

К. т. н., М.В.Лапшин; Р.Р.Русаков (ОАО «НИИВК им. М.А. Карцева»)

M.Lapshin, R.Rusakov

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫМ ПОСТАНОВОЧНЫМ ПОМЕХАМ В РАДИОЛОКАЦИИ

THE MODERN COUNTERACTING RESOURCES TO THE ACTIVE STAGE NOISE IN RADIOLOCATION

В статье рассмотрены задачи адаптации в фазированных антенных решетках. Показана возможность эффективной борьбы с активными постановочными помехами в современной радиолокации.

This article describes the tasks of adaptation in the phased-array antennae. It also indicates the opportunity of effective struggle against active stage noise in the modern radiolocation.

Ключевые слова: активная фазированная решетка (АФАР), адаптивная пространственная фильтрация (АПФ), постановщик помех.

Key words: active phased-array antenna, adaptive space filtering, noise jammer.

Благодаря наивысшему приоритету, оборонная промышленность получает в свое распоряжение самые передовые и `самые дорогие технические возможности. Выпуск новых, более совершенных видов вооружения часто влечет за собой пересмотр принципов построения военной техники.

Развитие микроэлектроники позволяет вновь и вновь обеспечивать возможность работы радиолокационных комплексов в режиме «реального времени». Стремительное повышение скорости объекта-цели обеспечивается постоянно растущей вычислительной мощностью различной аппаратуры, входящей в состав радиолокационного комплекса.

Настоящая сложность современной радиолокации заключается в необходимости борьбы со средствами противодействия обнаружению – постановочные активные помехи способны «обмануть» радиолокационную

станцию и помешать адекватному ответу поражающим силам противника. Поставить такую помеху сравнительно несложно, а вот избежать ее влияния при работе с реальными объектами-целями – задача многоуровневая и достаточно трудоемкая.

Единственная на сегодняшний день перспективная технология для решения этой задачи основана на применении активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые позволяют прецизионно направить диаграмму направленности на объект-цель радиолокационной разведки и ведения [3]. Это называется адаптивной пространственной фильтрацией (АПФ).

АПФ зародилась в середине 60-х годов двадцатого века как эволюция канальных автокомпенсаторов помех.

На первоначальном этапе развития, в 70-х годах, несмотря на хорошо проработанную теорию, реализация адаптивной фильтрации в изначальном (оптимальном) виде была невозможна из-за ограниченных возможностей вычислительных средств того времени.

Тогда стали в больших количествах появляться различные субоптимальные методы, которые, по мере проработки теории и увеличения возможностей вычислительных средств, постепенно приближались к оптимальному методу. Однако сегодня они стали совершенно не актуальны, поскольку благодаря развитию цифровой и вычислительной техники, а также СВЧ-электроники реализация оптимального метода стала, наконец, возможной, но только за счет использования самых быстрых, самых дорогих средств.

Современные радиолокационные комплексы должны сохранять работоспособность в быстроменяющейся обстановке в любое время года, при любой погоде, в любом природном и техногенном окружении и даже при наличии пассивного или активного радиопротиводействия.

Это достигается значительными усилиями на этапе их проектирования - необходимо предусмотреть всевозможные препятствия для нормального функционирования и обеспечить работоспособность комплекса при их негативном воздействии. Борьба с активными постановочными помехами – наиболее трудоемкий (т. е. дорогостоящий) пункт в списке возможностей рассматриваемых систем.

Важно отметить и противоположную особенность современной радиолокации – простоту и сравнительную дешевизну оборудования постановщиков помех. За последнее время, постановщики помех, вслед за развитием радиолокационного оборудования в целом, многократно усовершенствовались и удешевились.

Еще несколько десятилетий назад устройства подобного назначения посылали непрерывный сигнал нужным образом модулированной частоты, который должен был симитировать поведение движущегося объекта в поле видимости радара. Появление импульсных радиолокационных комплексов в конце двадцатого столетия позволило выделять сигнал такой помехи в паузе между передачей радиолокационных импульсов и избавляться от него с помощью специальных рижекторных фильтров или с помощью изменения диаграммы направленности АФАР.

Современные постановщики помех – достаточно «интеллектуальные» устройства. Они способны качественно имитировать поведение объекта-цели, нужным образом посылая сигнал помехи только после приема радиолокационного импульса радиолокационного комплекса и «выжидая» моменты паузы излучения. Сравнительная дешевизна позволяет использовать несколько постановщиков, размещая их в разных областях пространства боевых действий, практически лишая радиолокационный комплекс возможности определить истинную цель и, таким образом, противостоять атаке систем наведения противника.

Из всего вышесказанного следует, что наличие работоспособной АПФ может стать определяющим фактором исхода сражения. Качество реализации

этой технологии в конкретном радиолокационном комплексе должно быть достаточно высоким, даже с учетом одновременного воздействия неблагоприятных внешних воздействий и вражеского противодействия.

Как уже было сказано, современная теория АПФ строится на основе системы, в которой радиопередатчик и радиоприемник встроены в антенную решетку в виде распределенной структуры [2].

В основе АПФ лежит идея наилучшего приема полезного сигнала и наихудшего приема помех. Для этого используется нетривиальный алгоритм оптимизации. Его сущность заключается в суммировании сигналов с элементов АФАР с такими амплитудами и фазами, при которых в диаграмме направленности (ДН) АФП формируются «провалы» (т. е. своеобразные «слепые зоны») в направлениях на помехи.

Это значит, что в первом приближении задача адаптивной фильтрации сводится к корректировке ДН, которая обеспечивается выбором некоего комплексного весового вектора пространственного сигнала, оптимизирующего показатель качества приема данных с элементов АФАР. Обычно в качестве такого показателя используется отношение мощности сигнала к сумме мощностей помехи и шума:

$$\text{ОСПШ} = \frac{\text{сигнал}}{\text{помеха+шум}}. \quad (1)$$

Пусть X – N отчетов потока данных с АФАР, представляемые в виде вектора:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T. \quad (2)$$

W – вычисляемый (оцениваемый) вектор некоторых весовых коэффициентов размерности N , который задает амплитуду и фазу работы каждого элемента решетки:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T. \quad (3)$$

Тогда y – поток данных на выходе системы:

$$y = \sum_{i=0}^N w_i^* x_i = (W^*)^T X. \quad (4)$$

* означает операцию комплексного сопряжения.

Как уже было сказано выше, ОСПШ на выходе системы является эффективной оценкой работы АФАР. В этом выражении в качестве сигнала принимается поток данных, принимаемый с того направления, на которое фазирована АФАР (т. е. куда «направлен» главный лепесток диаграммы направленности). Шумом же считается весь поток данных, который принимается с любых других направлений (т. е. шум принимается со всех остальных лепестков ДН).

Предположим, что направление приема данных будет обозначено некоторым управляющим вектором S , причем $|S_i| = 1$. Это значит, что направление задается только $\arg(S_i)$. Тогда мощность полезного сигнала на входе решетки будет вычисляться по следующей формуле [1]:

$$P_s = \frac{|W^H S|^2}{2}. \quad (5)$$

А средняя мощность помех и шумов на выходе решетки равна:

$$P_{\text{ПШ}} = \frac{\overline{|y|^2}}{2} = \frac{\overline{y y^*}}{2} = \frac{W^H \overline{X X^H} W}{2}, \quad (6)$$

где знак черты означает статистическое усреднение, которое не относится к задаваемому извне вектору W .

Обозначим корреляционную матрицу входных сигналов:

$$R = \frac{\overline{X X^H}}{2}. \quad (7)$$

Эта матрица часто используется для обработки стохастических сигналов (т. е. полученных на основе случайных процессов) и играет одну из главных ролей в адаптивной пространственной фильтрации.

После подстановки (7) в выражение (6) получаем:

$$P_{\text{ПШ}} = W^H R W. \quad (8)$$

Теперь найдем ОСПШ по формуле (1):

$$\text{ОСПШ} = \frac{P_s}{P_{\text{ПШ}}} = \frac{|W^H S|^2}{2W^H R W}. \quad (9)$$

Это значит, что задача оптимальной пространственной фильтрации в данной постановке сводится к максимизации полученной функции ОСПШ. Данное выражение путем нескольких замен сводится к отношению Релея.

Отношение Релея записывается как отношение матричных произведений [4]:

$$R = \frac{xAx^T}{xx^T}, \quad (10)$$

где A – вещественная симметрическая (т. е. выполняется условие $A = A^T$) квадратная матрица размерности $n \times n$, а x – вектор размерности n .

Для этого отношения хорошо известно решение, доставляющее его максимум.

Это производится введением положительно определенного элемента \sqrt{R} , для которого соблюдается: $R = \sqrt{R}\sqrt{R}$ и подстановками в (9)

$$Z = \sqrt{R}W. \quad (11)$$

$$W = \sqrt{R}Z \quad (12)$$

Получаем:

$$\text{ОСПШ} = \frac{W^H S S^H W}{2W^H \sqrt{R} \sqrt{R} W}. \quad (13)$$

И, окончательно:

$$\text{ОСПШ} = \frac{Z^H \sqrt{R} S S^H \sqrt{R} Z}{2Z^H Z}. \quad (14)$$

Сравнивая выражение (14) и (10), находим, что $x = Z, A = \sqrt{R} S S^H \sqrt{R}$.

Максимум отношения Релея обеспечивается правым собственным вектором матрицы эрмитовой формы числителя [1], который соответствует ее максимальному собственному значению.

Следовательно, полученному выражению ОСПШ соответствует внешнее произведение столбца $\sqrt{R}S$ на строку $S^H \sqrt{R}$. Это матрица:

$$A = \sqrt{R} S S^H \sqrt{R}, \quad (15)$$

которая имеющая ранг = 1, и, поэтому, имеющая одно ненулевое собственное значение, которому соответствует собственный вектор $Z_0 = \sqrt{R}S$. Это значит, что с точностью до нормировки:

$$W_{opt} = \sqrt{R}Z_0 = R^{-1}S. \quad (15)$$

Таким образом, мы приходим к окончательному выводу:

$$W_{opt} = R^{-1}S. \quad (16)$$

Полученное выражение – решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в которой коэффициенты матрицы составляются из корреляционной матрицы R , а коэффициенты свободных членов составляются из управляющего вектора S .

Решая СЛАУ, составленную согласно выражению (16), мы обеспечиваем наилучший (оптимальный) прием сигнала с направления, которое задается вектором S .

Полученный вектор весовых коэффициентов W_{opt} изменяет ДН АФАР таким образом, что прием данных с направления, в котором находится постановочная помеха становится невозможен, а прием данных с основного направления (в направлении управляющего вектора S) не страдает.

Задача АПФ, несмотря на сложность своей постановки, сводится к решению специальным образом сформированной СЛАУ. Решение полученной системы, – вектор весовых коэффициентов, – модифицирует ДН устройства и устанавливает нули в направлениях на источник помех, практически не изменяя качества приема данных в направлении фазировки АФАР. Описанное решение принято называть оптимальным.

Литература

1. Ратынский М.В. «Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках», М.: Радио и связь, 2003.
2. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. «Активные фазированные антенные решетки», М.: Радиотехника, 2011.
3. Чиркунова Ж.В. «Пространственная обработка сигналов в цифровых антенных решетках», автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, М.: 2009.

4. Ланкастер П. Теория матриц. Глава 3. – М.: Наука, 1973.