

УДК 621.37:51-74

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ С УНИМОДАЛЬНЫМ СПЕКТРОМ

В. Г. АНДРЕЕВ¹, Н. Л. ЧАН¹, Т. Ф. НГУЕН²

¹Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, 390005, ул. Гагарина, д. 59/1

²Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона,
Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, 236

Аннотация. Предложен метод восстановления коэффициентов дискретной автокорреляционной функции случайных сигналов с унимодальной спектральной плотностью мощности для построения их параметрических моделей. Метод базируется на нахождении оптимальных значений относительной ширины ΔFT и весового коэффициента $\alpha \in [0; 1]$ спектральной моды, характеризующего доли гауссовской и резонансной составляющих в огибающей спектра. Предлагаемый метод дает возможность уменьшить в 1,5–4 раза невязку между контрольным и оцениваемым спектрами по сравнению с известными подходами к параметрическому спектральному анализу. Увеличение адекватности спектрального оценивания дает возможность сократить в 2,3–4 раза длину M анализируемой временной выборки при сохранении достигаемой другими известными параметрическими методами точности спектрального анализа. Выигрыши достигаются за счет использования априорной информации о спектральных свойствах анализируемого процесса.

Ключевые слова: спектр; спектральное оценивание; дискретная автокорреляционная функция; авторегрессионная модель; авторегрессия; спектральная плотность мощности; параметрические оценки

В настоящее время в различных областях радиотехники существует проблема уменьшения влияния шумов, осложняющих спектральное оценивание квазистационарных сигналов в различных прикладных областях [1, 2, 17]. Решение этой задачи характерно для параметрического спектрального анализа, основанного на восстановленных коэффициентах автокорреляционной функции [3, 4].

Подобное восстановление возможно в тех задачах, где спектральная плотность мощности (СПМ) исходных, не подверженных влиянию шумов, сигналов имеет унимодальный вид с частично известными параметрами спектральной моды. К таким задачам можно отнести обработку и оценивание параметров отражений электромагнитных волн от протяжен-

ных объектов (облачность, туман, стаи птиц и насекомых, пылевые облака, подстилающая поверхность), а также техническую и медицинскую диагностику [3, 5, 18, 19].

Отметим, что существует возможность путем нахождения оптимальных значений относительной ширины ΔFT (F — частота, T — период времени между выборками) спектральной моды и весового коэффициента α , характеризующего долю гауссовской и долю $(1 - \alpha)$ резонансной составляющих в огибающей унимодального спектра, компенсировать деструктивное воздействие аддитивного белого гауссовского шума на оценку автокорреляционных свойств экспериментального сигнала [1, 21, 22].

DOI: [10.20535/S0021347019010059](https://doi.org/10.20535/S0021347019010059)

© В. Г. Андреев, Н. Л. Чан, Т. Ф. Нгуен, 2019

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марпл-мл., С. Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
2. Андреев, В. Г. "Оптимизация авторегрессионных моделей мешающих радиоотражений," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 51, № 7, С. 40-47, 2008. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347008070042>.
3. Андреев, В. Г.; Чан, Н. Л.; Белокуров, В. А. "Параметрический спектральный анализ зашумленных сигналов с гауссовской формой спектра," *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, № 55, С. 16-21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2016-58-4-24-29>.
4. Kay, S. M.; Marple Jr., S. L. "Spectrum analysis-A modern perspective," *Proc. IEEE*, Vol. 69, No. 11, p. 1380-1419, 1981. DOI: [10.1109/PROC.1981.12184](https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12184).
5. Андреев, В. Г.; Нгуен, Т. Ф. "Обработка кардосигналов на фоне комбинированных помех," *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, № 48, С. 60-64, 2014. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21724317>.
6. Бакулев, П. А.; Кошелев, В. И.; Андреев, В. Г. "Оптимизация АРСС—моделирования эхо-сигналов," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 37, № 9, С. 3-8, 1994.
7. Андреев, В. Г.; Чан, Н. Л. "Синтез модифицированной переопределённой авторегрессионной модели по короткой выборке случайного процесса," *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, № 54, С. 45-49, 2015. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25588818>.
8. Akaike, H. "Power spectrum estimation through autoregressive model fitting," *Ann. Inst. Stat. Math.*, Vol. 21, p. 407-419, 1969. DOI: [10.1007/BF02532269](https://doi.org/10.1007/BF02532269).
9. Кошелев, В. И. *АРСС-модели случайных процессов. Прикладные задачи синтеза и оптимизации*. М.: Радио и связь, 2002. 112 с.
10. Андреев, В. Г. "Оптимизация авторегрессионных моделей радиоотражений," *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*,

№ 35, С. 12-15, 2011. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15617928>.

11. Андреев, В.Г.; Нгуен, В.Ш. “Параметрическое моделирование коррелированных радиоотражений для анализа эффективности обработки эхо-сигналов,” *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, № 18, С. 40-45, 2006. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11743408>.

12. Кошелев, В.И.; Андреев, В.Г. “Синтез АРСС-моделей эхо-сигналов,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 36, № 7, С. 8-13, 1993.

13. Tuuk, Peter B.; Marple, S. Lawrence. “Compressed sensing radar amid noise and clutter using interference covariance information,” *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.*, Vol. 50, No. 2, p. 887-897, Apr 2014. DOI: [10.1109/TAES.2014.120523](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120523).

14. Андреев, В.Г.; Нгуен, Ш.В. “Оптимизация фильтров моделирования мешающих радиоотражений для исследования систем первичной обработки эхо-сигналов,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 49, № 10, С. 69-76, 2006. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347006100074>.

15. Горелик, А.Г.; Коломиец, С.Ф.; Куприянов, П.В. “Форма спектра рассеянного поля как источник информации о рассеивающей среде и протекающих в ней динамических процессах,” *Научный вестник МГТУ ГА. Серия Радиофизика и электроника*, № 176, С. 18, 2012.

16. Коломиец, С.Ф. “Интерпретация Z-R соотношения в дождях на конечных периодах времени изме-

рения с учетом условий рассеяния Ми,” *Успехи современной радиоэлектроники*, № 12, С. 51-61, 2007. URI: <http://www.radiotec.ru/article/2154>.

17. Dmytro M. Piza, T. I. Bugrova, V. N. Lavrentiev, Dmytro S. Semenov. “Method of forming classified training sample in case of spacial signal processing under influence of combined interference”. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol 61, No. 7, pp.420-428, 2018. DOI: [10.3103/S0735272718070051](https://doi.org/10.3103/S0735272718070051).

18. David I. Lekhovyskiy. “Adaptive lattice filters for systems of space-time processing of non-stationary Gaussian processes”. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol 61, No. 11, pp.477-514, 2018. DOI: [10.3103/S0735272718110018](https://doi.org/10.3103/S0735272718110018).

19. V. A. Dvinskikh, K. A. Razumikhin. “Spectral analysis of digital quasiperiodic signals”. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol 48, No. 8, pp.14-17, 2005. DOI: [10.3103/S0735272705080030](https://doi.org/10.3103/S0735272705080030).

20. V. G. Andrejev, Nguyen Tien Phat. “Adaptive processing of signals on a background of clutter and noise”. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol 58, No. 2, pp.48-53, 2015. DOI: [10.3103/S0735272715020053](https://doi.org/10.3103/S0735272715020053).

21. K. V. Bisina ; Maleeha Abdul Azeez. “Optimized estimation of power spectral density”. 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). IEEE. DOI: [10.1109/ICCONS.2017.8250588](https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250588).

22. Valentina M. Pukhova ; Taras V. Kustov ; Gabriele Ferrini. “Time-frequency analysis of non-stationary signals”. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE. DOI: [10.1109/EIConRus.2018.8317292](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317292).

Поступила в редакцию 05.03.2017

После доработки 22.12.2018

Принята к публикации 09.01.2019