).
9. Rogozhnikov, E. V.; Koldomov, A. S.; Vorobyov, V. A. Full duplex wireless communication system, analog cancellation: Review of methods and experimental research. *Proc. of XII Int. Siberian Conf. on Control and Communications*, SIBCON-2016, 12–14 May 2016, Moscow, Russia. IEEE, 2016, p. 1–5. DOI: [10.1109/SIBCON.2016.7491777](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491777).
10. Bharadia, Dinesh; McMilin, Emily; Katti, Sachin. Full duplex radios. *Proc. of Conf. on SIGCOMM*, 12–16 Aug. 2013, Hong Kong, China. Vol. 43, No. 4, p. 375–386. DOI: [10.1145/2534169.2486033](https://doi.org/10.1145/2534169.2486033).
11. Абенов, Р. Р.; Вершинин, А. С.; Ворошилин, Е. П.; Рогожников, Е. В. Исследование методов эквализирования для систем связи с использованием OFDM сигналов. *Вестник СибГУТИ*, № 1, С. 50–56, 2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19422242>.
12. Каплун, Д.; Канатов, И.; Азаренков, Л. Банк цифровых фильтров. *Компоненты и Технологии*, №

- 10, с. 156, 2007. URL: http://kit-e.ru/articles/dsp/2007_10_156.php.
13. Bellanger, M.; et al. *FBMC physical layer: a primer*. PHYDYAS, Jan. 2010.
14. 5G Waveform Candidate Selection. URL: http://www.5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW_D3.1_v1.1_final.pdf.
15. Premnath, S. N.; Wasden, D.; Kasera, S. K.; Patwari, N.; Farhang-Boroujeny, B. Beyond OFDM: Best-effort dynamic spectrum access using filterbank multicarrier. *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 21, No. 3, June 2013. DOI: [10.1109/TNET.2012.2213344](https://doi.org/10.1109/TNET.2012.2213344).
16. Балашова, К.В.; Лобанов, Н.А.; Долгих, Д.А. Filter bank multicarrier модулятор. *Матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2012»*, 16–18 мая 2012, Томск, Россия. Томск, 2012, Ч. 2, С. 75–78.
17. Farhang-Boroujeny, B. OFDM versus filter bank multicarrier. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 28, No. 3, P. 92–112, 2011. DOI: [10.1109/MSP.2011.940267](https://doi.org/10.1109/MSP.2011.940267).
18. Marcus, M. J. 5G and «IMT for 2020 and beyond» [Spectrum Policy and Regulatory Issues]. *IEEE Wireless Commun.*, Vol. 22, No. 4, P. 2–3, 2015. DOI: [10.1109/MWC.2015.7224717](https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7224717).
19. Soldani, D.; Manzalini, A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 10, No. 1, P. 32–42, 2015. DOI: [10.1109/MVT.2014.2380581](https://doi.org/10.1109/MVT.2014.2380581).
20. Benjebbour, Anass; Saito, Keisuke; Li, Anxin; Kishiyama, Yoshihisa; Nakamura, Takehiro. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *Proc. of Int. Conf. on Wireless Networks and Mobile Communications*, WINCOM, 20–23 Oct. 2015, Marrakech, Morocco. IEEE, 2015, p. 1–6. DOI: [10.1109/WINCOM.2015.7381343](https://doi.org/10.1109/WINCOM.2015.7381343).
21. Zhang, Yi; Wang, Hui-Ming; Yang, Qian; Ding, Zhiguo. Secrecy sum rate maximization in non-orthogonal multiple access. *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 20, No. 5, P. 930–933, 2016. DOI: [10.1109/LCOMM.2016.2539162](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2539162).
22. Dai, Linglong; Wang, Bichai; Yuan, Yifei; Han, Shuangfeng; I, Chih-lin; Wang, Zhaocheng. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 53, No. 9, P. 74–81, 2015. DOI: [10.1109/MCOM.2015.7263349](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263349).
23. Крюков, Я.В.; Демидов, А.Я.; Покаместов, Д.А. Алгоритм расчета мощности каналов при неортогональном множественном доступе NOMA. *Доклады ТУСУР*, Т. 19, № 4, С. 91–94, 2016. URL: <https://journal.tusur.ru/ru/arhiv/4-2016/algoritm-rascheta-moschnosti-kanalov-pri-neortogonalnom-mnozhestvennom-dostupe-noma>.
24. 3GPP TS 36.211, version 9.1.0, 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Channels and Modulation, 2010.
25. Nikopour, H.; Baligh, H. Sparse code multiple access. *Proc. of 24th Int. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, PIMRC, 8–11 Sept. 2013, London, UK. IEEE, 2013, pp. 332–336. DOI: [10.1109/PIMRC.2013.6666156](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666156).
26. Mu, Hang; Ma, Zheng; Alhaji, Mahamuda; Fan, Pingzhi; Chen, Dageng. A fixed low complexity message pass algorithm detector for up-link SCMA system. *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Vol. 4, No. 6, P. 585–588, 2015. DOI: [10.1109/LWC.2015.2469668](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2469668).
27. Покаместов, Д.А.; Демидов, А.Я.; Крюков, Я.В.; Рогожников, Е.В.; Абенов, Р.Р. Формирование и обработка сигналов множественного доступа с разреженным кодом. *Электросвязь*, № 10, С. 56–61, 2016.
28. Покаместов, Д.А.; Демидов, А.Я.; Крюков, Я.В. Влияние формирующих матриц на помехозашщщенность каналов связи с множественным доступом на основе разреженных кодов. *Доклады ТУСУР*, Т. 19, № 3, С. 65–69, 2016. URL: <https://journal.tusur.ru/ru/arhiv/3-2016/vliyanie-formiruyushchih-matrits-na-pomehozaschischenost-kanalov-svyazi-s-mnozhestvennym-dostupom-na-osnove-razrezhennyh-kodov>.

Поступила в редакцию 24.11.2016

После переработки 11.04.2017
