

УДК 621.391

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНЫМ НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ COMPRESSIVE SENSING

Д. Ю. ГОЛОВАНОВ, В. И. ПАРФЕНОВ

*Воронежский государственный университет,  
Россия, Воронеж, 394018, Университетская пл., д. 1*

**Аннотация.** В работе рассмотрена задача обнаружения квазидетерминированных сигналов на фоне шума при цифровой обработке. При этом в качестве критерия синтеза подобных алгоритмов использован критерий минимума затрачиваемых арифметических операций при заданной эффективности обнаружения. С этой целью подобные алгоритмы синтезированы на основе принципов теории Compressive Sensing. С целью проверки эффективности разработанных алгоритмов проведено их компьютерное моделирование, в результате которого определено, каким образом полная вероятность ошибки обнаружения зависит от отношения сигнал/шум и степени сжатия (отношение числа элементов в векторах достаточной статистики до и после «сжатия»). Определены потери в эффективности обнаружения предложенных алгоритмов по сравнению с классическим, оптимальным в соответствии с методом максимального правдоподобия, при различных значениях отношения сигнал/шум и степени сжатия. Одновременно, указан выигрыш в количестве используемых арифметических операций предложенных алгоритмов по сравнению с классическим. Приведены результаты, позволяющие сделать обоснованный выбор алгоритма обнаружения в зависимости от имеющихся аппаратных возможностей и допустимого ухудшения эффективности обнаружения.

**Ключевые слова:** алгоритм обнаружения; отношение правдоподобия; достаточная статистика; неэнергетический параметр; разреженный сигнал; полная вероятность ошибки; критерий идеального наблюдателя; отношение сигнал/шум; корреляционная функция; orthogonal matching pursuit; compressive sensing

### ВВЕДЕНИЕ

Теория обнаружения является известным, хорошо разработанным вопросом статистической радиотехники, неоднократно излагавшимся в монографиях и учебной литературе [1–4]. Однако исследования по теории обнаружения продолжаются, о чем свидетельствуют регулярно появляющиеся журнальные статьи, посвященные этой теме.

Обычно рассматриваются только специальные вопросы этой теории. Данная статья посвящена разработке и исследованию новых алгоритмов обнаружения цифровых сигналов с неизвестными параметрами, при практиче-

ской реализации которых требуется значительно меньшее количество математических операций по сравнению с известными.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция к построению радиосистем различного назначения полностью в цифровой области [5]. При этом сигнал с выхода приемной антенны подается сразу в аналого-цифровой преобразователь и дальнейшая обработка осуществляется непосредственно над отсчетами входного сигнала. Количество обрабатываемых отсчетов определяется максимальной частотой в спектре этого сигнала [4, 5]. Увеличение этой частоты, что также является тенден-

DOI: [10.20535/S0021347018080046](https://doi.org/10.20535/S0021347018080046)

© Д. Ю. Голованов, В. И. Парфенов, 2018

ред. Ю.Б.Кобзарева. М.: Иностранная литература, 1963. 432 с.

2. Ван Трис, Г. *Теория обнаружения, оценок и модуляции*. Т. 1. Пер. с англ. под ред. В.И. Тихонова. М.: Сов. радио. 1972. 744 с.

3. Акимов, П.С.; и др. *Теория обнаружения сигналов*. Под ред. П.А.Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

4. Шахтарин, Б.И. *Обнаружение сигналов: учебное пособие для вузов*. 3-е изд., испр. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 464 с.

5. Вишневецкий, В.М.; и др. *Широкополосные беспроводные сети передачи информации*. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

6. Candes, E. J.; Wakin, M. B. "An introduction to compressive sampling," *IEEE Signal Processing Mag.*, Vol. 25, No. 2, P. 21-30, 2008. DOI: [10.1109/MSP.2007.914731](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.914731).

7. Donoho, D. L. "Compressed sensing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 52, No. 4, P. 1289-1306, 2006. DOI: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).

8. Eldar, Y. C.; Kutyniok, G. *Compressed Sensing: Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2012. 555 p.

9. Foucart, S.; Rauhut, H. *A Mathematical Introduction to Compressive Sensing*. Springer, 2013. 625 p. DOI: [10.1007/978-0-8176-4948-7](https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4948-7).

10. Парфенов, В.И.; Голованов, Д.Ю. "Определение незанятых частотных поддиапазонов по сжатым измерениям," *Инфокоммуникационные технологии*, Т. 13, № 3, С. 305-312, 2015. DOI: [10.18469/ikt.2015.13.3.11](https://doi.org/10.18469/ikt.2015.13.3.11).

11. Парфенов, В.И.; Голованов, Д.Ю. "Принципы построения и анализ эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей на основе теории Compressive Sensing," *Цифровая обработка сигналов*, № 2, С. 14-19, 2016.

12. Парфенов, В.И.; Голованов, Д.Ю. "Обнаружение дискретных разреженных сигналов с частотой дискретизации, не превышающей частоту Найквиста," *Журнал радиоэлектроники*, № 6, 2017. URI: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/1/abstract.html>.

13. Draganic, A.; Orovic, I.; Stankovic, S. "On some common compressive sensing recovery algorithms and applications," *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, Vol. 30, No. 4, P. 477-510, 2017. DOI: [10.2298/FUEE1704477D](https://doi.org/10.2298/FUEE1704477D).

14. Abo-Zahhad, M. M.; Hussein, A. I.; Mohamed, A. M. "Compressive sensing algorithms for signal processing applications: a survey," *Int. J. Commun., Network System Sci.*, Vol. 8, No. 6, P. 197-216, 2015. DOI: [10.4236/ijcns.2015.86021](https://doi.org/10.4236/ijcns.2015.86021).

15. Allen-Zhu, Z.; Gelashvili, R.; Razenshteyn, I. "Restricted isometry property for general p-norms," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 62, No. 10, P. 5839-5854, 2016. DOI: [10.1109/TIT.2016.2598296](https://doi.org/10.1109/TIT.2016.2598296).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хелстром, К. *Статистическая теория обнаружения сигналов*. Пер. с англ. Г.Ю.Кобзаревой, под

16. Стренг, Г. *Линейная алгебра и ее применения*. Пер. с англ. Ю. А. Кузнецова и Д. М. Фаре, под ред. Г. И. Марчука. М.: Мир, 1980. 456 с.

17. Tropp, J. A.; Gilbert, A. C. "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 53, No. 12, P. 4655-4666, 2007. DOI: [10.1109/TIT.2007.909108](https://doi.org/10.1109/TIT.2007.909108).

18. Cai, T. T.; Wang, L. "Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 57, No. 7, P. 4680-4688, 2011. DOI: [10.1109/TIT.2011.2146090](https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2146090).

19. Wang, J.; Shim, B. "Exact recovery of sparse signals using orthogonal matching pursuit: how many iterations do we need?," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 64, No. 16, P. 4194-4202, 2016. DOI: [10.1109/TSP.2016.2568162](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2568162).

20. Needell, D.; Tropp, J. A. "CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 26, No. 3, P. 301-321, 2009. DOI: [10.1016/j.acha.2008.07.002](https://doi.org/10.1016/j.acha.2008.07.002).

21. Sturm, B. L.; Christensen, M. G. "Comparison of orthogonal matching pursuit implementations," *Proc. of 20th European Signal Processing Conf., EUSIPCO*, 27-31 Aug. 2012, Bucharest, Romania. IEEE, 2012, P. 220-224. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6333943/>.

22. Berinde, R.; Indyk, P.; Ruzic, M. "Practical near-optimal sparse recovery in the L1 norm," *Proc. of 46th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing*, 23-26 Sept. 2008, Urbana-Champaign, IL, USA. IEEE, 2008, P. 198-205. DOI: [10.1109/ALLERTON.2008.4797556](https://doi.org/10.1109/ALLERTON.2008.4797556).

Поступила в редакцию 10.09.2017

После переработки 15.06.2018