

УДК 621.396.96:551.501.815

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРАДИОЛОКАТОРАХ. Ч. 3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЙ ОТ МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ

Д. И. ЛЕХОВИЦКИЙ<sup>1</sup>, Д. В. АТАМАНСКИЙ<sup>2</sup>, Д. С. РАЧКОВ<sup>1</sup>, А. В. СЕМЕНЯКА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Украина, Харьков, 61166, пр-т Ленина, 14

<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба,  
Украина, Харьков, 61023, ул. Сумская 77/79

**Аннотация.** Обоснована методика, приведены количественные результаты аналитического и экспериментального исследования и сравнения статистических характеристик классических и «параметрических» методов воспроизведения энергетических спектров междупериодных флуктуаций отражений различной природы (в том числе от метеообразований) в импульсных РЛС. Исследована типичная для практики «адаптивная» ситуация, в которой априори неизвестная корреляционная матрица отражений заменяется оценками различного вида, формируемыми по обучающим выборкам конечного объема. Обоснованы алгоритмы, целесообразные для использования в импульсных РЛС различного назначения, в том числе в импульсных доплеровских метеорадиолокаторах. Обсуждаются рациональные способы их практической реализации на унифицированной основе адаптивных решетчатых фильтров.

**Ключевые слова:** процесс авторегрессии; энергетический спектр; методы спектрального оценивания; спектральная функция; адаптивный решетчатый фильтр; корреляционная матрица; оценка максимального правдоподобия; метод максимальной энтропии Берга; метод минимальной дисперсии Кейпона

### ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Статья посвящена сравнению качества воспроизведения энергетических спектров междупериодных флуктуаций отражений от метеообразований (МО) известными и новыми методами спектрального оценивания (СО) в реальных условиях использования вместо априори неизвестной корреляционной матрицы (КМ) анализируемой смеси ее оценок различного вида, формируемых по обучающим выборкам конечного объема. Она продолжает статьи [1, 2] и содержит 2 раздела и заключение.

В первом разделе описана методика сравнения методов СО и сравниваются возможно-

сти воспроизведения на их основе спектров МО в указанных условиях. В роли показателей качества выступают средние значения  $\bar{\varepsilon}_1$  и  $\bar{\varepsilon}_2$  случайных в этих условиях критериев «интегральной относительной среднеквадратической ошибки» (ПИК) [1.30] и «интегральной относительной ошибки» (ВИК) [2.3] соответственно.

Для большинства методов и используемых оценок КМ эти показатели определяются по результатам математического моделирования, хотя для некоторых из них удастся получить достаточно точные аналитические приближения к искомым средним значениям  $\bar{\varepsilon}_1$ . ПИК и

DOI: [10.20535/S0021347017020017](https://doi.org/10.20535/S0021347017020017)

© Д. И. Леховицкий, Д. В. Атаманский, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, 2017

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оценка энергетических спектров отражений в импульсных доплеровских метеорадиолокаторах. Ч. 1. Разновидности алгоритмов спектрального оценивания / Д.И. Леховицкий, Д.В. Атаманский, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2015. — Т. 58, № 12. — С. 3–30. — DOI : [10.20535/S0021347015120018](https://doi.org/10.20535/S0021347015120018).
2. Оценка энергетических спектров отражений в импульсных доплеровских метеорадиолокаторах. Ч. 2. Предельные возможности / Д.И. Леховицкий, Д.В. Атаманский, Д.С. Рачков, А.В. Семеняка // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2016. — Т. 59, № 9. — С. 3–20. — DOI : [10.20535/S0021347016090016](https://doi.org/10.20535/S0021347016090016).
3. Reed, I. S. Rapid convergence rate in adaptive arrays / I. S. Reed, J. D. Mallett, L. E. Brennan // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. — Nov. 1974. — Vol. AES-10, No. 6. — P. 853–863. — DOI : [10.1109/TAES.1974.307893](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893).
4. Абрамович, Ю. И. Анализ эффективности адаптивной максимизации отношения сигнал/помеха, использующей обращение оценки корреляционной матрицы / Ю.И. Абрамович, А.И. Неврев // Радиотехника и электроника. — 1981. — Т. 26, № 12. — С. 2558–2566.
5. Abramovich, Y. I. Band-inverse TVAR covariance matrix estimation for adaptive detection / Yuri I. Abramovich, Nicholas K. Spencer, Ben A. Johnson // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. — Jan. 2010. — Vol. 46, No. 1. — P. 375–396. — DOI : [10.1109/TAES.2010.5417169](https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5417169).
6. Adaptive lattice filters for band-inverse (TAVR) covariance matrix approximations / D. Lekhovyt'skiy, Y. Abramovich / Int. Radar Symp. IRS2009. — 09–11 Sept. 2009, Hamburg, Germany : proc. — Hamburg, 2009. — P. 535–539.
7. Ленточно-диагональная регуляризация МП оценок корреляционных матриц гауссовых помех в алгоритмах адаптации антенных решеток / Д.И. Леховицкий, Ю.И. Абрамович, Г.А. Жуга, Д.С. Рачков // Прикладная радиоэлектроника. — 2010. — Т. 9, № 1. — С. 107–121.
8. Abramovich, Y. I. A Modified GLRT and AMF framework for adaptive detectors / Yuri I. Abramovich, Nicholas K. Spencer, Alexei Y. Gorokhov // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. — Jul. 2007. — Vol. 43, No. 3. — P. 1017–1051. — DOI : [10.1109/TAES.2007.4383590](https://doi.org/10.1109/TAES.2007.4383590).
9. Burg, J. P. A New Analysis Technique for Time Series Data / J. P. Burg // Modern Spectrum Analysis. — IEEE Press, 1978 [ed. by D. G. Childers]. — P. 42–48.
10. Фридландер, Б. Решетчатые фильтры для адаптивной обработки данных / Б. Фридландер // ТИИЭР. — 1982. — Т. 70, № 58. — С. 54–97.
11. Фридландер, Б. Методы спектрального оценивания на основе решетчатой структуры / Б. Фридландер // ТИИЭР. — 1982. — Т. 70, № 9. — С. 95–125.
12. Адаптивные фильтры / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 392 с.
13. Semenika, A. V. Comparative analysis of Toeplitz covariance matrix estimation methods for space-time adaptive signal processing / A. V. Semenika, D. I. Lekhovyt'skiy, D. S. Rachkov // Proc. of IEEE CIE Int. Conf. on Radar : RADAR-2011, 24–27 Oct. 2011, Chengdu, China : proc. — IEEE, 2011. — P. 696–699. — DOI : [10.1109/CIE-Radar.2011.6159636](https://doi.org/10.1109/CIE-Radar.2011.6159636).
14. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. — М. : Статистика, 1980. — 95 с.
15. Nitzberg, R. Application of maximum likelihood estimation of persymmetric covariance matrices to adaptive processing / Ramon Nitzberg // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. — Jan. 1980. — Vol. AES-16, No. 1. — P. 124–127. — DOI : [10.1109/TAES.1980.308887](https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308887).
16. Абрамович, Ю. И. Регуляризованный метод адаптивной оптимизации по критерию максимума отношения сигнал/помеха / Ю.И. Абрамович // Радиотехника и электроника. — 1981. — Т. 26, № 3. — С. 543–551.
17. Леховицкий, Д. И. Методы адаптивной решетчатой фильтрации в задачах пространственно-временной обработки сигналов / Д.И. Леховицкий, В.И. Зарицкий, И.Д. Раков, [и др.]. — М. : РТИ АН СССР, 1987. — 30 с. — (Препринт / АН СССР, РТИ, № 8610, 1987).
18. Леховицкий, Д. И. О стратегии использования МП оценок КМ в многоканальных системах адаптивной обработки сигналов на фоне помех / Д.И. Леховицкий, С.В. Полишко, Г.А. Жуга // Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития : 1-я междунар. научная конф., 2006 : тезисы докл. — Харьков–Туапсе, 2006. — С. 444–445.

19. СДЦ в импульсных РЛС: 3. Структуры, параметры и эффективность квазиоптимальных систем междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга, Д. С. Рачков // Прикладная радиоэлектроника. — 2009. — Т. 8, № 2. — С. 109–123.
20. Экспериментальные исследования систем СДЦ на основе адаптивных решетчатых фильтров в импульсных РЛС с попачечной возбуждающей периодов зондирования / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга, В. Н. Лаврентьев // Прикладная радиоэлектроника. — 2008. — Т. 7, № 1. — С. 3–16.
21. Стратонович, Р. Л. Принципы адаптивного приема / Р. Л. Стратонович. — М.: Сов. радио, 1973. — 144 с.
22. Abramovich, Y. I. Order estimation and discrimination between stationary and time-varying (TVAR) autoregressive models / Yuri I. Abramovich, Nicholas K. Spencer, Michael D. E. Turley // IEEE Trans. Signal Process. — Jun. 2007. — Vol. 55, No. 6. — P. 2861–2876. — DOI : [10.1109/TSP.2007.893966](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.893966).
23. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз : пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с.
24. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер : пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986. — 448 с.
25. Кокин, В. Н. Использование текущей оценки обратной корреляционной матрицы помех в адаптивном обнаружителе / В. Н. Кокин, А. В. Темеров, В. В. Феднин // Радиотехника и электроника. — 1980. — Т. 25, № 7. — С. 1540–1542.
26. Пат. № 3876847 США, МКИ 325/367 от 8.04.1975 / С. Гираудон.
27. Лексаченко, В. А. Синтез многомерного «выбеливающего» фильтра по методу Грама-Шмидта / В. А. Лексаченко, А. А. Шаталов // Радиотехника и электроника. — 1976. — Т. 21, № 1. — С. 112–119.
28. Бондаренко, Б. Ф. Применение методов функционального анализа для решения задач синтеза системы пространственно-временной обработки сигналов / Б. Ф. Бондаренко, В. П. Прокофьев // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 1982. — Т. 25, № 7. — С. 12–16.
29. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. — М.: Радио и связь, 1981. — 416 с.
30. Спектральный анализ отражений в доплеровских метеорадиолокаторах / Д. И. Леховицкий, Д. В. Атаманский, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка // Радиолокация, навигация, связь : XVII междунар. науч.-техн. конф., 12–14 апр. 2011, Воронеж, РФ. — Воронеж, 2011. — С. 1968–1979.
31. СДЦ в импульсных РЛС: 5. Адаптивные системы междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 506–525.
32. Efremov, V. Results of theoretical and experimental investigations of meteorological formation power spectrum using «superresolution» methods / V. Efremov, V. Laurukevich, D. Lekhovitsky, I. Vylegzhanin, B. Vovshin // Int. Radar Symp. : IRS2009, 09–11 Sept. 2009, Hamburg, Germany : proc. — Hamburg, 2009. — P. 777–784.
33. Laurukevich, V. Estimation of energy, spectral and polarimetric characteristics of meteorological echoes in DMRL-C / V. Laurukevich, A. Pushkov, I. Vylegzhanin, et al. // Int. Radar Symp. : IRS2011, 7–9 Sept. 2011, Leipzig, Germany : proc. — Leipzig, 2011. — P. 267–272.
34. Efremov, V. The new generation of Russian C-band meteorological radars. Technical features, operation modes and algorithms / V. Efremov, I. Vylegzhanin, B. Vovshin // Int. Radar Symp. : IRS2011, 7–9 Sept. 2011, Leipzig, Germany : proc. — Leipzig, 2011. — P. 239–244.
35. Lekhovitskiy, D. I. Statistical analysis of estimation accuracy of the meteorological formations parameters in pulsed Doppler weather radars with arbitrary staggering of pulse repetition intervals / D. I. Lekhovitskiy, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka, et al. // Int. Radar Symp. : IRS2011, 7–9 Sept. 2011, Leipzig, Germany : proc. — Leipzig, 2011. — P. 273–278.
36. Laurukevich, V. The results of field tests of russian meteorological radar “DMRL-C” / V. Laurukevich, A. Pushkov, B. Vovshin, I. Vylegzhanin // IV международный радиоэлектронный Форум : 18–21 окт. 2011, Харьков, Украина : труды конф. — Харьков, 2011. — Т. 1. — С. 7–12.
37. Берг, Дж. П. Оценивание ковариационных матриц с заданной структурой / Дж. П. Берг, Д. Г. Люнбергер, Д. Л. Венгер // ТИИЭР. — 1982. — Т. 70, № 9. — С. 63–77.
38. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. Теория решетчатых структур / Д. И. Леховицкий, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, В. П. Рябуха, Д. В. Атаманский // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 380–404.
39. Адаптивные решетчатые фильтры. Часть II. Алгоритмы настройки АРФ / Д. И. Леховицкий, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, В. П. Рябуха, Д. В. Атаманский // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 4. — С. 405–418.
40. Повышение точности однозначного измерения скорости метеорообразований в доплеровских метеолокаторах с возбуждающей интервалов зондирования / Д. И. Леховицкий, Д. В. Атаманский, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 3–22. — DOI : [10.20535/S0021347015090010](https://doi.org/10.20535/S0021347015090010).
41. Lekhovitskiy, D. I. To the theory of adaptive signal processing in systems with centrally symmetric receive channels / D. I. Lekhovitskiy // EURASIP J. Advances

Signal Process. — 2016. — Vol. 33. — P. 1–11. — DOI : [10.1186/s13634-016-0329-z](https://doi.org/10.1186/s13634-016-0329-z).

42. Сравнение эффективности адаптивной обработки в произвольных и центрально-симметричных ФАР / Д.И.Леховицкий, Д.В.Атаманский, И.Г.Кириллов, В.И.Зарицкий // Антенны. — 2000. — № 1. — С. 30–35.

43. Рябуха, В. П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. Часть I. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации / В.П.Рябуха // Прикладная радиоэлектроника. — 2016. — Т. 15, № 1. — С. 11–25.

44. *Lekhovytsky, D. I.* Thirty years experience in development of adaptive lattice filters theory, techniques and testing in Kharkiv / D. I. Lekhovyt'skiy // VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques : ICATT2011, 20–23 Sept. 2011, Kyiv, Ukraine : proc. — IEEE, 2011. — P. 51–56. — DOI : [10.1109/ICATT.2011.6170713](https://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170713).

45. *Sayed, A. H.* Fundamentals of adaptive filtering / A. H. Sayed. — NJ, Hoboken : John Wiley and Sons Inc., 2003. — 1125 p.

46. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В.И.Джиган. — М. : Техносфера, 2013. — 528 с.

47. Lattice implementation of “superresolving” methods for meteorological objects spectra estimation / Dmytro S. Rachkov, David I. Lekhovyt'skiy, Andrii V. Semeniaka, Boris M. Vovshin, Uladzimir U. Laurukevich // 15th Int. Radar Symp. : IRS 2014, 16–18 June 2014, Gdansk, Poland : proc. — IEEE, 2014. — P. 35–38. — DOI : [10.1109/IRS.2014.6869229](https://doi.org/10.1109/IRS.2014.6869229).

48. *Rachkov, D. S.* Lattice-filter-based unified structure of system for interperiod processing of weather

radar signals / Dmytro S. Rachkov, David I. Lekhovyt'skiy // IEEE Int. Radar Conf. : 10–15 May 2015, Arlington, USA : proc. — IEEE, 2015. — P. 1234–1239. — DOI : [10.1109/RADAR.2015.7131183](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131183).

49. *Lekhovytsky, D. I.* K-rank modification of adaptive lattice filter parameters / David I. Lekhovyt'skiy, Dmytro S. Rachkov, Andrii V. Semeniaka // IEEE Int. Radar Conf. : 10–15 May 2015, Arlington, USA : proc. — IEEE, 2015. — P. 127–132. — DOI : [10.1109/RADAR.2015.7130983](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7130983).

50. Рекуррентные алгоритмы настройки адаптивных решетчатых фильтров / Д.И.Леховицкий, В.П.Рябуха, Д.С.Рачков, А.В.Семеняка // ТКЭА. — 2016. — № 2–3. — С. 26–32. — DOI : [10.15222/TKEA2016.2-3.26](https://doi.org/10.15222/TKEA2016.2-3.26).

51. *Lev-Ari, H.* Schur and Levinson algorithms for nonstationary processes / H. Lev-Ari, T. Kailath // Acoustic, Speech and Signal Processing : IEEE Int. Conf. ICASSP, 30 Mar.–1 Apr. 1981, Atlanta, CA, USA : proc. — IEEE, 1981. — P. 860–864. — DOI : [10.1109/ICASSP.1981.1171194](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1981.1171194).

52. *Sharman, K. C.* Spatial lattice filter for high-resolution spectral analysis of array data / K. C. Sharman, T. S. Durrani // IEE Proc. F: Commun. Radar Signal Process. — Apr. 1983. — Vol. 130, No. 3. — P. 279–287. — DOI : [10.1049/ip-f-1:19830047](https://doi.org/10.1049/ip-f-1:19830047).

53. Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar / Dmytro S. Rachkov, David I. Lekhovyt'skiy, Andrii V. Semeniaka, Viacheslav P. Riabukha, Dmytro V. Atamanskiy // 15th Int. Radar Symp. : IRS 2014, 16–18 June 2014, Gdansk, Poland : proc. — IEEE, 2014. — P. 215–219. — DOI : [10.1109/IRS.2014.6869251](https://doi.org/10.1109/IRS.2014.6869251).

Поступила в редакцию 09.09.2016