

УДК 621.396.965:621.391.26

АДАПТИВНЫЕ РЕШЕТЧАТЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАУССОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Д. И. ЛЕХОВИЦКИЙ

*Научно-исследовательский институт радиолокационных систем «Квант-Радиолокация»,
Украина, Киев, 03150, ул. Деловая, 5*

Аннотация. Адаптивные системы защиты импульсных РЛС от нестационарных по времени (дальности) помех обычно настраиваются по обучающим выборкам векторов комплексных амплитуд входных воздействий, расположенных в «скользящем окне» конечной протяженности. Для каждого следующего элемента дальности обучающая выборка частично модифицируется по сравнению с предыдущей за счет выхода из ее состава «старых» и входа «новых» обучающих векторов, а параметры адаптивной системы корректируются в соответствии с модифицированной оценкой корреляционной матрицы (КМ) выборки, которая обычно равна сумме исходной и модифицирующей матрицы ранга $K \geq 1$. В этом случае можно отказаться от пересчета этих параметров по новой выборке полного объема и перейти к их «экономной» коррекции на основе K -ранговой модификации матрицы, обратной оценке КМ.

Статья посвящена сравнительному анализу различных алгоритмов ($K \geq 1$)-ранговой модификации параметров адаптивных решетчатых фильтров (АРФ). Основное внимание уделено синтезу, теоретическому и экспериментальному исследованию алгоритмов ($K > 1$)-ранговой модификации параметров АРФ, не предполагающих K -кратное использование для этой цели известных алгоритмов одноранговой ($K = 1$) модификации. Синтезирован комбинированный алгоритм ($K \geq 1$)-ранговой модификации параметров АРФ, вычислительно более простой и численно более устойчивый, чем известные. Такой АРФ представляет собой эффективное средство решения широкого круга задач адаптивной пространственно-временной обработки сигналов в импульсных РЛС различного назначения.

Ключевые слова: пространственно-временная обработка; адаптивный решетчатый фильтр; оценочная корреляционная матрица; K -ранговая модификация; комбинированный алгоритм; вычислительная сложность; численная устойчивость; конечная разрядность; сигнальный процессор

ВВЕДЕНИЕ

А. Адаптивные системы пространственной, временной, пространственно-временной обработки гауссовых нестационарных сигналов решают множество задач в различных областях науки и техники. В частности, в радиотехнических, в первую очередь — радиолокационных системах, на эти системы возлагаются задачи обнаружения целей и измерения их координат на фоне помех, сопровождения, раз-

личения и распознавания, спектрального анализа и пеленгации, формирования изображений, и целый ряд других.

При всем многообразии этих задач, существует одна объединяющая их особенность — оптимальные или близкие к ним решения являются теми или иными функциями (линейными, квадратичными или билинейными формами, детерминантами, собственными значениями и/или векторами и др.) оценок априори неизвестных корреляционных матриц (КМ) (часто

DOI: [10.20535/S0021347018110018](https://doi.org/10.20535/S0021347018110018)
© Д. И. Леховицкий, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: Справочник.* Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Райс, Д. *Матричные вычисления и математическое обеспечение.* Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
3. Воеводин, В. В.; Тыртышников, Е. Е. *Вычислительные процессы с блочными матрицами.* М.: Наука, 1987. 320 с.
4. *Численные методы условной оптимизации.* Под ред. Ф. Гилла и У. Мюррея. М.: Мир, 1977. 290 с.
5. Воеводин, В. В. *Вычислительные основы линейной алгебры.* М.: Наука, 1977. 304 с.
6. Lev-Ari, H.; Kailath, T. "Schur and Levinson algorithms for nonstationary processes," in: *Proc. of IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP'81*, 30 Mar.-1 Apr. 1981, Atlanta, GA, USA. IEEE, 1981. DOI: [10.1109/ICASSP.1981.1171194](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1981.1171194).
7. Леховицкий, Д. И. "Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые фильтры," *Известия вузов. Радиофизика*, Т. 35, № 9–10, С. 790–808, 1992.
8. Burg, J. P. "A new analysis technique for time series data," NATO Advanced Study Institute on Signal Processing with Emphasis on Underwater Acoustics, 12-23 Aug. 1968, Enschede, Netherlands. Enschede, 1968.
9. Itakura, F.; Saito, S. "Digital filtering techniques for speech analysis and synthesis," in: *Proc. of 7th Int.*

Congress on Acoustics, Budapest, Hungary. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1971. Vol. 3, p. 261-264.

10. Gray, A.; Markel, J. "Digital lattice and ladder filter synthesis," *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, Vol. 21, No. 6, p. 491-500, 1973. DOI: [10.1109/TAU.1973.1162522](https://doi.org/10.1109/TAU.1973.1162522).

11. Friedlander, B. "Lattice filters for adaptive processing," *Proc. IEEE*, Vol. 70, No. 8, p. 829-867, 1982. DOI: [10.1109/PROC.1982.12407](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12407).

12. Friedlander, B. "Lattice methods for spectral estimation," *Proc. IEEE*, Vol. 70, No. 9, p. 990-1017, 1982. DOI: [10.1109/PROC.1982.12429](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12429).

13. Cowan, C. F. N.; Grant, P. M. [eds.]. *Adaptive Filters*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985. 308 p.

14. Sayed, A. H. *Fundamentals of Adaptive Filtering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. 1168 p.

15. Джиган, В. И. *Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы*. М.: Техносфера, 2013. 529 с.

16. Леховицкий, Д. И.; Рачков, Д. С.; Семеняка, А. В.; Рябуха, В. П.; Атаманский, Д. В. "Адаптивные решетчатые фильтры. Часть I. Теория решетчатых структур," *Прикладная радиоэлектроника*, Т. 10, № 4, С. 380-404, 2011.

17. Леховицкий, Д. И.; Рачков, Д. С.; Семеняка, А. В.; Рябуха, В. П.; Атаманский, Д. В. "Адаптивные решетчатые фильтры. Часть II. Алгоритмы настройки АРФ," *Прикладная радиоэлектроника*, Т. 10, № 4, С. 405-418, 2011.

18. Леховицкий, Д. И.; Милованов, С. Б.; Раков, И. Д.; Свердлов, Б. Г. "Универсальные адаптивные решетчатые фильтры. Ч. 2. Адаптация при заданном корне из оценочной корреляционной матрицы," *Известия вузов. Радиофизика*, Т. 35, № 11-12, С. 969-991, 1992.

19. Lekhovytsky, D. I. "Thirty years experience in development of adaptive lattice filters theory, techniques and testing in Kharkiv," in: *Proc. of 2011 VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, ICATT, 20-23 Sept. 2011, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2011. DOI: [10.1109/ICATT.2011.6170713](https://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170713).

20. Nitzberg, R. "Application of maximum likelihood estimation of persymmetric covariance matrices to adaptive processing," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-16, No. 1, p. 124-127, 1980. DOI: [10.1109/TAES.1980.308887](https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308887).

21. Lekhovytsky, D. I. "To the theory of adaptive signal processing in systems with centrally symmetric receive channels," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, Vol. 2016, No. 33, 2016. DOI: [10.1186/s13634-016-0329-z](https://doi.org/10.1186/s13634-016-0329-z).

22. De Maio, A.; Orlando, D. "An invariant approach to adaptive radar detection under covariance persymmetry," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 63, No. 5, p. 1297-1309, 2015. DOI: [10.1109/TSP.2014.2388441](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2388441).

23. Shkvarko, Y. V. "Unifying experiment design and convex regularization techniques for enhanced imaging with uncertain remote sensing data—Part I:

Theory," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 48, No. 1, p. 82-95, 2010. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2027695](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2027695).

24. Shkvarko, Y. V. "Unifying experiment design and convex regularization techniques for enhanced imaging with uncertain remote sensing data—Part II: Adaptive implementation and performance issues," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 48, No. 1, p. 96-111, 2010. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2027696](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2027696).

25. Shkvarko, Y. V.; Tuxpan, J.; Santos, S. "Dynamic experiment design regularization approach to adaptive imaging with array radar/SAR sensor systems," *Sensors*, Vol. 11, No. 5, p. 4483-4511, 2011. DOI: [10.3390/s110504483](https://doi.org/10.3390/s110504483).

26. Martín del Campo, G. D.; Reigber, A.; Shkvarko, Y. V. "Resolution enhanced SAR tomography: bold roman A nonparametric iterative adaptive approach," in: *Proc. of 2016 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., IGARSS*, 10-15 Jul. 2016, Beijing, China. IEEE, 2016. DOI: [10.1109/IGARSS.2016.7729838](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729838).

27. Rachkov, D. S.; Lekhovytsky, D. I. "Lattice-filter-based unified structure of system for interperiod processing of weather radar signals," in: *Proc. of 2015 IEEE Radar Conf., RadarCon*, 10-15 May 2015, Arlington, USA. IEEE, 2015, p. 1234-1239. DOI: [10.1109/RADAR.2015.7131183](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131183).

28. Rachkov, D. S.; Lekhovytsky, D. I.; Semeniaka, A. V.; Vovshin, B. M.; Laurukevich, U. U. "Lattice implementation of 'superresolving' methods for meteorological objects spectra estimation," in: *Proc. of 2014 15th Int. Radar Symp., IRS*, 16-18 Jun. 2014, Gdansk, Poland. IEEE, 2014, p. 35-38. DOI: [10.1109/IRS.2014.6869229](https://doi.org/10.1109/IRS.2014.6869229).

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

30. Reed, I. S.; Mallett, J. D.; Brennan, L. E. "Rapid convergence rate in adaptive arrays," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. AES-10, No. 6, p. 853-863, 1974. DOI: [10.1109/TAES.1974.307893](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893).

31. Rachkov, D. S.; Lekhovytsky, D. I.; Semeniaka, A. V.; Riabukha, V. P.; Atamanskiy, D. V. "Lattice-filter-based ground clutter canceller for pulse Doppler weather radar," in: *Proc. of 2014 15th Int. Radar Symp., IRS*, 16-18 Jun. 2014, Gdansk, Poland. IEEE, 2014, p. 215-219. DOI: [10.1109/IRS.2014.6869251](https://doi.org/10.1109/IRS.2014.6869251).

32. Lekhovytsky, D. I.; Atamanskiy, D. V.; Riabukha, V. P.; Rachkov, D. S.; Semeniaka, A. V. "Combining target detection against the background of jamming signals and jamming signal DOA estimation," in: *Proc. of 2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, ICATT, 21-24 Apr. 2015, Kharkiv, Ukraine. IEEE, 2015, p. 36-40. DOI: [10.1109/ICATT.2015.7136777](https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136777).

33. Yang, W.-H.; Holan, S. H.; Wikle, C. K. "Bayesian lattice filters for time-varying autoregression

and time-frequency analysis,” *Bayesian Analysis*, Vol. 11, No. 4, p. 977-1003, 2016. DOI: [10.1214/15-BA978](https://doi.org/10.1214/15-BA978).

34. Ozden, M. T. “Sequential convex combinations of multiple adaptive lattice filters in cognitive radio channel identification,” *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, Vol. 2018, p. 45, 2018. DOI: [10.1186/s13634-018-0567-3](https://doi.org/10.1186/s13634-018-0567-3).

35. Castillo-Atoche, A.; Torres-Roman, D.; Shkvarko, Y. V. “Towards real time implementation of reconstructive signal processing algorithms using systolic array coprocessors,” *J. Syst. Archit.*, Vol. 56, No. 8, p. 327-339, 2010. DOI: [10.1016/j.sysarc.2010.05.004](https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2010.05.004).

36. Shkvarko, Y. V.; Yanez, J. I.; Amao, J. A.; Martín del Campo, G. D. “Radar/SAR image resolution enhancement via unifying descriptive experiment design regularization and wavelet-domain processing,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol. 13, No. 2, p. 152-156, 2016. DOI: [10.1109/LGRS.2015.2502539](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2502539).

37. Abramovich, Y. I.; Spencer, N. K.; Johnson, B. A. “Band-inverse TVAR covariance matrix estimation for adaptive detection,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 46, No. 1, p. 375-396, 2010. DOI: [10.1109/TAES.2010.5417169](https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5417169).

38. Lekhovytskiy, D. I.; Abramovich, Y. I. “Adaptive lattice filters for band-inverse (TVAR) covariance matrix approximations: theory and practical applications,” in: *Proc. of 2009 Int. Radar Symp.*, IRS 2009, Hamburg, Germany. Hamburg: TUHH, 2009, p. 535-539.

39. Lee, D.; Morf, M.; Friedlander, B. “Recursive least squares ladder estimation algorithms,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, Vol. 29, No. 3, p. 627-641, 1981. DOI: [10.1109/TASSP.1981.1163587](https://doi.org/10.1109/TASSP.1981.1163587).

40. Dym, H.; Gohberg, I. “Extensions of band matrices with band inverses,” *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 36, p. 1-24, 1981. DOI: [10.1016/0024-3795\(81\)90215-9](https://doi.org/10.1016/0024-3795(81)90215-9).

41. Abramovich, Y. I.; Spencer, N. K.; Turley, M. D. E. “Time-varying autoregressive (TVAR) models for multiple radar observations,” *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, No. 4, p. 1298-1311, 2007. DOI: [10.1109/TSP.2006.888064](https://doi.org/10.1109/TSP.2006.888064).

42. Abramovich, Y. I.; Spencer, N. K.; Turley, M. D. E. “Order estimation and discrimination between stationary and time-varying (TVAR) autoregressive models,” *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, No. 6, p. 2861-2876, 2007. DOI: [10.1109/TSP.2007.893966](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.893966).

43. Abramovich, Y. I.; Johnson, B. A. “Adaptive radar detection for sample-starved Gaussian training conditions,” in: De Maio, A.; Greco, M. S. [eds.]. *Modern Radar Detection Theory*. Edison, NJ: SciTech Publishing, 2016, p. 165-262. DOI: [10.1049/SBRA509E_ch6](https://doi.org/10.1049/SBRA509E_ch6).

44. Melvin, W. L. “Space-time adaptive processing for radar,” in: Sidiropoulos, N. D.; Gini, F.; Chellappa, R.; Theodoridis, S. (eds.). *Academic Press Library in Signal Processing*. Vol. 2: *Communications and Radar Signal Processing*. 2014, Chapter 12, p. 595-665. DOI: [10.1016/B978-0-12-396500-4.00012-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396500-4.00012-0).

45. Abramovich, Y. I.; Spencer, N. K.; Gorokhov, A. Y. “Modified GLRT and AMF framework for adaptive detectors,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 43, No. 3, p. 1017-1051, 2007. DOI: [10.1109/TAES.2007.4383590](https://doi.org/10.1109/TAES.2007.4383590).

46. Gill, P. E.; Golub, G. H.; Murray, W.; Saunders, M. A. “Methods for modifying matrix factorizations,” *Math. Comp.*, Vol. 28, No. 126, p. 505-535, 1974. DOI: [10.1090/S0025-5718-1974-0343558-6](https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1974-0343558-6).

47. Икрамов, Х. Д. *Численные методы для симметричных линейных систем*. М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. 160 с.

48. Lee, D. T. L. “Canonical ladder form realizations and fast estimation algorithms,” Ph.D. Dissertation. Stanford, CA, 1980.

49. Krause, O.; Igel, C. “A more efficient rank-one covariance matrix update for evolution strategies,” in: *Proc. of 2015 ACM Conf. on Foundations of Genetic Algorithms XIII*, FOGA’15, 17-22 Jan. 2015, Aberystwyth, United Kingdom. New York: ACM, 2015, p. 129-136. DOI: [10.1145/2725494.2725496](https://doi.org/10.1145/2725494.2725496).

50. Li, Z.; Zhang, Q. “An efficient rank-1 update for Cholesky CMA-ES using auxiliary evolution path,” in: *Proc. of 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, CEC, 5-8 Jun. 2017, San Sebastian, Spain. IEEE, 2017. DOI: [10.1109/CEC.2017.7969406](https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969406).

51. Li, Z.; Zhang, Q. “A simple yet efficient rank one update for covariance matrix adaptation,” arXiv preprint, 2017. 16 p. URI: <https://arxiv.org/abs/1710.03996>.

52. Beyer, H.-G.; Sendhoff, B. “Simplify your covariance matrix adaptation evolution strategy,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 21, No. 5, p. 746-759, 2017. DOI: [10.1109/TEVC.2017.2680320](https://doi.org/10.1109/TEVC.2017.2680320).

53. Olszanskyj, S. J.; Lebak, J. M.; Bojanczyk, A. W. “Rank-k modification methods for recursive least squares problems,” *Numer. Algor.*, Vol. 7, No. 2, p. 325-354, 1994. DOI: [10.1007/BF02140689](https://doi.org/10.1007/BF02140689).

54. Oh, H.; Hu, Z. “Multiple-rank modification of symmetric eigenvalue problem,” *MethodsX*, Vol. 5, p. 103-117, 2018. DOI: [10.1016/j.mex.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.01.001).

55. Deng, L. “Multiple-rank updates to matrix factorizations for nonlinear analysis and circuit design,” Ph.D. Dissertation. Stanford, CA, 2010.

56. Bellman, R. *Introduction to Matrix Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1960.

57. Stanimirovic, I. *Computation of Generalized Matrix Inverses and Applications*. Waretown, NJ: Apple Academic Press, 2017.

58. Rader, C. M.; Steinhardt, A. O. “Hyperbolic Householder transformations,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, Vol. 34, No. 6, p. 1589-1602, 1986. DOI: [10.1109/TASSP.1986.1164998](https://doi.org/10.1109/TASSP.1986.1164998).

59. Bojanczyk, A. W.; Steinhardt, A. O. “Stabilized hyperbolic Householder transformations,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, Vol. 37, No. 8, p. 1286-1288, 1989. DOI: [10.1109/29.31277](https://doi.org/10.1109/29.31277).

60. Bojanczyk, A. W.; Nagy, J. G.; Plemmons, R. J. *Row Householder transformations for rank-k Cholesky*

inverse modifications. IMA Preprint Series 978. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1992. URI: <http://hdl.handle.net/11299/1897>.

61. Lekhovytsky, D. I.; Rachkov, D. S.; Semeniaka, A. V. "K-rank modification of adaptive lattice filter parameters," in: *Proc. of 2015 IEEE Radar Conf., RadarCon*, 10-15 May 2015, Arlington, VA, USA. IEEE, 2015. DOI: [10.1109/RADAR.2015.7130983](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7130983).

62. Абрамович, Ю. И. "Регуляризованный метод адаптивной оптимизации по критерию максимума отношения сигнал/помеха," *Радиотехника и электроника*, Т. 26, № 3, С. 543-551, 1981.

63. Henderson, H. V.; Searle, S. R. "On deriving the inverse of bold roman a sum of matrices," *SIAM Rev.*, Vol. 23, No. 1, p. 53-60, 1981. DOI: [10.1137/1023004](https://doi.org/10.1137/1023004).

Поступила в редакцию 18.12.2017

После доработки 06.11.2018

Принята к публикации 30.11.2018
