

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ФАЗОВОЙ АДАПТАЦИИ

Паршин Ю.Н., д.т.н., профессор Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

Буй Куок Вьонг, аспирант, Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: herapkm@gmail.com

IMPROVING INTERFERENCE IMMUNITY OF RADIO SYSTEMS USING A MODIFIED PHASE ADAPTATION ALGORITHM

Parshin Y.N., Bui Quoc Vuong

The algorithm of phase adaptation of an antenna array is studied, which creates «nulls» in the radiation pattern of the antenna array in the direction of wideband interference arrival. However, in the presence of simultaneous narrowband interference, multiplicative distortions occur due to the modulation of the radiation pattern of the antenna array. This work examines the influence of phase adaptation algorithms on the spectral characteristics of narrowband interference. The algorithm of phase adaptation and the distortion of narrowband interference were simulated using various phase adaptation algorithms. A modification of the phase adaptation algorithm was performed to search for the global minimum of interference power. The research results demonstrated the advantages of the modified adaptation algorithm compared to the original one in interference suppression.

Key words: interference suppression, adaptation, phase adaptation algorithm.

Ключевые слова: подавление помех, адаптация, алгоритм фазовой адаптации.

Введение

Сложность обеспечения эффективной работы радиосистем заключается в том, что мешающие сигналы могут иметь различные, априори неизвестные характеристики. В настоящее время в радиосистемах широко распространены различные помехи, такие как широкополосные помехи от близлежащих радиосистем и узкополосные помехи, возникающие в результате отражения собственных сигналов от протяженных объектов. Одной из наиболее сложных ситуаций является наличие комплекса разнообразных помех, отличающихся по частоте, времени, пространственным параметрам и амплитуде [1-3]. Например, такой комплекс может включать в себя широкополосные и узкополосные помехи. Для борьбы с помехами в антенной решетке используются различные методы подавления, включая пространственное подавление с помощью антенной решетки (АР), временное подавление при цифровой обработке сигналов, такие как фильтрация помех, многоканальная обработка сигнала и ортогональное разделение частот [4-6].

Часто узкополосные помехи имеют широкий пространственный спектр и могут быть эффективно подавлены только в спектральной области, в то время как широкополосные помехи имеют узкий пространственный спектр и могут быть успешно устранены путем формирования «нулей» диаграммы направленности (ДН) АР в направлении на источники помех [7-10]. Функции различных компенсаторов распределяются между элементами комплекса для подавления узкополосных и широкополосных помех. Для устранения априорной не-

Изучается алгоритм фазовой адаптации антенной решетки, который создает в диаграмме направленности антенной решетки «нули» в направлении прихода широкополосных помех. Однако при наличии одновременно узкополосных помех происходят их мультипликативные искажения, вызванные модуляцией диаграммы направленности антенной решетки. В работе рассматривается влияние алгоритмов фазовой адаптации на спектральные характеристики узкополосных помех. Проведено моделирование алгоритма фазовой адаптации и искажений узкополосной помехи при применении различных алгоритмов фазовой адаптации. Для поиска глобального минимума мощности помех проведена модификация алгоритма фазовой адаптации. Результаты исследования показали преимущества модифицированного алгоритма адаптации по сравнению с исходным в подавлении помех.

определенности параметров помех широко применяется адаптивная подстройка весовых коэффициентов АР, что приводит к изменению формы ДН АР во времени. Однако, при такой адаптации возникают мультипликативные искажения узкополосной помехи на выходе АР. Исследованы искажения сигнала, вызванные флуктуациями весовых коэффициентов в процессе адаптации градиентным алгоритмом [4-6]. С целью более эффективной подстройки фаз элементов антенной решетки предложены нелинейные алгоритмы фазовой адаптации [11, 12], использующие измерение мощности выходных помех. Поэтому важно сравнить алгоритмы фазовой адаптации при подавлении комплекса широкополосных и узкополосных помех.

Иногда алгоритмы фазовой адаптации не обеспечивают глобального минимума мощности помех на выходе АР. Поэтому представляет интерес модификация и сравнение эффективности подавления помех различными алгоритмами фазовой адаптации, которые отражены в работах [13, 14]. Целью работы является повы-

шение коэффициента подавления комплекса широкополосных и узкополосных помех за счет поиска глобального минимума выходной мощности помех, а также уменьшения спектральных искажений узкополосной помехи в антенной решетке при использовании фазовой адаптации.

Постановка задачи

В алгоритмах фазовой адаптации, изложенных в работах [11, 12], сигнал на выходе АР представлен в виде суммы сигнала от определенного n -го элемента АР и суммы сигналов от всех остальных $N - 1$ элементов:

$\underline{z} = E_n e^{j\varphi_n} + E_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}$, $n = 1, \dots, N$, где E_n – амплитуда сигнала n -го элемента АР, E_Σ – амплитуда сигналов всех остальных $N - 1$ элементов АР.

При значениях фаз n -го элемента АР $\varphi_n = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ или $\varphi_n = \{0^\circ, 90^\circ, 270^\circ\}$ амплитуды выходного сигнала E_0, E_{90}, E_{180} или E_0, E_{90}, E_{270} формируются путем сложения вектора сигнала n -го элемента АР $\underline{E}_n = E_n e^{j\varphi_n}$ после фазовой адаптации и вектора всех других элементов $\underline{E}_\Sigma = E_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}$.

Алгоритм адаптации включает последовательную перестройку значения фазы φ_n и измерение выходной амплитуды помехи E_φ для каждого элемента АР $n = 1, \dots, N$. Для малых значений амплитуды элемента АР $E_n \ll E_\Sigma$, достаточную точность дает аппроксимация

$$E_z(\varphi) = E_\Sigma + E_n \cos(\varphi_0 + \varphi).$$

Необходимое условие экстремума выходной мощности помехи имеет вид:

$$\frac{dE_z(\varphi)}{d\varphi} = -E_n \sin(\varphi_0 + \varphi),$$

а достаточное условие минимума мощности помехи на выходе АР получено в работе [11] и равно $\varphi_{\text{ОПТ}} = 180^\circ - \varphi_0$.

Для определения начальной фазы φ_0 запишем систему уравнений для исследуемого алгоритма фазовой адаптации. Система уравнений для алгоритма Щапова Ю.М. [11] для трех значений фаз $\{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$ имеет вид:

$$E_0 = E_\Sigma + E_n \cos \varphi_0,$$

$$E_{90} = E_\Sigma + E_n \cos(\varphi_0 + 90^\circ),$$

$$E_{180} = E_\Sigma + E_n \cos(\varphi_0 + 180^\circ).$$

Решая систему уравнений, получаем значение начальной фазы φ_0 :

$$\text{tg } \varphi_0 = \frac{E_0 + E_{180} - 2E_{90}}{E_{90} - E_{180}},$$

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{E_0 + E_{180} - 2E_{90}}{E_{90} - E_{180}} \right) - \pi \begin{cases} 0, E_0 - E_{180} > 0 \\ 1, E_0 - E_{180} < 0 \end{cases}.$$

Аналогичная система уравнений для алгоритма Курганова В.В. и Джигана В.И. [12] для трех значений фаз $\{0^\circ, 90^\circ, 270^\circ\}$ имеет вид:

$$E_0^2 = E_\Sigma^2 + E_n^2 - 2E_\Sigma E_n \cos \gamma,$$

$$E_{90}^2 = E_\Sigma^2 + E_n^2 - 2E_\Sigma E_n \cos(\gamma + 90^\circ),$$

$$E_{270}^2 = E_\Sigma^2 + E_n^2 - 2E_\Sigma E_n \cos(\gamma + 270^\circ),$$

$$E_\Sigma^2 = E_0^2 + E_n^2 - 2E_0 E_n \cos \delta\psi.$$

Совместное решение полученных уравнений позволяет определить значение фазы $\delta\psi$

$$\delta\psi = \left(2 \begin{cases} n = 0, E_{90} > E_{270} \\ n = 1, E_{90} < E_{270} \end{cases} - 1 \right) \arccos \left(\frac{E_0^2 + E_n^2 - E_\Sigma^2}{2E_0 E_n} \right).$$

Значение фазы $\varphi_{\text{ОПТ}} = 180^\circ - \delta\psi$ обеспечивает минимальную мощность помех на выходе АР.

Изменение фазы и определение ее оптимального значения необходимо последовательно проводить для каждого из N элементов АР. Совокупность этих операций составляет полный цикл адаптации. Далее полный цикл адаптации может повторяться для обновления настроек АР в соответствии с изменением сигнально-помеховой обстановки.

Алгоритмы фазовой адаптации, в том числе полученные в работах [11, 12], не могут гарантировать сходимость к глобальному минимуму мощности помех на выходе АР из-за многоэкстремальности целевой функции в многомерном пространстве. Поэтому оптимальное значение фазового распределения и мощность помех на выходе АР зависят от начального фазового распределения. Для получения глобального минимума помех предлагается модификация алгоритма фазовой адаптации, использующая многократное формирование начальных условий в каждом из K_1 периодов полной адаптации и последующее определение минимальной мощности и оптимального значения фазы, которое обеспечивает наименьшую мощность помех на выходе АР. При $K_1 = 1$ получаем немодифицированные варианты алгоритмов фазовой адаптации [11, 12].

Начальное фазовое распределение может формироваться различными способами:

1) с помощью датчика равномерно распределенных независимых случайных чисел

$$\varphi_0(k) = \{\varphi_{0n}(k) = 2\pi \times \text{rand}, n = 1, \dots, N\}, k = 1, \dots, K_1, \quad (1)$$

2) равномерно с априорно заданным шагом $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{b}$

путем перебора всех возможных $K_A = b^N$ комбинаций фаз элементов АР

$$\varphi_0(k) = \left\{ \varphi_{0n}(k) = \frac{\pi}{N} + \frac{2\pi}{N} k_n, n = 1, \dots, N, k_n = 1, \dots, b \right\}, k = 1, \dots, K_1.$$

Для каждого из K_1 вариантов начального фазового распределения производится полный цикл адаптации и определяется фазовое распределение в соответствии с алгоритмами [11, 12] $\varphi(k) = \{\varphi_n(k), n = 1, \dots, N\}$ и мощность помех $P_{\text{ВЫХ}}(k) = E_{\text{ВЫХ}}^2(k)$. После этого можно определить оптимальное фазовое распределение:

$$\varphi_{\text{ОПТ}} = \{\varphi_{\text{ОПТ}n}, n = 1, \dots, N\} = \arg \min_{k=1, \dots, K_1} P_{\text{ВЫХ}}(k).$$

Таким образом, цикл полной адаптации модифицированного алгоритма состоит из K_1 циклов полной адаптации немодифицированного алгоритма. Далее циклы полной адаптации могут повторяться для обновления настроек АР. В связи с переключением фаз элементов АР в момент окончания цикла полной адаптации возникает изменения ДН и, следовательно, искажаются спектры узкополосных помех и сигналов. В результате возникает необходимость выбора времени измерения мощности помехи T , числа циклов адаптации K_1 , числа циклов полной фазовой адаптации K_A таким образом, чтобы на выходе компенсатора спектр сигнала не перекрывался со спектром узкополосной помех

Результаты моделирования

Исследование влияния алгоритма фазовой адаптации на спектральные характеристики узкополосной помехи и эффективность модифицированного алгоритма фазовой адаптации производится методом компьютерного моделирования. Пусть линейная эквидистантная АР состоит из $N = 5$ элементов расположенных на расстоянии $d = \frac{\lambda}{2}$ друг от друга; λ – длина волны. Примем

для моделирования следующие значения параметров помех: число источников широкополосных помех $M = 2$, угловые координаты помех $\alpha_{ш1} = 10^\circ$, $\alpha_{ш2} = 20^\circ$, источник узкополосной помехи расположен в направлении с угловой координатой $\alpha_y = 0^\circ$, отношение

широкополосная помеха-шум $q_{ш} = \frac{P_{ВХ}}{P_{ШУМ}} = 10$ дБ.

Для исследования спектральных искажений узкополосной помехи возьмем алгоритм фазовой адаптации Ю.М. Щапова [11]. На рис. 1 а приведен нормированный

спектр гармонической узкополосной помехи на выходе компенсатора широкополосной помехи с фазовой адаптацией немодифицированным алгоритмом для $K_A = 15$.

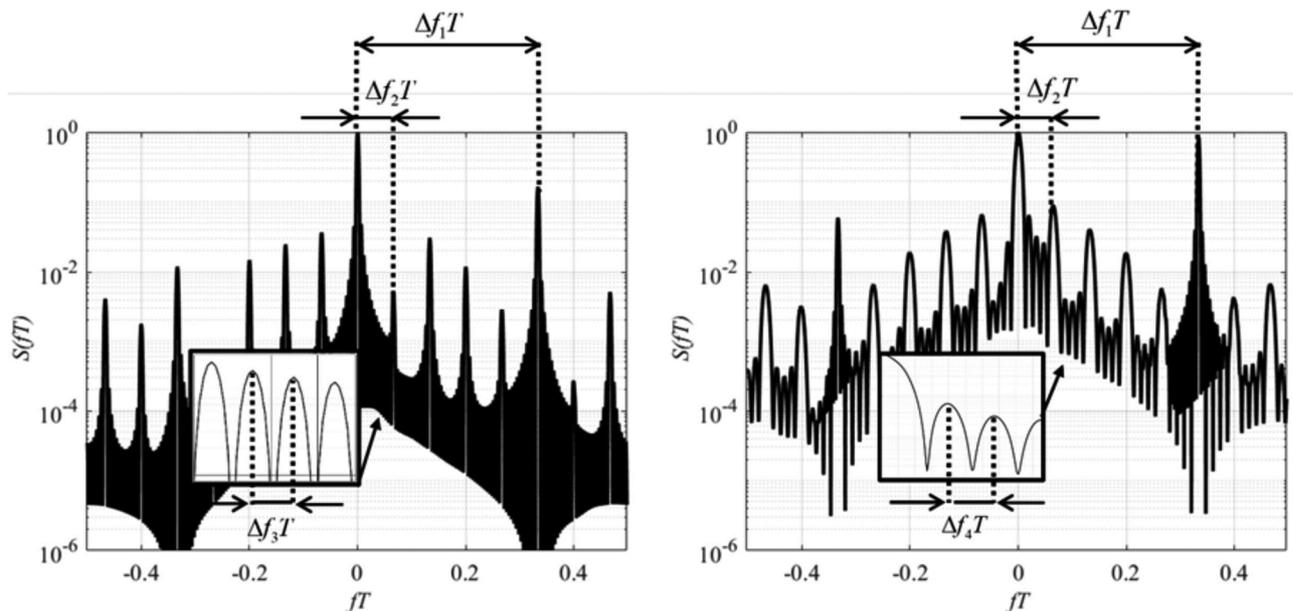
Для модифицированного алгоритма (рис. 1 б) число циклов полной адаптации равно $K_A = 3$, а в каждом цикле реализуется $K_1 = 5$ циклов адаптации со случайным начальным фазовым распределением. Полагается, что измерение выходной мощности помехи производится без ошибок. Вследствие модуляции ДН АР в спектре узкополосной помехи появляются максимумы на частотах

$$\Delta f_1 T = \frac{1}{3}, \quad \Delta f_2 T = \frac{1}{3N}, \quad \Delta f_3 T = \frac{1}{3NK_A}, \quad \Delta f_4 T = \frac{1}{3NK_1},$$

а также увеличивается уровень спектра между этими максимумами. Можно отметить увеличение ширины полосы частот на гармониках спектра, что вызвано случайным изменением начального фазового распределения в модифицированном алгоритме фазовой адаптации.

Рассмотрим эффективность компенсации широкополосной помехи, используя коэффициент подавления помехи. Так как результат фазовой адаптации зависит от начального фазового распределения, то производится усреднение коэффициента подавления помехи по реализациям начального фазового распределения $K_{\Pi} = \frac{P_{ВХ}}{P_{ВЫХ}}$. Число реализаций при усреднении выбрано достаточно большим, чтобы погрешности моделирования не были заметны на рисунке. Мощности помех определяются направлением на источник помехи и величиной диаграммы направленности в этом направлении на данном этапе адаптации.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов подавления широкополосной помехи от номера цикла полной адаптации немодифицированного алгоритма для немодифицированного и модифицированного алгоритмов при $K_1 = 10$, а число отсчетов при измерении мощности помехи равно 10.



а) немодифицированный алгоритм

б) модифицированный алгоритм с начальной фазой (1)

Рис. 1. Спектр узкополосной помехи на выходе АР

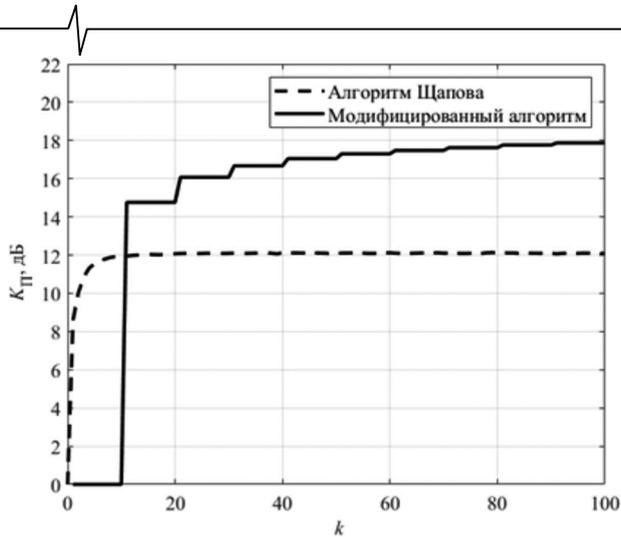


Рис. 2. Коэффициент подавления широкополосной помехи AP

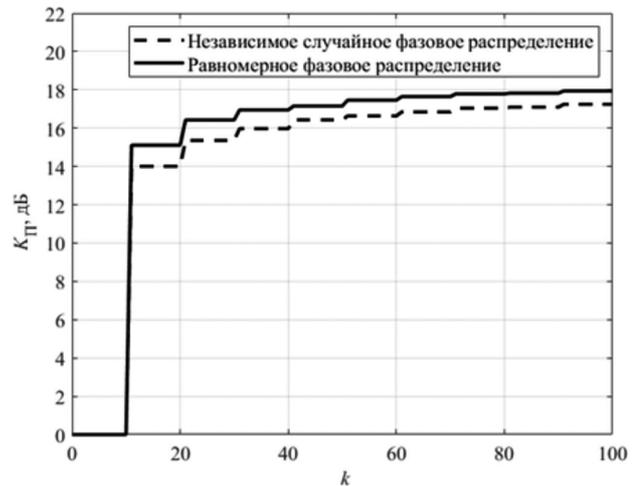


Рис. 3. Влияние начального фазового распределения на коэффициент подавления

На рис. 3 приведены коэффициенты подавления широкополосной помехи с использованием модифицированного алгоритма фазовой адаптации при случайном (1) и равномерном (2) начальном фазовом распределении. Равномерное фазовое распределение дает больше на 0,5...1,0 дБ коэффициент подавления помехи.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента подавления широкополосной помехи от отношения широкополосная помеха-шум для немодифицированного и модифицированного алгоритмов. Выигрыш от применения модифицированного алгоритма фазовой адаптации увеличивается с увеличением помеха-шум и достигает 5 дБ.

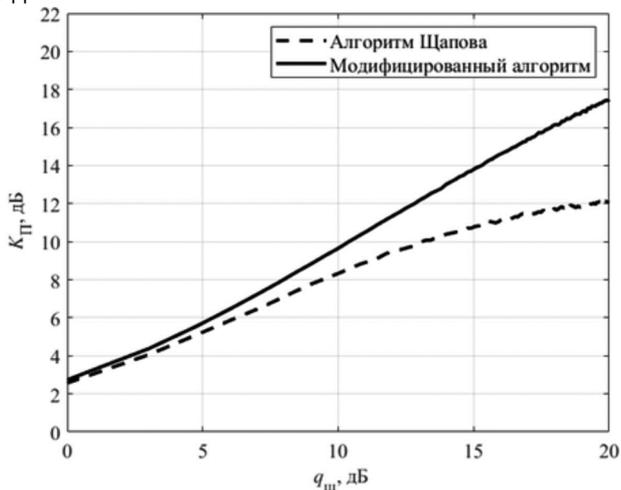


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления широкополосной помехи от отношения широкополосная помеха-шум

Заключение

Результаты анализа показывают, что изменение диаграммы направленности AP при фазовой адаптации для подавления широкополосной помехи искажает спектр узкополосной помехи, приводит к появлению максимумов спектра на определенных частотах и увеличению уровня спектра между этими максимумами. Положение максимумов спектра зависят от времени измерения мощности помехи, числа элементов AP, числа циклов адаптации. Изменяя параметры адаптации можно достигнуть компромисса между подавлением

узкополосной помехи и выделения полезного сигнала.

Проведенное моделирование показало, что модифицированный алгоритм обеспечивает сходимость выходной мощности помехи к глобальному минимуму. Выигрыш от применения модифицированного алгоритма по сравнению с немодифицированным увеличивается с увеличением числа циклов адаптации и достигает 5...7 дБ и более. Вместе с тем результат работы модифицированного алгоритма формируется только в конце всего времени адаптации, что может привести к недопустимым задержкам в некоторых сценариях использования.

Необходимо отметить, что искажение узкополосной помехи и сигнала в процессе фазовой адаптации уменьшает потенциальную помехоустойчивость. Поэтому при технической реализации целесообразно предусмотреть возможность разделения во времени процесса адаптации и приема полезного сигнала. Другим направлением совершенствования адаптивного компенсатора помехи является использование двухпроцессорной структуры: один процессор осуществляет компенсацию помехи и выделение полезного сигнала, а второй процессор производит адаптивную подстройку фаз первого процессора.

Литература

1. Сосулин Ю.Г. Методы оптимальной обработки сигналов на фоне комплекса помех. Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 6. С. 1171-1181.
2. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014. 632 с.
3. Паршин Ю.Н. Хаотическая динамика адаптивной системы компенсации комплекса точечной и протяженной помех. Радиотехника и электроника. 1988. Т. 43. № 11. С. 1336-1342.
3. Мальцев А.А., Зимина С.В. Спектрально-корреляционные характеристики выходного сигнала адаптивных антенных решеток с учётом флуктуаций весового вектора. Радиотехника и электроника 2001. Т. 46. № 11. С.1350-1355.
4. Morgan D.R. Effect of gradient noise on the adaptive cancellation of a sinusoid in white noise. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1983, vol.

5. Зимина С.В. Спектральные характеристики и диаграмма направленности адаптивной антенной решётки, настраиваемой по LMS алгоритму с квадратичным ограничением, с учётом флуктуаций весового вектора. Антенны. № 9. 2014. С. 64-69.

6. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Определение оптимальной пространственной структуры системы обработки сигналов по критерию максимального правдоподобия. Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып.2. Рязань: РГРТА. 1997. С. 5-11.

7. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Формирование нулей диаграммы направленности антенной решетки методом максимального правдоподобия. Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып.3. Рязань: РГРТА. 1997. С. 9-15.

8. Паршин Ю.Н., Лавров А.М., Гусев С.И. Синтез робастных пространственных структур радиосистем с использованием регуляризации. Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып. 6. Рязань: РГРТА. 2000. С. 11-14 .

9. Паршин Ю.Н., Грачев М.В. Многоэтапная реконфигурируемая обработка сигналов в пространственно распределенной радиосистеме. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ. 2019. № 67. С. 3-10.

10. Щапов Ю.М. Алгоритм фазовой адаптации антенных решеток произвольной геометрии. Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 9. С. 30-34.

11. Курганов В.В., Джиган В.И. Бесфазовые алгоритмы калибровки антенных решеток с минимальным числом измерений выходной мощности. Радиотехника. 2021. Т. 85. № 3. С. 96-108.

12. Паршин Ю.Н., Буй К.В. Комплекс пространственного подавления помех с использованием алгоритмов фазовой адаптации. 25-я международная конференция по цифровой обработке сигналов и ее приложениям (DSPA). 2023. С. 1-4.

13. Буй К.В., Паршин Ю.Н. Пространственное подавление помех с помощью модифицированного алгоритма фазовой адаптации. Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов ХХІХ МНТК. 2023. Т. 5. С. 21-25.

НОВЫЕ КНИГИ



Шарамет А.В.

Информационное обеспечение систем защиты летательных аппаратов от управляющих средств поражения: Научное издание.

М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 178 с.: ил.

Рассмотрены вопросы повышения информативности бортового комплекса обороны летательного аппарата для увеличения эффективности его защиты от управляемого ракетного оружия за счет согласованного помехового, маневренного и огневого противодействия. Изложены и систематизированы основные проблемы по защите летательного аппарата от управляемых средств поражения, а также рассмотрены основные пути повышения эффективности его защиты от них. Даны оценочные расчеты отражательных свойств головок самонаведения управляемых ракет класса «воздух-воздух» и «земля-воздух», как объектов радиолокационного наблюдения. Представлено описание и проведен анализ результатов полунатурного экспериментального исследования. На основе векторно-

алгебраического подхода к формализации задач определения координат объектов в многопозиционной измерительной системе проведен синтез алгоритма оценки декартовых координат атакующей ракеты по суммарно-дальномерной информации.

Для специалистов, занимающихся вопросами защиты летательных аппаратов, научных работников и инженеров. Может быть полезна аспирантам и студентам вузов.