

УДК 681.513.6

НЕЧЕТНАЯ СИММЕТРИЯ ВЕКТОРА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИММЕТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

В. И. ДЖИГАН

*Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»,
Россия, Москва, 124498, Зеленоград, пл. Шокина, 1*

Аннотация. В работе приведено доказательство нечетной симметрии вектора весовых коэффициентов, полученных на основе критерия наименьших квадратов, в симметричной линейной адаптивной антенной решетке с линейными ограничениями и требуемым сигналом. Пары симметричных элементов такого вектора являются комплексно-сопряженными по отношению друг к другу. Для обеспечения данного свойства вектор ограничиваемых параметров (значения диаграммы направленности антенной решетки в интересующих направлениях) должен быть действительным, но не обязательно симметричным. Нечетная симметрия векторов входных сигналов и весовых коэффициентов антенной решетки позволяет разрабатывать для такой решетки адаптивные алгоритмы в арифметике действительных чисел. В этом случае число арифметических операций таких алгоритмов, приходящихся на одну итерацию, примерно в два или четыре раза меньше эквивалентного числа действительных арифметических операций аналогичных алгоритмов в арифметике комплексных чисел. В работе представлены результаты сравнительного моделирования алгоритмов в арифметике комплексных и действительных чисел. Они показывают, что адаптивный алгоритм, использующий арифметику действительных чисел, обеспечивает в 1,5–2 раза более короткий переходный процесс и более глубокие провалы (2–3 дБ) в установившемся режиме в диаграмме направленности антенной решетки в направлениях на источники адаптивно подавляемых помех, чем алгоритм в арифметике комплексных чисел.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка; алгоритм адаптивной фильтрации; нечетная симметрия; RLS

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивная обработка сигналов — одна из ключевых технологий, используемых в оборудовании современных систем связи, радиолокации, радионавигации, а также бытовой техники. Одним из элементов такого оборудования часто является направленная антенна, которая при реализации в виде антенной решетки позволяет немеханическим способом перемещать основной лепесток диаграммы направленности (ДН), повышать отношение сигнал–тепловой шум в выходном сигнале решетки,

а также уменьшать в этом сигнале уровень помех от внешних источников за счет изменения формы ДН.

Антенные решетки, обладающие последним свойством, называются адаптивными (ААР) [1]. В таких решетках подавление помех обеспечивается за счет образования провалов в ДН в неизвестных на приемной стороне направлениях на источники помех. Изменение формы ДН достигается за счет изменения значений весовых коэффициентов, с помощью которых сигналы в каждом из каналов ААР взве-

DOI: [10.20535/S0021347018060031](https://doi.org/10.20535/S0021347018060031)

© В. И. Джиган, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Compton, R. T. *Adaptive Antennas: Concepts and Performance*. Prentice Hall, 1988. 448 p.
2. Diniz, P. S. R. *Adaptive Filtering. Algorithms and Practical Implementation*, 4th ed. Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-1-4614-4106-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4106-9).
3. Farhang-Boroujeny, B. *Adaptive Filters: Theory and Applications*, 2nd ed. John Wiley and Sons, 2013. 778 p.
4. Haykin, S. O. *Adaptive Filter Theory*, 5th ed. Pearson Education, 2014. 889 p.
5. Джиган, В. И. *Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы*. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
6. Frost, O. L. "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," *Proc. IEEE*, Vol. 60, No. 8, P. 926-935, 1972. DOI: [10.1109/PROC.1972.8817](https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8817).
7. Resende, L. S.; Romano, J. M. T.; Bellanger, M. G. "A fast least-squares algorithm for linearly constrained adaptive filtering," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 44, No. 5, P. 1168-1174, 1996. DOI: [10.1109/78.502329](https://doi.org/10.1109/78.502329).
8. Apolinario, J. A.; Werner, S.; Diniz, P. S. R.; Laakso, T. I. "Constrained normalized adaptive filters for CDMA mobile communications," *Proc. of 9th European Signal Processing Conf.*, 8-11 Sept. 1998, Rhodes, Greece. IEEE, 1998. URI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7089625/>.
9. De Campos, M. R. L.; Apolinario J. A. "The constrained affine projection algorithm - development and convergence issues," *Proc. of First Balkan Conf. on Signal Processing, Communications, Circuits, and Systems*, Istanbul, May 2000.
10. Cantoni, A.; Butler, P. "Properties of the eigenvectors of persymmetric matrices with applications to communication theory," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 24, No. 8, P. 804-809, 1976. DOI: [10.1109/TCOM.1976.1093391](https://doi.org/10.1109/TCOM.1976.1093391).
11. Nitzberg, R. "Application of maximum likelihood estimation of persymmetric covariance matrices to adaptive processing," *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.*, Vol. AES-16, No. 1, P. 124-127, 1980. DOI: [10.1109/TAES.1980.308887](https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308887).
12. Huarng, K.-C.; Yen, C.-C. "A unitary transformation method for angle-of-arrival estimation," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 39, No. 4, P. 975-977, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1109/78.80927>.
13. Зарицкий, В. И.; Кокин, В. Н.; Леховицкий, Д. И.; Саламатин, В. В. "Рекуррентные алгоритмы адаптивной обработки при центральной симметрии пространственно-временных каналов приема," *Известия вузов. Радиофизика*, Т. 28, № 7, С. 863-871, 1985.
14. Huarng, K.-C.; Teh, C.-C. "Adaptive beamforming with conjugate symmetric weights," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 39, No. 7, P. 926-932, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.86911>.
15. Zhang, L.; Liu, W.; Langley, R. J. "A class of constrained adaptive beamforming algorithms based on uniform linear arrays," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 58, No. 7, P. 3916-3922, 2010. DOI: [10.1109/TSP.2010.2046078](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2046078).
16. Zhang, L.; Liu, W.; Langley, R. J. "A class of constant modulus algorithms for uniform linear arrays with a conjugate symmetric constraint," *Signal Processing*, Vol. 90, No. 9, P. 2760-2765, 2010. DOI: [10.1016/j.sigpro.2010.04.003](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.04.003).
17. Zhang, L.; Liu, W.; Langley, R. J. "Adaptive beamforming with real-valued coefficients based on uniform linear arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 59, No. 3, P. 1047-1053, 2011. DOI: [10.1109/TAP.2010.2103037](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2103037).
18. Zhang, L.; Liu, W.; Yu, L. "Performance analysis for finite sample MVDR beamformer with forward backward processing," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 59, No. 5, P. 2427-2431, 2011. DOI: [10.1109/TSP.2011.2109957](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2109957).
19. Xu, D.; He, R.; Shen, F. "Robust beamforming with magnitude response constraints and conjugate symmetric constraint," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 17, No. 3, P. 561-564, 2013. DOI: [10.1109/LCOMM.2013.011513.122688](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.011513.122688).
20. Ратынский, М. В.; Петров, С. В. "Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в действительной арифметике," *Цифровая обработка сигналов*, № 4, С. 22-24, 2013. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21197747>.
21. Liu, J.; Liu, W.; Liu, H.; Chen, B.; Xia, X.-G.; Dai, F. "Average SINR calculation of a persymmetric sample matrix inversion beamformer," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 64, No. 8, P. 2135-2145, 2016. DOI: [10.1109/TSP.2015.2512527](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2512527).
22. Lekhovytskiy, D. I. "To the theory of adaptive signal processing in systems with centrally symmetric receive channels," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, Vol. 33, P. 1-11, 2016. DOI: [10.1186/s13634-016-0329-z](https://doi.org/10.1186/s13634-016-0329-z).
23. Djigan, V. I. "Odd symmetry of weights vector in linearly-constrained adaptive arrays with desired signal," *Proc. of Int. Conf. on Antennas Theory and Techniques*, 24-27 May 2017, Kiev, Ukraine. IEEE, 2017, P. 140-144. DOI: [10.1109/ICATT.2017.7972604](https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972604).
24. Джиган, В. И. "Алгоритмы адаптивной линейно-ограниченной слепой обработки сигналов в цифровых антенных решетках с нечетной симметрией,"

Цифровая обработка сигналов, № 2, С. 3-13, 2015.
URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23833950>.

25. Джиган, В. И. “Многолучевая адаптивная антенная решетка,” *Известия ЮФУ. Технические науки*,

№ 2, С. 23-29, 2012. URI: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=9410>.

Поступила в редакцию 04.01.2018

После переработки 06.05.2018
