Гончаров В.А.¹

(Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва)

Рассмотрена проблема разработки антенной решетки с активной апертурой для бортовых систем обнаружения и радиоэлектронного подавления. При оптимизации модели антенной решетки разработан новый метод синтеза целевой функции.

Ключевые слова: радиоэлектронное подавление, активная фазированная антенная решетка, изотропный излучатель, диаграмма направленности, сектор защиты.

1. Введение

В настоящее время в связи с развитием полупроводниковой техники и информационных технологий для систем обнаружения и радиоэлектронного подавления (РЭП) [1] существует проблема создания и применения активных фазированных антенных решеток (АФАР) на твердотельной элементной базе. Актуальность проблемы, прежде всего, обусловлена возможностью повышения энергетического потенциала и живучести бортовых радиоэлектронных комплексов (РЭК) индивидуальной и групповой защиты. Цель данной статьи заключается в получении на основе детальных исследований расчетной модели фази-

¹ Гончаров Владимир Анатольевич, аспирант (<u>nio7@list.ru</u>).

рованной антенной решетки с комбинированным многолучевым управлением.

2. Основные задачи

Конструктивно-технологические решения по антенным решеткам с активной апертурой на сегодня проработаны в недостаточной степени [2]. Ко всему прочему, обеспечить широкоугольное сканирование пространства в широкой полосе частот весьма непросто. Поэтому исследование проблемы структурного синтеза такой антенной системы заключается в комплексном решении следующих задач:

1) исследование схемотехники АФАР и обоснование применения линейного эквидистантного излучающего раскрыва;

2) разработка и апробация расчетной модели линейной эквидистантой АФАР с широкоугольным сектором защиты;

3) оптимизация шага между изотропными излучателями антенной решетки;

4) выбор слабонаправленного излучающего элемента антенной решетки с заданными диапазонными свойствами;

5) выбор оптимального количества излучающих элементов антенного полотна исходя из энергетических характеристик системы.

3. Схемное решение

Принцип действия антенной системы станции активных помех следующий. Приемная часть антенной решетки осуществляет пеленгацию радиолокационных сигналов. Далее информация о частоте и направлении прихода излучения поступает на передающую часть. Передающая антенная решетка в заданном направлении выполняет постановку ответной помехи. Для обработки высокочастотной информации в антенных системах, как правило, применяются специальные диаграммообразующие матрицы. Применение линзы Ротмана в качестве диаграммообразующей схемы (ДОС) приемной антенной решетки обусловлено возможностью пеленгации сигналов в достаточно широкой полосе частот. ДОС передающей антенной решетки может строиться на многоканальной линии задержки с микропрограммным управлением. Поскольку многолучевые антенные решетки на линзе Ротмана давно известны в дальнейшем рассматривается возможность реализации передающей АФАР с гибким цифровым управлением.



Рис. 1. Структурная схема АФАР, работающей в многолучевом режиме

Линейная эквидистантная схема расположения излучателей упрощает конструкцию и уменьшает стоимость антенной решетки. Поэтому, при проектировании АФАР предпочтительно ограничиться сканированием пространства только в одной плоскости. При этом, антенная система станции РЭП, фокусируя излучение в опасном направлении, должна обеспечивать возможность одновременной работы по не менее чем четырем целям. Структурная схема антенной системы станции активных помех показана на рис. 1. Коротко опишем данную схему. СВЧ сигнал в виде помехи поступает на вход ДОС. В ДОС сигнал разветвляется и поступает на многоканальную шину с заданным в блоке управления лучами амплитудно-фазовым распределением токов по раскрыву антенной решетки. Для работы антенной решетки в многолучевом режиме в каждом канале ДОС должно быть параллельно включено как минимум по четыре цифровые линий задержки. То есть, задержку импульсного сигнала можно задавать программным способом. При проектировании фазовращателей на линиях задержки наиболее предпочтительной можно считать последовательную схему возбуждения антенной решетки. Дальнейшая обработка СВЧ сигнала происходит в усилительной матрице. После раскачки в усилительной матрице сигнал излучается в открытое пространство.

4. Разработка расчетной модели

Обычно для многократного решения задач электродинамического уровня применяется обработка данных на вычислительной машине. Анализ и оптимизация идеализированной модели ускоряется при использовании готовых математических пакетов. По мнению автора для моделирования аналитических зависимостей наиболее пригодна довольно мощная система автоматизированного проектирования Mathsoft Mathcad. Данное приложение обладает такими преимуществами как «живые формулы» и «бумажный принцип написания программ». Рассмотрим процесс анализа и оптимизации модели излучающего полотна широкополосной АФАР. Геометрическая интерпретация излучающего полотна линейной эквидистантой АФАР представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема управления лучом антенной решетки

4

Ниже приводится отмоделированный в пакете MathCAD электродинамический расчет линейной эквидистантой решетки слабонаправленных излучателей.

Исходные данные:

$$f = 18 \cdot 10^9$$
, $d = 0.009$, $N = 25$.

где *f* – частота сигнала [Гц]; *d* – расстояние между излучающими элементами [м]; *N* – число излучателей [шт].

Длина волны [м] и волновое число [рад/м] излучаемого колебания на верхней частоте диапазона:

(1)
$$I = 3 \cdot 10^8 / f$$
, $k = 2p/I$.

Вектор управления углами отклонения [рад] главным дифракционным максимумом диаграммы направленности в азимутальной плоскости для четырехлучевого режима:

(2) $\mathbf{\Theta} = \frac{\mathbf{p}}{180} \cdot \begin{pmatrix} \Theta_1 & \Theta_2 & \Theta_3 & \Theta_4 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}.$

Фазовое распределение колебаний по элементам апертуры решетки:

(3) $\Psi(n) = k \cdot d \cdot n \cdot \sin(\Theta)$.

Расчет электродинамической модели излучающего полотна линейной антенной решетки [3]:

(4)
$$\mathbf{F}(q,j) = \left[J_0\left(\frac{q}{\Delta q}\right) J_0\left(\frac{j}{\Delta j}\right) \sum_{n=1}^N \exp(i(k \cdot d \cdot n \sin(q) - \Psi(n))) \right]^2.$$

где $J_0()$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $\Delta \theta$ – ширина диаграммы направленности изолированного излучателя в азимутальной плоскости [рад]; $\Delta \varphi$ – ширина диаграммы направленности изолированного излучателя в угломестной плоскости [рад].

Представленная модель изложена в краткой форме. Поэтому следует прокомментировать каждую операцию. В исходных данных в единицах измерения SI задаются количественные значения рабочей частоты, шага между излучателями решетки, количества излучателей. По умолчанию предполагается, что распределение амплитуд токов по раскрыву линейной решетки равномерное. Расчет электродинамической модели осуществляется в следующей последовательности. В выражении (1) находятся хорошо известные из курса физики длина волны и волновое число. Для упрощения, операция вода углов отклонения лучей (2) осуществляет транспонирование вектора и преобразование градусов в радианы. Размерность вектора-столбца углов азимутального отклонения дифракционного максимума антенной решетки определяет максимальное количество лучей в апертуре. Фазовое распределение колебаний по элементам решетки (3) рассчитывается как синус от вектора углов азимутального отклонения. Диаграмма направленности (ДН) антенной решетки (4) строится как функция потока энергии от угла наблюдения. Она рассчитывается как произведение аппроксимации ДН слабонаправленного излучателя на множитель многолучевой решетки. Множитель многолучевой решетки строится в соответствии с принципом суперпозиции полей. Результаты анализа и вычислений ДН в плоскости сканирования выводятся графически (смотрите рис. 3, 4).



Рис. 3. Результаты моделирования диаграммы направленности линейной антенной решетки в азимутальной плоскости в четырехлучевом режиме

Благодаря простоте реализации в [5] и в настоящей работе рассматриваются линейные эквидистантные антенные решетки. Качание лучом осуществляется при линейном распределении фаз по раскрыву антенной решетки. Выражение (3) показывает зависимость разности фаз между токами в соседних излучателях от угла отклонения главного дифракционного максимума. Из соотношения (3) видно, что величина угла отклонения главного дифракционного максимума пропорциональна частоте излучения. То есть, особенностью элементарной модели (3) можно считать введение в уравнение линейного фазового распределения дополнительного коэффициента (волнового числа), величина которого пропорциональна частоте излучения. На аппаратном уровне это означает синхронное распределение фазового распределения по раскрыву решетки при изменении частоты излучения. Такой алгоритм управления лучом антенной решетки можно считать программной реализацией фазорастного метода.



Рис. 4. Результаты моделирования диаграммы направленности линейной эквидистантой апертуры в азимутальной плоскости в однолучевом режиме

Обычно вычисление тригонометрических функций выполняется в радианах. Ввод вектора углов отклонения лучей осуществлялся в градусах. Для четырехлучевого режима он составляет –45°; –20°; 12°; 35°, для однолучевого режима 35°. На рис. З изображена ДН линейной антенной решетки работающей в четырехлучевом режиме в верхней части частотного диапазона $f_{\rm B} = 18$ ГГц. На рис. 4 показан типичный для классических АФАР однолучевой режим работы на нижней частоте рабочего диапазона $f_{\rm H} = 6$ ГГц. В таком случае основной дифракционный максимум излучающей апертуры характеризуется углом отклонения θ_0 и шириной ДН 2 $\Delta\theta$. Из результатов моделирования видно, что расширение полосы рабочих частот линейной антенной решетки приводит к снижению ее разрешающей способности. Поэтому при проектировании антенных решеток с целью повышения их разрешающей способности желательно использование многолитерного режима работы.



Рис. 5. Результаты моделирования в однолучевом режиме диаграммы направленности линейной антенной решетки в ортогональных плоскостях

До сих пор проводились исследования распределения поля дальней зоны излучающей структуры в азимутальной плоскости. То есть исследовалась управляемость антенной системы в 8 плоскости сканирования. Теперь перейдем к рассмотрению поля дальней зоны в угломестной плоскости. На рис. 5 представлена модель ДН линейной антенной решетки в двух ортогональных плоскостях. Видно, что ее основной дифракционный лепесток имеет остронаправленный характер. На трехмерной модели ДН можно рассмотреть структуру электромагнитного поля в угломестной плоскости. Ясно, что она определяется только характеристиками изолированного излучающего элемента решетки, который по возможности должен быть всенаправленным.

5. Апробация модели активной апертуры

Кроме стабилизации положения луча при широкополосном сканировании пространства также существует проблема регулирования шириной диаграммы направленности антенной решетки. Одним из способов решения данной проблемы является оптимизация шага между излучателями антенного полотна. Оптимальный шаг между изотропными излучателями подбирается исходя из следующих соображений. Во-первых, при увеличении расстояния между излучателями сужается сектор обзора в верхней части частотного диапазона (условие однолучевого сканирования). Во-вторых, при уменьшении расстояния между излучателями возрастает ширина диаграммы направленности антенной решетки в нижней части диапазона. Было проведено моделирование излучающего полотна антенной решетки и установлен оптимальный шаг между излучающими элементами. В полосе частот от 6 до 18 ГГц и секторе сканирования $\pm 45^{\circ}$ методом перебора найдено примерное значение, которое равно 9 мм. При оптимизации шага между излучателями решетки возможно его увеличение к краям антенного полотна. Неэквидистантная схема широко применяется для минимизации уровня боковых лепестков ДН радиоприемных антенных решеток. В мощных радиопередающих антенных решетках применение неэквидистантной схемы не дает существенного энергетического выигрыша.

Для апробации модели (4) воспользуемся простым приемом. Попробуем найти количественное значение оптимального шага между соседними излучателями антенной решетки другим методом. Обычно при оптимизации сложных систем возникает три проблемы. Во-первых, задача оптимизации сводятся к максимизации многокритериальной целевой функции. Boвторых, проблема максимизации таких целевых функций обусловлена их многоэкстремальным характером. В-третьих, ставится вопрос устранения противоречий между улучшаемыми параметрами. Оптимизация противоречивых параметров, как правило, сводится к оценке их отношения. Например, отношение сигнал/шум или отношение цена/качество. Разрешающая способность сканирующей системы зависит от ширины ДН её антенны. Поэтому при синтезе остронаправленных (и даже сверхнаправленных) антенных решеток стремятся сузить ширину луча. Из этих соображений автор статьи разработал метод двойного критерия. Идея заключается в представлении целевой функции в виде модуля отношения максимального угла отклонения луча к ширине ДН.

Максимальный угол отклонения луча от нормали к апертуре рассчитывается по формуле:

(5)
$$q_{\rm M}(d) = \arcsin\left(\frac{l}{d}-1\right).$$

Ширина диаграммы направленности антенной решетки находится с помощью известного соотношения:

(6)
$$\Delta q(d) = \frac{1}{N \cdot d \cos(q_0)}$$

Целевая функция в задаче оптимизации шага между излучателями решетки представлена в следующем виде:

(7)
$$f(d) = \left| \frac{q_{\scriptscriptstyle M}(d)}{\Delta q(d)} \right| \to \max$$
.

После подстановки в целевую функцию (7) исходных данных и расчета получается показанная на рис. 6 многоэкстре-

мальная зависимость. Для окончательного решения оптимизационной задачи не хватает ограничений на шаг d. Из условия однолучевого сканирования (6) при $\theta_{\rm M} \leq 45^{\circ}$ можно установить, что $d \leq 9,763$ мм. По графику на рис. 5 с достаточной для инженерной практики точностью находим оптимальный шаг, который равен 9 мм. Таким образом, хорошая сходимость результатов моделирования антенной решетки разными методами говорит о достоверности приведенных выше рассуждений.



Рис. 6. График целевой функции к задаче оптимизации шага между соседними излучателями антенной решетки

При синтезе антенной системы результирующая диаграмма направленности равна произведению дифракционной картины суммарного излучения на диаграмму направленности излучающего элемента. Поэтому для получения модели антенной решетки с широкоугольным качанием луча требуется слабонаправленный излучающий элемент. Идеальным вариантом может служить изотропный излучатель. Основное назначение излучающего элемента заключается в согласовании стандартного сопротивления фидерного тракта (50 [Ом]) с волновым сопротивлением открытого пространства (120• π [Ом]). При расчете геометрии антенны, как правило, используется принцип соизмеримости длины волны излучения с размерами излучателя. Также известно, что при синтезе антенны по форме диаграммы направленности соблюдается принцип электродинамического подобия. Для получения слабонаправленного излучения в широкой полосе частот широко применяются антенны бегущей волны с расширяющейся щелью. Достоинством этих антенн можно считать возможность реализации в микрополосковом исполнении. Однако наличие диэлектрического материала в согласующем переходе (антенне) отрицательно влияет на отражения и диссипативные потери. При широкоугольном качании луча в некоторых направлениях возможен резкий рост величины коэффициента отражения |α|, которая может превышать 1. В этих направлениях возникает эффект ослепления, то есть полностью прекращается прием или передача электромагнитных волн. Зависимости |а| от угла сканирования для волноводных ФАР приведен в [4], а для фазированных решеток на полосковых линиях в [6]. Анализ зависимостей показал, что наличие диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью в активной апертуре антенной решетки способствует эффекту ослепления. Другой способ снижения |α| заключается в развязке излучателей с помощью проводящих перегородок.

Хорошо известно [7], что энергетический потенциал АФАР пропорционален квадрату числа излучателей в антенной решетке. Также известно, что влияние отказа одного излучателя в решетке обратно пропорционально квадрату числу излучателей. Поэтому при структурной оптимизации АФАР стремятся максимизировать количество излучателей. Однако разработка АФАР для бортовых РЭК накладывает ограничения на массогабаритные показатели антенного полотна. Кроме того, из-за краевого эффекта и конечной величины развязки между соседними излучателями при качании луча возможно рассогласование активных элементов решетки. Таким образом, количество излучающих элементов определяется максимальной длиной антенного полотна и шагом между излучателями.

6. Заключение

Практические выводы настоящей работы состоят в следующем. Во-первых, оптимальный шаг между излучателями антенной решетки определяется сектором сканирования в верхней части диапазона и шириной диаграммы направленности в нижней части частотного диапазона. Во-вторых, при широкоугольном сканировании пространства желательно использовать согласующие перегородки и максимально ограничить применение в раскрыве антенны диэлектриков. Также, при синтезе антенной системы с широкоугольным сектором защиты следует использовать слабонаправленные излучающие элементы. Втретьих, хорошая сходимость результатов исследования математической модели многолучевой активной апертуры (4) разными методами в достаточной степени свидетельствует об адекватности последней.

Литература

- 1. ПЕРУНОВ Ю.М., ФОМИЧЕВ К.И., ЮДИН Л.М. *Радио*электронное подавление информационных каналов систем управления оружием. Изд.2, испр. и доп. 2008. 416 с.
- КАЗАНЦЕВ Г. В. Исследование возможности построения активных многолучевых антенных решеток для широкополосных малогабаритных цифровых приемо-передающих устройств // Отчет по научно-исследовательской экспериментальной работе. – М.: ЦНИРТИ. 1996.
- Устройства СВЧ и антенны. Проектирование ФАР / Под ред. Д.И. Воскресенского. 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2003.
- ГОСТЮХИН В.Л., ТРУСОВ В.Н., КЛИМАЧЕВ К.Г., ДАНИЧ Ю.С. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. В.Л. Гостюхина. – М.: Радио и связь. 1993.
- 5. АМИТЕЙ Н., ГАЛИНДО В., ВУ Ч., *Теория и анализ фазированных антенных решеток* / Пер. с англ. М.; Мир, 1974.

- 6. Microwave Journal, vol. 29, N 3, p.93-104, 1986.
- Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова.- М.: Радиотехника, 2004.

RESEARCH CIRCUITRY OF ANTENNA ARRAY WITH WIDE SECTOR PROTECTION

Vladimir Goncharov, The Moscow State University Instrument Making and Computer, Moscow, graduate student (nio7@list.ru, 8(916) 927-19-83).

Abstract: The problem of development an antenna array with the active aperture for onboard systems of detection and radioelectronic suppression is considered. At optimization of model an antenna array the new method of synthesis target function is developed.

Keywords: radio-electronic counteraction, the active phased antenna array, isotropic radiator, the diagram of an orientation, sector of scanning.