

Электродинамика и антенные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2022-1-55-61

УДК 621.396.67.012.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В СРЕДЕ МАТЛАВ

Бойко Игорь Андреевич

студент института магистратуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»¹.

E-mail: igorboyko24na7@gmail.com

Глушанков Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»¹.

E-mail: glushankov57@gmail.com

Рылов Евгений Александрович

генеральный директор АО «ПКБ «РИО»².

E-mail: rylov79@mail.ru

¹Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22/1.

²Адрес: 199155 г. Санкт-Петербург, Уральская улица, д. 19/9, литера Ж.

Аннотация: Рассмотрена задача синтеза адаптивных алгоритмов обработки сигналов в антенных решётках с целью повышения качества приёма нескольких сигналов в радиотехнических системах. Были предложены алгоритмы индивидуальной и групповой обработки, в том числе изучены итерационные алгоритмы в виде градиентных алгоритмов адаптации, обеспечивающих практическую реализацию оптимальной пространственно-временной обработки сигналов. Проведено моделирование градиентных алгоритмов в среде MATLAB. По итогам моделирования был проведён анализ чувствительности градиентных алгоритмов к изменениям начальных условий системы, а также исследованы скорости сходимости алгоритмов. В результате исследования чувствительности были получены оптимальные параметры для градиентных алгоритмов адаптации. В заключение, приведён пример синтеза диаграммы направленности антенной решётки, обеспечивающей пространственно-временную обработку сигналов с учётом оптимальных параметров системы.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решётка, диаграмма направленности, адаптивный алгоритм минимума среднеквадратической ошибки, MATLAB.

Введение

Рассмотрим один из наиболее известных алгоритмов адаптации AP, а именно градиентный алгоритм Уидроу [1–3].

В данном алгоритме для поиска минимума среднеквадратической ошибки (СКО) реализуется метод наискорейшего спуска (МНС). При этом весовой вектор можно представить в рекуррентной форме:

$$W_{k+1} = W_k + \Delta W_k,$$

где ΔW_k — вектор коррекции, вносимой

в координаты весового вектора W_k в момент k с целью получения вектора W_{k+1} в следующий момент времени.

Для МНС данное соотношение принимает вид:

$$W_{k+1} = W_k + \gamma \nabla (E[e_k^2]), k \geq 0,$$

где $\gamma > 0$ — число, равное длине шага в направлении вектора-градиента.

Вычислив градиент, получим:

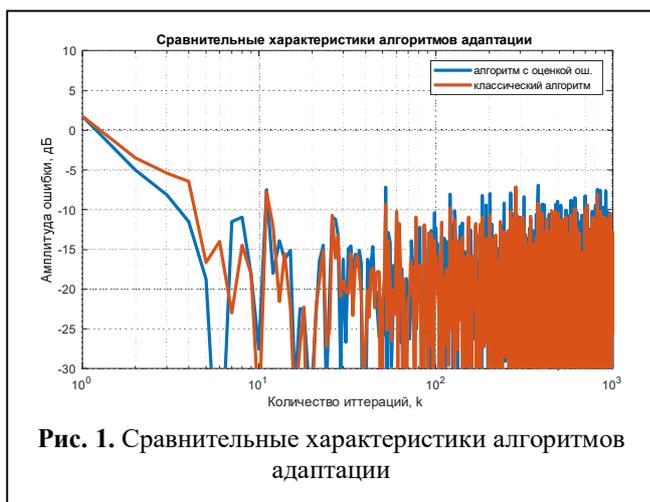


Рис. 1. Сравнительные характеристики алгоритмов адаптации

$$\nabla(E[e_k^2]) = E[\nabla(e_k^2)] = 2E[e_k \nabla e_k] = 2E[e_k X_k]$$

В результате приходим к рекуррентному соотношению:

$$W_{k+1} = W_k + \mu E[e_k X_k],$$

где $\mu = 2\gamma$.

Зная, что $E[e_k X_k] = R_{dX}$; $W_k^T X_k$ — скалярная величина $\Rightarrow W_k^T X_k X_k = X_k X_k^T W_k \Rightarrow E[W_k^T X_k X_k] = E[X_k X_k^T] W_k = R_{XX} W_k$.

Тогда алгоритм наискорейшего спуска можно преобразовать к виду:

$$W_{k+1} = W_k + \mu(R_{dX} - R_{XX} W_k).$$

Вернувшись к алгоритму адаптации Уидроу, заметим, что в нём происходит приближённая, но в то же время достаточно эф-

фективная оценка мгновенных значений градиента. Приближение состоит в том, что квадрат одиночной выборки ошибки принимается за оценочное значение среднего квадрата ошибки. Это эквивалентно замене точного значения градиента на приближённое его значение.

В результате получим алгоритм адаптации Уидроу можно записать в виде:

$$W_{k+1} = W_k + \mu e_k X_k.$$

Сравним результаты адаптации АПР по алгоритму Уидроу с усреднённым $E[e_k^2]$ и с приближённым e_k^2 значениями квадрата ошибки, то есть

$$\begin{aligned} W_{k+1} &= W_k + \mu(R_{dX} - R_{XX} W_k) = \\ &= W_k + \mu(E[d_k X_k] - E[X_k X_k^T] W_k); \end{aligned} \quad (1)$$

$$W_{k+1} = W_k + \mu e_k X_k = W_k + \mu(d_k - W_k^T X_k) X_k. \quad (2)$$

Результаты моделирования

За счётное количество итераций алгоритмы адаптации сходятся с минимально возможной ошибкой реального отклика системы, не превышающей некоторый порог. Результаты сравнения представлены на рис. 1.

Исследование чувствительности алгоритмов к изменению количества элементов представлено на рис. 2. Из графиков видно, что

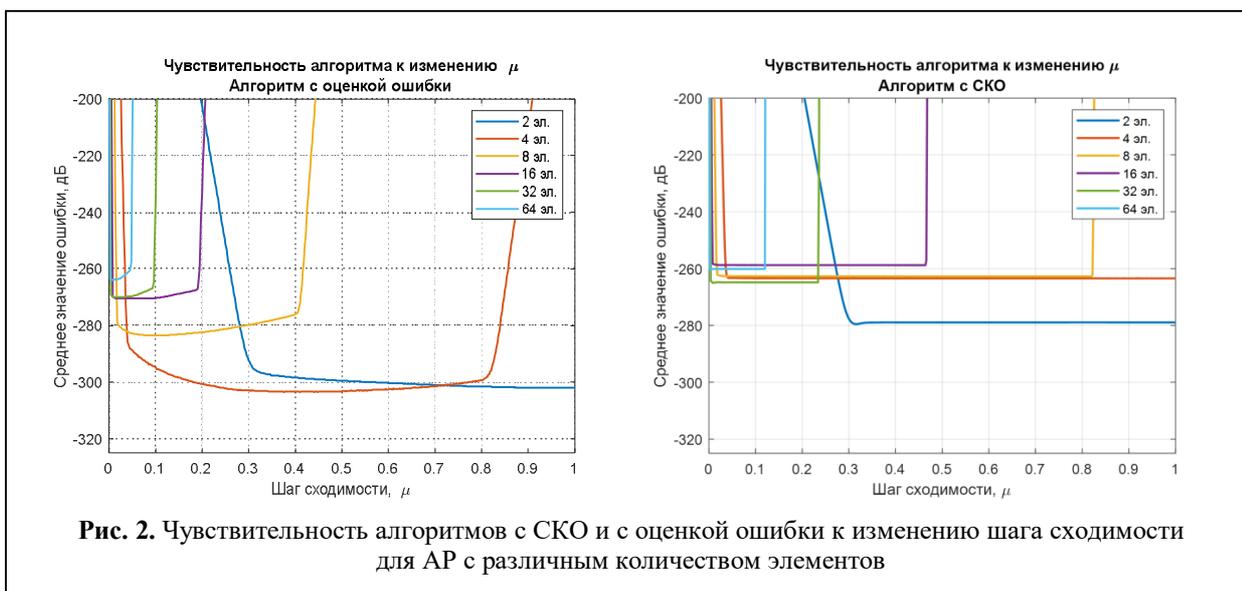


Рис. 2. Чувствительность алгоритмов с SKO и с оценкой ошибки к изменению шага сходимости для АПР с различным количеством элементов

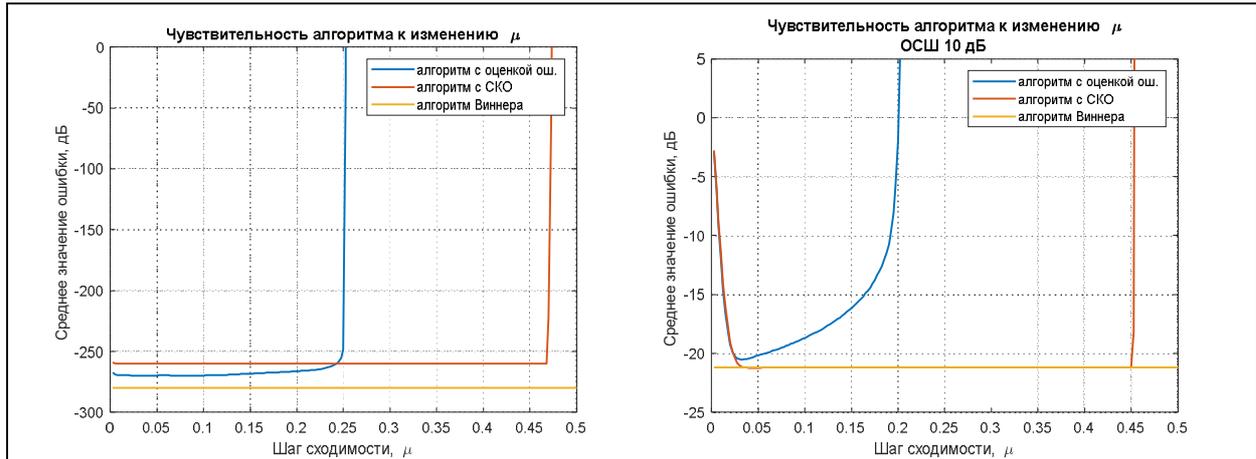


Рис. 3. Чувствительность алгоритмов к изменению шага сходимости в отсутствии шума и при его наличии (сигнал/шум — 10дБ)

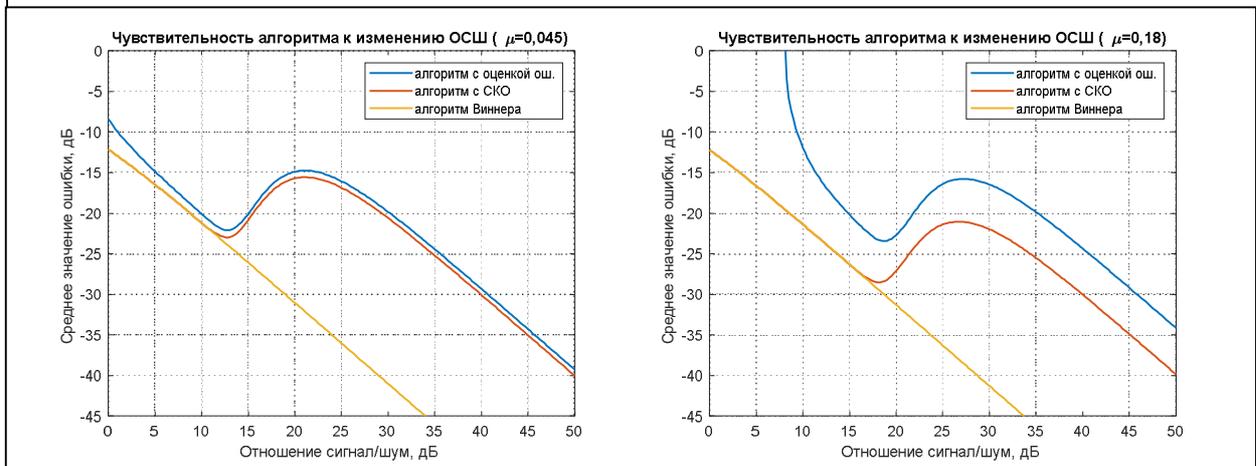


Рис. 4. Чувствительности алгоритмов к изменению ОСШ при $\mu = 0,045$; $\mu = 0,18$

ширина диапазона изменения шага сходимости обратно пропорционально зависит от количества элементов. С увеличением количества элементов на антенной решётке увеличивается минимально возможное значение ошибки.

Исследование чувствительности алгоритмов к изменению шага сходимости представлено на рис. 3.

Исследование чувствительности алгоритмов к изменению ОСШ показано на рис. 4.

При малых значениях шага сходимости μ чувствительности алгоритмов к изменению ОСШ совпадают, однако, с увеличением μ алгоритм с оценкой ошибки становится более чувствительным к изменению ОСШ. С увеличением μ , наименьшее среднее значение

ошибки достигается при использовании алгоритма адаптации с вычислением СКО.

Теперь отдельно построим для каждого алгоритма зависимости среднего значения ошибки от изменения ОСШ при различных значениях шага сходимости (рис. 5) и на основе полученных данных выберем оптимальное значение μ .

В случае алгоритма адаптации со СКО с увеличением значения шага сходимости уменьшается среднее значение ошибки. Наименьшее значение средней ошибки достигается при шаге сходимости $\mu = 0,35$, при больших значениях μ устойчивость алгоритма не выполняется для слабых сигналов.

В случае алгоритма адаптации с оценкой ошибки при значениях ОСШ не меньше 8 дБ

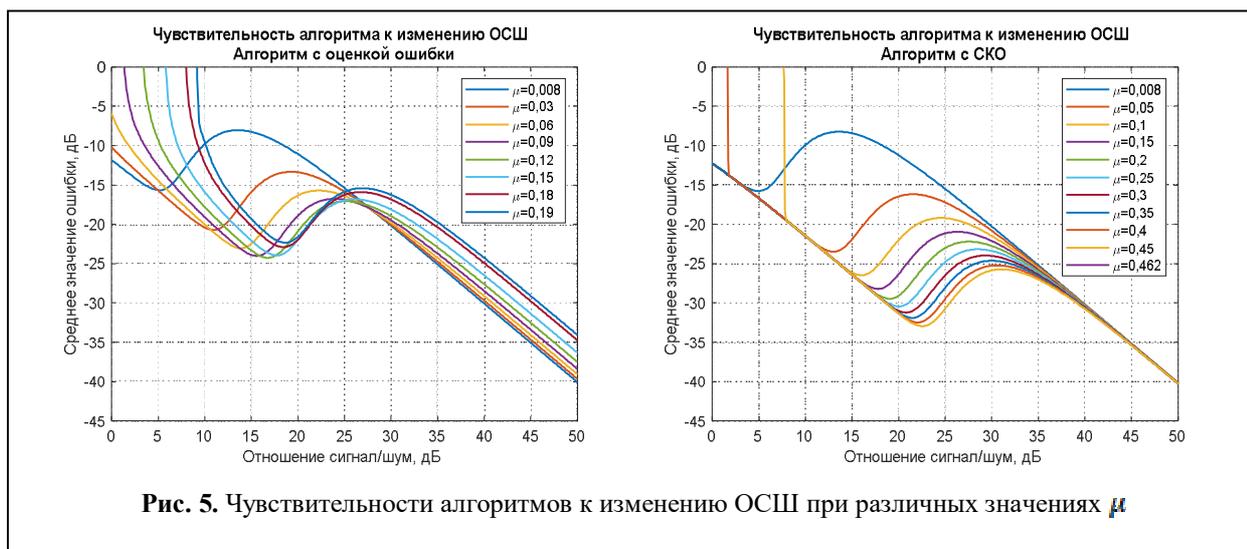


Рис. 5. Чувствительности алгоритмов к изменению ОСШ при различных значениях μ

оптимальное значение шага сходимости $\mu = 0,12$, поскольку при данном значении обеспечивается наименьшая ошибка на всём диапазоне значений ОСШ (8 дБ – 50 дБ). Однако, при работе со слабыми сигналами (ОСШ < 8 дБ) лучшим решением будет уменьшить значение шага сходимости до 0,03.

Для исследования скорости сходимости алгоритмов построим для этих алгоритмов зависимости количества итераций, необходимых для того, чтобы средний уровень ошибки был меньше заданного порога, от значения шага сходимости. Пусть, ОСШ будет равным 10 дБ, а значение пороговой ошибки –15 дБ, тогда получим графики, приведённые на рис. 6.

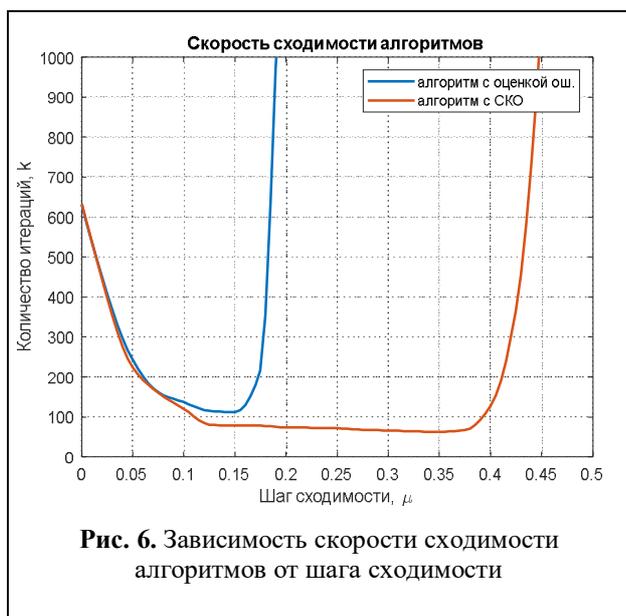


Рис. 6. Зависимость скорости сходимости алгоритмов от шага сходимости

Из графиков, приведённых на рис. 6 видно, что оптимальные значения шага сходимости, обеспечивающее максимальную скорость сходимости для алгоритма с оценкой ошибки находятся в диапазоне [0,1; 0,15], а для алгоритма со СКО — [0,125; 0,375].

Сравнивая полученные результаты с результатами исследования чувствительности алгоритмов к изменению ОСШ, получим оптимальные значения шага сходимости исходя из быстроты сходимости алгоритмов, а также минимума ошибки. Так для алгоритма с оценкой ошибки оптимальное значение шага сходимости μ составляет 0,12, а для алгоритма со СКО – 0,35.

На основании полученных данных получим весовые коэффициенты для 16-элементной АР при ОСШ — 10 дБ и построим ДН с учётом полученных коэффициентов (рис. 7).

Заключение

На основании полученных в ходе исследования результатов, можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении количества элементов антенной решётки увеличивается минимально возможный уровень средней ошибки, а также уменьшается диапазон изменения шага сходимости (обратно пропорциональная зависимость от количества элементов).

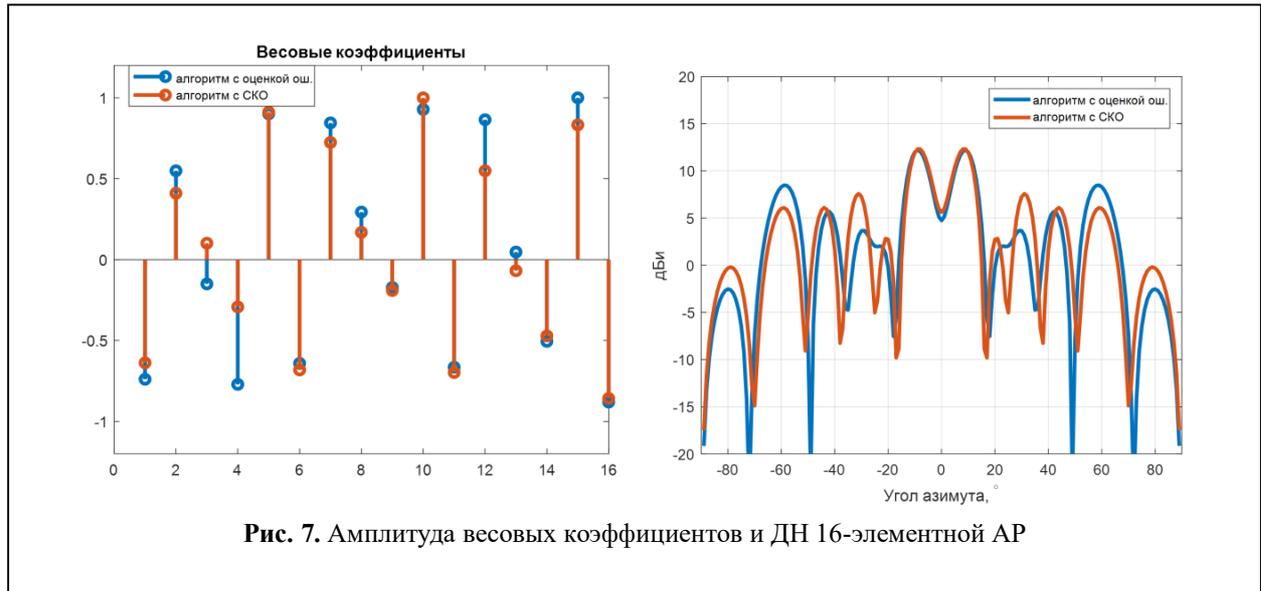


Рис. 7. Амплитуда весовых коэффициентов и ДН 16-элементной АР

2. Алгоритм адаптации Уидроу со СКО имеет меньшую ошибку и большую устойчивость к изменению входных параметров по сравнению с алгоритмом адаптации с оценкой ошибки. Однако особенностью алгоритма с оценкой ошибки является его простота реализации, что при большом количестве элементов АР и оптимальных параметрах системы даёт преимущество по сравнению с классическим алгоритмом. Недостатком данного алгоритма является большое время сходимости алгоритма.

3. Ошибка алгоритма адаптации с оценкой ошибки имеет большую дисперсию по сравнению с алгоритмом адаптации со СКО, это объясняется рекуррентным уравнением, описывающим данный алгоритм, из которого видно, что поправка, вносимая в значения весовых коэффициентов, зависит лишь от текущих значений входного воздействия. Для классического алгоритма адаптации поправка весовых коэффициентов зависит от статистики значений входного воздействия, что позволяет лучше минимизировать ошибку системы.

Для 16-элементной АР оптимальное значение шага сходимости для алгоритма с оценкой ошибки равняется 0,12, а для алгоритма со СКО — 0,35.

Литература

1. Журавлев А.К. и др. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками // Л.: Изд-во ЛГУ. 1991. С. 544.
2. Глушанков Е.И. Алгоритмы групповой пространственной обработки сигналов в приемных антеннах // Техника средств связи. 1988, № 2. С. 38–41.
3. Афанасьев Н.А., Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Рылов Е.А. Сравнение винеровского и калмановского решения в задачах адаптации антенных решеток // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2021, № 3, с. 33-39.
4. Адаптивные антенные решетки. Часть 2. Под ред В.А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 118 с.
5. Глушанков Е.И., Колесников А.Н. Оценка потенциальной эффективности пространственно-временной обработки сигналов в линиях подвижной радиосвязи с ППРЧ // Изв вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 12. С. 66–70.
6. Анашкин Р.В. и др. Использование специальной фазовой модуляции сигналов в конфликтных условиях решения задач помехозащиты и создания помех // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. № 10. С. 1968–1975.
7. Глушанков Е.И., Колесников А.Н., Ушаков В.В. Пространственно-временная обработка сигналов с ППРЧ в линиях спутниковой связи с подвижными объектами // в сб.: Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи, Приложение к журналу «Радиотехника». 1992. С. 59–65.
8. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер. с англ. Под ред. В.А. Лексаченко. М.: Радио и связь, 1986. 446 с.

9. Уидроу Б., Стурнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.

10. Уидроу Б. и др. Адаптивные антенные системы. ТИИЭР. 1967. Т. 55. № 12. С. 78–95.

11. Шахтарин Б. и др. Нелинейная оптимальная фильтрация в примерах и задачах. М.: Гелиос АРВ, 2008. 221 с.

12. Mohan K. N., Zinka S. R., Kannadassan D. Design and analysis of linear, planar and circular array

using array tool // Int. J. Appl. Eng. Res. (IJAER). Vol. 10. Pp. 22681–22686.

13. Allen J. L. The theory of array antennas (with emphasis on radar applications). Massachusetts Inst Of Tech Lexington Lincoln Lab, 1963. №. TR-323.

14. Brown A. D. (ed.). Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation. CRC Press, 2017.

15. Josefsson L., Persson P. Conformal array antenna theory and design. John Wiley & sons, 2006. Vol. 29.

Поступила 14 ноября 2021 г.

English

MODELING OF GRADIENT ALGORITHM OF ANTENNA ARRAY ADAPTATION IN MATLAB ENVIRONMENT

Igor Andreevich Boyko — Master's Degree Student, "The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications"¹.

E-mail: igorboyko24na7@gmail.com

Evgeny Ivanovich Glushankov — Grand Dr. in Engineering, Professor of the Department of Radio Systems and Signal Processing, "The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications"¹.

E-mail: glushankov57@gmail.com

Evgeny Alexandrovich Rylov — General Director of JSC "PKB "RIO"².

E-mail: rylov79@mail.ru

¹Address: 193232, Russian Federation, St. Petersburg, Bolshhevikov Ave., 22/1.

²Address: 199155, Russian Federation, St. Petersburg, Uralskaya st., 19/9, lit. G.

Abstract: In many radio engineering systems at the input of the receiving antenna arrays simultaneously there are several useful signals, different directions of arrival, and, for example, the structure of the signal at code division, on a background of interference. Carry out the processing of multiple signals in the receiving AR can be achieved by creating a separate device for spatial-temporal signal processing for each of the correspondents (individual spatial-temporal signal processing) or by synthesizing algorithms for joint processing of all signals (group spatial-temporal signal processing). In this work, the problem of synthesis of adaptive algorithms for signal processing in antenna arrays to improve the quality of reception of multiple signals in radio engineering systems is considered. Algorithms of individual and group processing by a criterion of the minimum mean square error in the form of practically realizable gradient algorithms providing practical realization of optimum spatial and temporal signal processing have been offered. Based on these results, an analysis of their effectiveness in the MATLAB environment was conducted. Simulation of gradient Widrow algorithms in the MATLAB environment was conducted. As a result of modeling, the sensitivity of gradient algorithms to changes in the initial conditions of the system, such as the number of elements of the antenna array, the step of convergence of the adaptation algorithm, signal to noise ratio was analyzed. An analysis of the convergence rate of the algorithms at different values of the algorithm convergence step was also carried out. Based on the carried out researches the optimum parameters of gradient Widrow algorithms have been received proceeding from a minimum of a root-mean-square error at the maximum possible speed of convergence of algorithms. In conclusion, an example of the synthesis of the antenna array directional diagram, which provides spatial and temporal signal processing, taking into account the optimal parameters of the system, is given.

Keywords: active phased array antenna, directional pattern, adaptive algorithm of minimum RMS error, MATLAB.

References

1. Zhuravlev A.K. et al. Adaptive radio engineering systems with antenna arrays. Leningrad: Publishing House of LSU. 1991. 544 p.
2. Glushankov E.I. Algorithms of group spatial signal processing in receiving antennas. Communication equipment. 1988, No. 2. pp. 38-41.
3. Afanasyev N.A., Glushankov E.I., Kirik D.I., Rylov E.A. Comparison of the Wiener and Kalman solutions in the problems of adaptation of antenna arrays. Radio and telecommunication systems. 2021. No. 3, Pp. 33–39.
4. Adaptive antenna arrays. Part 2. Edited by V.A. Grigoriev. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 118 p.
5. Glushankov E.I., Kolesnikov A.N. Evaluation of the potential efficiency of spatio-temporal signal processing in mobile radio communication lines with PPRC. Izv vuzov. Radio electronics. 1990. Vol. 33. No. 12. Pp. 66-70.
6. Anashkin R.V. et al. The use of special phase modulation of signals in conflict conditions for solving problems of noise protection and interference. Radio Engineering and Electronics. 1991. Vol. 36. No. 10. Pp. 1968–1975.
7. Glushankov E.I., Kolesnikov A.N., Ushakov V.V. Spatiotemporal processing of signals with PPRF in satellite communication lines with mobile objects // in the collection: Spatiotemporal signal processing in radio communication systems, Appendix to the journal "Radio Engineering". 1992. Pp. 59–65.
8. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptive antenna arrays: Introduction to theory / Trans. from English. Edited by V.A. Leksachenko. Moscow: Radio i svyaz', 1986. 446 p.
9. Widrow B., Stearns S. Adaptive signal processing: Translated from English Moscow: Radio i svyaz', 1989. 440 pp.
10. Widrow B. et al. Adaptive antenna systems. TIIEER. 1967. Vol. 55. No. 12. Pp. 78–95.
11. Shakhtarin B. et al. Nonlinear optimal filtering in examples and problems. Moscow: Helios ARV, 2008. 221 p.
12. Mohan K. N., Zinka S. R., Kannadassan D. Design and analysis of linear, planar and circular array using array tool. Int. J. Appl. Eng. Res. (IJAER). Vol. 10. Pp. 22681–22686.
13. Allen J. L. The theory of array antennas (with emphasis on radar applications). Massachusetts Inst Of Tech Lexington Lincoln Lab, 1963. №. TR-323.
14. Brown A.D. (ed.). Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation. CRC Press, 2017.
15. Josefsson L., Persson P. Conformal array antenna theory and design. John Wiley & sons, 2006. Vol. 29.