

УДК 621.396.67

**Алгоритм противодействия направленным помехам для плоской линейной АФАР**

Лагунов И.Р., Храмов К.К.

Статья посвящена исследованию алгоритма противодействия направленным помехам в радиолокаторах на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР). Рассматриваются методы выявления помех и противодействия им в современных радиолокационных системах. Выполняется моделирование алгоритма компенсации влияния направленным помехам. Приводятся и анализируются результаты такого моделирования.

*Ключевые слова:* фазированная антенная решётка, диаграмма направленности, направленная помеха, подавление помех.

**Введение**

Современные радиолокационные системы подвержены воздействию преднамеренных помех, предназначенных для маскировки и имитации целей. В современных радиолокационных станциях (РЛС) широкое применение находят активные фазированные антенные решётки (АФАР), основными преимуществами которых являются высокая скорость электронного сканирования луча, а также гибкое управление направлением, формированием диаграммы направленности (ДН) и мощностью зондирующего сигнала. Кроме того, АФАР обеспечивают возможность одновременного формирования нескольких лучей для решения многофункциональных задач [1-3]. Именно эти возможности делают актуальной задачу исследования и разработки алгоритмов противодействия направленным радиоэлектронным помехам (РЭП).

В данной статье приводится классификация наиболее опасных для РЛС радиопомех, анализируются методы борьбы с направленными РЭП, а также предлагается алгоритм противодействия таким помехам для плоской линейной АФАР, предназначенный для повышения помехоустойчивости радиолокационных систем.

**1. Радиоэлектронные помехи**

Как известно [4], радиоэлектронные помехи – это непоражающие электромагнитные излучения, которые ухудшают качество функционирования радиоэлектронных средств, управляемого оружия, систем обработки и передачи информации.

По природе возникновения различают естественные (природного происхождения) и искусственные помехи (имеют техногенную природу).

По способу создания рассматривают помехи либо созданные устройствами, излучающими электромагнитные колебания, либо отражателями, рассеивающими энергию падающих радиоволн. В первом случае говорят об активных помехах, во втором – о пассивных.

В зависимости от источника образования искусственные помехи делятся на непреднамеренные и преднамеренные. Первые из них возникают в результате работы собственных источников радиоизлучений. Вторые специально создаются противником для подавления наших радиоэлектронных средств.

Наибольший интерес вызывает противодействие преднамеренным помехам. Такие помехи в свою очередь принято разделять на маскирующие и имитирующие. Маскирующие помехи затрудняют процессы обнаружения полезного сигнала и измерения координат цели, в то время как имитирующие помехи несут ложную информацию о числе, координатах и параметрах движения целей. Активные маскирующие помехи в зависимости от точности наведения по частоте, подразделяются на прицельные и заградительные. Прицельные помехи ставятся на известных, разведанных частотах, поэтому они имеют ширину спектра, соизмеримую с шириной спектра сигнала подавляемой РЛС, и характеризуются высоким уровнем мощности в пределах полосы пропускания её приемника. В случаях, когда рабочая частота приёмника не известна

противнику, применение такого типа помехи не будет эффективным. Тогда противник будет вынужден ставить заградительную помеху в диапазоне частот, значительно превышающем полосу, занимаемую полезным сигналом. Это позволяет одновременно влиять на работу несколько РЛС, но приводит к существенному снижению уровня мощности помехи в пределах полосы пропускания приемников РЛС [1, 4].

По виду излучаемого сигнала активные маскирующие помехи подразделяются на шумовые помехи (непрерывные или мерцающие, копирующие структуру собственных шумов радиоприёмного устройства), ответно-импульсные помехи, излучаемые в ответ на ЗС подавляемой РЛС, хаотические импульсные помехи (ХИП). Как правило, длительность импульсов ХИП много меньше длительности ЗС подавляемой РЛС [3, 4].

Имитирующие активные радиопомехи подразделяются на собственно имитирующие помехи, несущие информацию о ложных целях, и уводящие помехи, несущие ложную информацию о координатах целей, уже сопровождаемых РЛС наведения ракет. Выделяют уводящие помехи по дальности и скорости, вызывающие срыв слежения за целью в РЛС, которые имеют режим автоматического сопровождения целей по этим координатам, и помехи, уводящие по угловым координатам, создаваемые для подавления РЛС, использующих сканирование луча для измерения углов [1, 4, 5].

Средства создания активных помех входят в штатное оборудование самолетов радиоэлектронной борьбы (РЭБ), тактической и стратегической авиации, беспилотных летательных аппаратов предназначенных для ведения РЭБ, а также могут размещаться на наземных (надводных) носителях и даже забрасываться непосредственно в места расположения РЛС [3]. Комплексы создания помех в режиме реального времени обеспечивают [3]:

- разведку радиоэлектронной обстановки, в том числе определение количества и типов работающих РЛС противника в своей зоне

достижимости и измерение характеристик излучаемых ими сигналов;

- выбор подавляемой РЛС и оптимального помехового воздействия для затруднения её работы;

- формирование помехи.

Таким образом, наибольшую угрозу корректной работе РЛС представляют активные имитирующие и маскирующие помехи, расположенные в направлениях максимумов излучения.

## 2. Алгоритм противодействия направленной помехе в РЛС с АФАР

Анализ литературы [2-5] показал, что наиболее опасными являются направленные помехи, располагающиеся в пределах главного лепестка ДН, а также в направлениях, соответствующих максимальному уровню боковых лепестков. Стоит учитывать, что эффективная компенсация помехи в пределах главного лепестка рациональна только непосредственно у его краёв. В случаях, когда максимум главного лепестка ДН совпадает с направлением на обнаруженную направленную помеху, результативнее сместить главный лепесток таким образом, чтобы уменьшить влияние мешающего излучения. Это обусловлено тем, что даже при реализации «провала» в главном лепестке будет иметь место его разделение с заметным снижением коэффициента усиления. Кроме того, такое раздвоение сканирующего луча усложняется точное определение координат реальных целей.

Рассмотрим представление диаграммы направленности на примере узкополосной линейной антенной решетки с  $K$  нулями в заданных направлениях как взвешенной суммы ДН этой решетки [6]:

$$F(\theta) = \sum_{i=0}^K \alpha_i F(\theta, \theta_i), \quad (1)$$

где  $F(\theta, \theta_i)$  – ДН линейной антенной решетки (АР) с максимумами в угломестных направлениях  $\theta_i$ ;  $\alpha_i$  – неизвестные коэффициенты.

Коэффициент  $\alpha_0$ , определяющий уровень ДН в направлении  $\theta_0$  полезного сигнала, равен

некоторой константе. Остальные коэффициенты  $\alpha_i$  находятся из условия:

$$F(\theta_i) = 0,$$

где  $1 \leq i \leq K$ .

С учётом последнего условия и выражения (1) получаем линейную систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^K \alpha_i F(\theta_0, \theta_i) = 1; \\ \sum_{i=0}^K \alpha_i F(\theta_1, \theta_i) = 0; \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^K \alpha_i F(\theta_K, \theta_i) = 0. \end{cases}$$

Данная система уравнений решается стандартными численными методами. Нетривиальное решение существует при условии  $K < N$ , где  $N$  – количество элементов антенной решетки [5-6].

На основе описанного выше метода синтеза диаграммы направленности с нулями в заданных направлениях [6], был разработан алгоритм противодействия направленным помехам. Его отличительной особенностью является использование амплитудного взвешивания при формировании вспомогательных компенсирующих ДН, ориентированных в направлениях прихода помех. Как показано ниже, этот подход позволяет существенно снизить уровень боковых лепестков в результирующей ДН. Для гибкого управления формой ДН применяется степенная функция, обеспечивающая плавное спадание амплитудного распределения. Распределение строится таким образом, что его максимум приходится на фазовый центр антенной решетки.

Для фиксации коэффициента передачи по основному каналу примем коэффициент  $\alpha_0$  равным 1. Остальные весовые коэффициенты  $\alpha_i$  находятся из системы уравнений, где каждый коэффициент пропорционален отношению значения исходной ДН к значению  $i$ -й ДН в направлении соответствующей помехи:

$$\alpha_i = \frac{F(\theta_0)}{F(\theta_i)}. \quad (2)$$

С учётом отношения (2) и выражения (1) получим следующее равенство для

суммарной комплексной ДН, которая обеспечивает «нули» в требуемых направлениях  $\theta_i$ :

$$F_{\Sigma}(\theta) = \sum_{i=0}^K \frac{F(\theta_0)}{F(\theta_i)} F(\theta, \theta_i).$$

После синтеза суммарной ДН следующим шагом является определение комплексных весовых коэффициентов для каждого излучателя АФАР. Каждому  $n$ -му элементу ( $1 \leq n \leq N$ ) ставится в соответствие комплексный коэффициент

$$w_n = A_n \exp(j\varphi_n),$$

где  $A_n$  – амплитудное взвешивание, а  $\varphi_n$  – необходимый фазовый сдвиг.

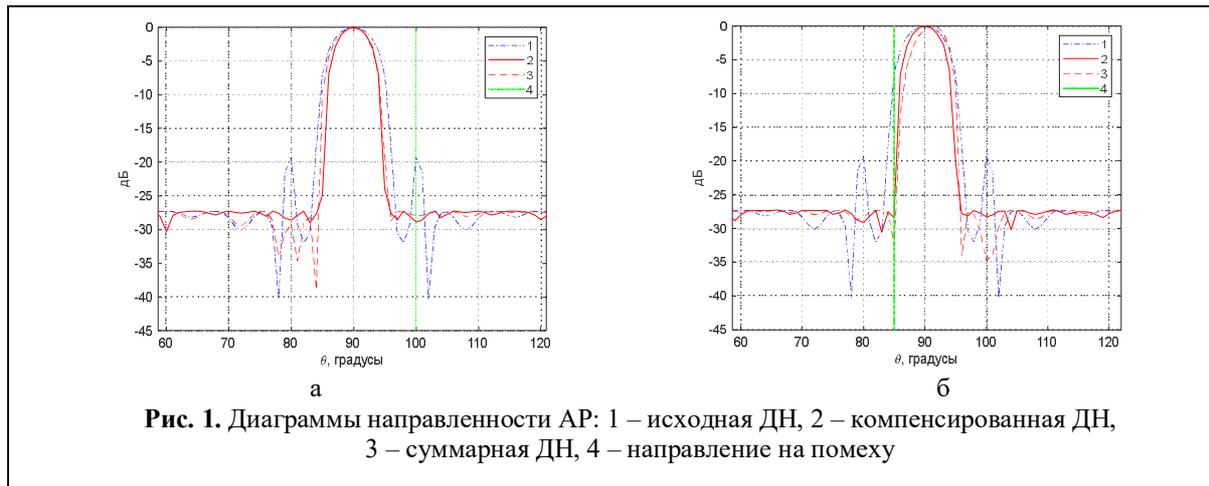
Модуль коэффициента  $A_n$  определяется выбранным амплитудным распределением, а его аргумент  $\varphi_n$  вычисляется из условия формирования заданной ДН.

Полученный вектор комплексных весов  $\{w_n\}$  применяется к каналам возбуждения элементов «реальной» АФАР. Возбуждение решетки с такими весами эквивалентно формированию требуемой компенсированной диаграммы направленности.

### 3. Результаты моделирования

Моделирование предложенного алгоритма противодействия направленным помехам проводилось в среде Matlab с использованием специализированных пакетов Antenna Toolbox и Phased Array System Toolbox. Инструментарий этих библиотек обеспечивает высокую точность электродинамического и системного моделирования, а также детальное управление параметрами как одиночных излучателей, так и антенных массивов [7-8].

На рис.1(а) приведены результаты расчётов для плоской эквидистантной линейной АФАР, состоящей из 16 антенных элементов турникетного типа. Угол  $\theta_0 = 90^\circ$  соответствует нормали к раскрытию решетки. Направление на помеху (линия 4) совпадает с максимумом одного из боковых лепестков исходной ДН (кривая 1), уровень которого составляет  $-19,3$  дБ. Применение алгоритма компенсации формирует в этом направлении провал с уровнем  $-28,9$  дБ (кривая 2). Рис.1(б) демонстрирует формирование «нуля» в области

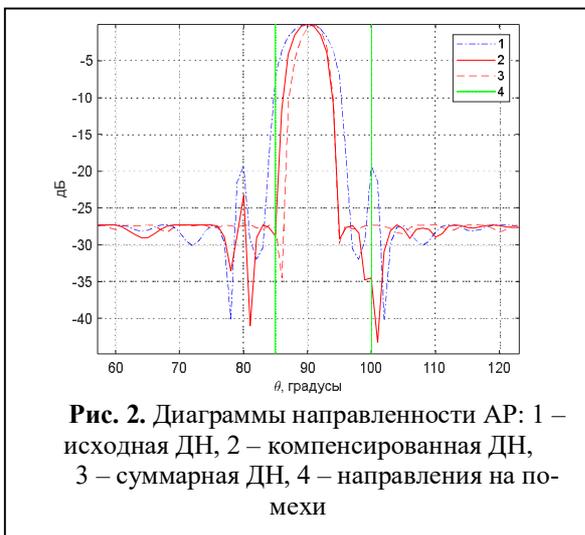


главного лепестка, где уровень ДН в направлении помехи снижается с  $-7$  дБ до  $-28,4$  дБ. Кривая 3 соответствует взвешенной сумме ДН, которая является промежуточным результатом работы алгоритма перед вычислением фазового распределения.

Отметим, что количество независимо формируемых нулей в ДН ограничено количеством управляемых элементов решетки и не может превышать  $N-1$  для решетки из  $N$  элементов [6].

На рис. 2 показана диаграмма направленности (кривая 2), в которой сформированы нули для подавления двух направленных помех, приходящих под углами  $\theta_1 = 85^\circ$  и  $\theta_2 = 100^\circ$  (линии 4). Уровни ДН в этих направлениях после компенсации уменьшились на 20,9 дБ и 14,9 дБ соответственно.

Таким образом, применение разработанного алгоритма позволяет синтезировать ДН АФАР с глубокими нулями в заданных



направлениях, что повышает устойчивость РЛС к направленным преднамеренным помехам как в секторе главного лепестка, так и в области боковых лепестков.

### Заключение

В ходе проведенного исследования был выполнен анализ наиболее опасных для РЛС типов радиоэлектронных помех и рассмотрены принципы современных методов пространственно-временной обработки сигналов для противодействия им.

На основе анализа существующих методов адаптивного формирования нулей в ДН был разработан алгоритм компенсации направленных помех. Его ключевым отличием от подхода, описанного в [6], является не прямой метод определения весовых коэффициентов, который позволяет обойтись без явного решения системы линейных уравнений методом обращения матрицы, используя вместо этого эффективную вычислительную процедуру. Алгоритм сочетает математический аппарат формирования нулей и управление комплексным распределением (амплитудой и фазой) на излучателях, что обеспечивает не только подавление помех, но и контроль уровня побочного излучения результирующей ДН.

Моделирование алгоритма для узкополосной линейной АФАР из 16 элементов подтвердило его эффективность. Показано, что при воздействии одиночной помехи в пределах главного лепестка достигается подавление более чем на 20 дБ, а в направлении бокового лепестка – более чем на 9,5 дБ. При

одновременном воздействии двух помех также продемонстрировано значительное подавление: на 20,9 дБ и 14,9 дБ соответственно.

Дополнительно показано, что предложенный алгоритм, при соответствующей модификации, может быть применён не только для формирования нулей, но и для решения задачи синтеза ДН заданной формы, включая управление шириной главного лепестка и подавлением уровня боковых лепестков.

### Литература

1. Шаров Г.А., Гладычук В.В., Гусинский А.В., Кондрашов Д.А., Свирид М.С. Апертурные антенны сантиметровых и миллиметровых длин волн. – Санкт-Петербург: Изд-во: Горячая линия – Телеком. 2017. 332 с.
2. Пудовкин, А.П. Основы теории антенн: учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 92 с.
3. Основные определения, термины и понятия по военно-технической подготовке. ННГУ ИВО, 2016. Электронный справочник. – Режим доступа: <http://zrv.ivo.unn.ru/pages/vtp/5/5-5-radioelectronnye-pomexi.htm>
4. Х. К. Дао, Д. Д. Ступин, Р. А. Шевченко. Принципы обнаружения преднамеренных помех, **Поступила 18 октября 2025 г.**

воздействующих на аппаратуру потребителей спутниковых радионавигационных систем. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/14/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.14

5. Леккий Н.М., Панов В.А. Адаптивный алгоритм формирования диаграммы направленности антенной решетки с целью увеличения её помехоустойчивости // Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral". 2023. №3.

6. A. A. Erokhin, Y. P. Salomatov, V. S. Panko and M. I. Sugak, "System of Equations for Antenna Array Beam Pattern Nulling," 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491854.

7. Кочетков В.А., Тихонов А.В., Солдатиков И.В. и др. Структура областей применения численных методов моделирования линзовых антенных решёток СВЧ диапазона в процессе их проектирования (1-я часть цикла статей) // Научно-технический сборник «Техника радиосвязи». 2016. Вып. 3 (30). С. 46-61.

8. Тупикин А.А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox. М.: СОЛОН-Пресс, 2019. 116 с.

The article investigates an algorithm for countering directed interference in radars based on active electronically scanned arrays (AESAs). Methods for detecting and countering interference in modern radar systems are considered. The article performs modeling of an algorithm for compensating the influence of directed interference. The results of such modeling are presented and analyzed.

**Keywords:** phased array antenna, radiation pattern, directed interference, interference suppression.

Лагунов Иван Романович – магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* ilavina175@gmail.com

Храмов Константин Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* hramovkk@gmail.com

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.