СИНТЕЗ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В.В. Задорожный, Л.И. Стрельченко, С.А. Стрельченко

*Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Предложен метод синтеза излучающей системы активной фазированной антенной решетки на основе топологической оптимизации с использованием объединения групп антенных элементов в излучатели разной формы и размеров. Приведены результаты моделирования объемной диаграммы направленности синтезированных излучающих систем и зависимости уровня боковых лепестков от угла сканирования.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, излучающая система, уровень боковых лепестков, синтез излучающей системы, топологическая оптимизация.

THE SYNTHESIS OF ACTIVE ELECTRONICALLY STEERED ARRAY RADIO SYSTEM BASED ON TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

V.V. Zadorozhny, L.I. Strelchenko, S.A. Strelchenko

Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications, Rostov-on-Don, Russian Federation

A method of synthesizing the emitting system of an active phased antenna array based on topological optimization using the combination of groups of antenna elements into emitters of various shapes and sizes is proposed. The results of modeling a 3D radiation pattern of synthesized emitting systems and the dependence of the side lobe level on the scanning angle are presented.

Keywords: AESA, radiating system, side lobe level, topological optimization.

Применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) в антенных устройствах (АУ) систем связи, передачи данных, радиолокации и др., обеспечивает расширение функциональных возможностей АУ – возможность снижения потерь сигнала при приеме и передаче, повышения чувствительности, формирования многолучевой диаграммы направленности (ДН), быстрой перестройки алгоритма работы, увеличения надежности [1]. Недостатком АФАР является высокая стоимость из-за использования маломощных усилителей и усилителей мощности в каждом канале, поэтому снижение стоимости АФАР является одной из первоочередных задач при проектировании.

Одним из направлений снижения стоимости АФАР является уменьшение числа каналов за счет использования разреженных излучающих систем (ИС). Для успешной реализации этого направления необходимо совершенствовать методы синтеза разреженных ИС АФАР с заданными характеристиками – коэффициентом направленного действия (КНД), уровнем боковых лепестков (УБЛ), сектором сканирования.

Ряд методов синтеза разреженных АФАР приведен в [2], однако авторы исследуют только УБЛ, а изменение величины КНД не рассматривают. В [3] описан метод синтеза разреженной ИС на основе генетического алгоритма поиска, обеспечивающий снижение стоимости АФАР за счет уменьшения количества каналов при сохранении величины КНД, соответствующего АФАР с эквидистантной ИС со спадающим амплитудным распределением. Однако для сохранения величины КНД снижение числа каналов в разреженной АФАР ограничено, например в случае [3] величиной 20 %.

В [4; 5] предложен метод синтеза топологии ИС для АФАР космической системы связи на основе топологического градиента, который позволяет сократить количество каналов в АФАР на 46,5 % при сохранении КНД. Это достигается за счет объединения групп антенных элементов (АЭ) в излучатели с увеличенной площадью с разной формой. Однако авторами рассматривается это решение для ограниченного сектора сканирования $\pm 8^\circ$.

В настоящее время во многих системах используются АФАР с более широкими секторами сканирования, поэтому вопросы создания метода синтеза топологии ИС для АФАР со сниженным числом каналов с широкоугольным сканированием являются актуальными.

Цель работы: снижение количества каналов в активной фазированной антенной решетке.

Решаемые задачи.

1. Разработка метода синтеза ИС АФАР на основе ее топологической оптимизации.
2. Анализ характеристик АФАР с синтезированной топологией ИС.
3. Исследование зависимости УБЛ ДН АФАР с синтезированной ИС от сектора сканирования.

Метод синтеза должен обеспечивать получение топологии ИС с заданной шириной ДН и УБЛ при снижении количества активных каналов АФАР относительно исходного варианта применения эквидистантной ИС со спадающим амплитудным распределением. Снижение количества активных каналов достигается за счет объединения части элементов в излучатели с увеличенной площадью.

Синтез ИС по аналогии с подходом, изложенным в [5], включает в себя три этапа:

- этап 1: формирование областей размещения групп элементов ИС в соответствии с заданным амплитудным распределением и возможными типами объединений;
- этап 2: создание предварительной топологии ИС;
- этап 3: оптимизация предварительной топологии ИС с применением модифицированного алгоритма топологического градиента.

Рассмотрим работу предлагаемого метода синтеза ИС по этапам.

На этапе 1 выполняется формирование областей по количеству объединяемых элементов в соответствии с заданным амплитудным распределением. Для этого определяются интервалы снижения значений амплитуд в соответствии с амплитудным распределением и с учетом снижения амплитуды излучаемого сигнала на объединенных излучателях, пропорционального их размеру. Излучатели могут содержать от одного до шести элементов и иметь прямоугольную или квадратную форму.

Пример сформированных областей групп элементов для ИС с круглым раскрытием диаметром 27 элементов и с квадратным раскрытием 27×27 элементов при использовании спадающего амплитудного распределения приведен на рис. 1. ИС с квадратным раскрытием содержит 729 элементов, с круглым – 529.

Амплитудное распределение на элементах выражается зависимостью $U_{i_x, i_y} = U_{x_{i_x}} \cdot U_{y_{i_y}}$, где U_x и U_y – распределение соответственно по строкам и столбцам раскрытия ИС. Для расчета использовано спадающее амплитудное распределение вида

$$w(n, \alpha) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left(\alpha \cdot \frac{n}{(n-1)/2} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где α – коэффициент, определяющий спадание амплитуды, n – номер элемента.

Распределение (1) при $\alpha = 1,45$ обеспечивает УБЛ –22 дБ. В предлагаемом методе вместо (1) может быть использовано любое другое спадающее амплитудное распределение.

Антенные элементы на рис. 1 представлены квадратами. В центре раскрытия незакрашенные элементы, не участвующие в объединениях, далее расположены области кольцевой формы расположения групп элементов, из которых могут быть сформированы объединенные излучатели из 2...5 элементов. Шаг расположения элементов равен $\lambda/2$, где λ – длина волны.

Рис. 1. Расположение областей объединения элементов для раскрывов: а) квадратного; б) круглого

На этапе 2 в полученных на этапе 1 областях формируется топология объединенных излучателей, представляющих собой объединенную подгруппу элементов. При этом подгруппа считается объединенной, если между ее любыми двумя элементами можно построить путь с помощью только горизонтальных и вертикальных перемещений. В каждой подгруппе ищется такая совокупность объединений элементов, которая минимизирует общее количество элементов.

Полученная на этапе 2 предварительная топология ИС для квадратной и круглой форм раскрыва при использовании амплитудного распределения (1) с $\alpha = 1,45$ приведена на рис. 2.

Объединенные излучатели на рис. 2 обозначены разными оттенками: те из них, которые расположены ближе к центру, содержат по два элемента, при отдалении от центра размеры излучателей увеличиваются и включают 3...5 элементов. Каждый излучатель подключен к одному каналу АФАР, при этом спадающее амплитудное распределение формируется за счет снижения амплитуды излучаемого сигнала, пропорциональное размеру излучателя. Незакрашенные элементы в центре и других местах раскрыва – это одиночные элементы с максимальной амплитудой излучаемого сигнала.

Рис. 2. Топология ИС, сформированная на этапе 2 для раскрывов: а) квадратного; б) круглого

Предварительная топология дает начальную аппроксимацию амплитудного распределения и имеет невысокую точность формирования распределения, при этом снижение количества активных каналов в ИС с квадратным раскрывом составляет 34 % (с 729 до 481), с круглым – 23 % (с 529 до 407).

На этапе 3 выполняется оптимизация топологии ИС для более точного формирования амплитудного распределения в раскрыве за счет изменения формы объединенных излучателей с учетом размеров и формы окружающих излучателей.

Поиск вариантов объединений элементов выполняется с использованием алгоритма топологического градиента. Недостатком классического алгоритма топологического градиента [6] является высокая вычислительная сложность, так как число операций, необходимых для его выполнения, плавающее и может изменяться от $K \cdot N_A + O(K)$ до $O(K \cdot N_A^2)$, что для многоэлементных ИС составляет значительную величину. Для снижения числа операций для предлагаемого метода разработан модифицированный алгоритм топологического градиента с конечным числом шагов $K \cdot N_A + O(K)$.

Для оценки точности формирования амплитудного распределения используется стоимостная функция, являющаяся суммой квадратов невязок заданных и расчетных амплитуд на одноименных элементах ИС:

$$J(\bar{a}) = \sum_{i=1}^{N_A} (a_i - u_i)^2, \quad (2)$$

где $\bar{a} = (a_1 \dots a_{N_A})$ – вектор расчетных амплитуд на элементах ИС, $\bar{u} = (u_1 \dots u_{N_A})$ – вектор заданных амплитуд, N_A – количество элементов ИС.

На каждом шаге алгоритма выбирается элемент с наибольшей невязкой, и к нему применяются все возможные типы объединений с соседними элементами для снижения значения функции стоимости. Процесс длится до тех пор, пока не останутся непросмотренные элементы.

Топология синтезированной на этапе 3 ИС при максимальном размере объединенных излучателей 5 элементов приведена на рис. 3.

Снижение количества каналов для ИС с квадратным раскрывом 27 x 27 элементов составляет 48,4 % (с 729 до 376), для ИС с круглым раскрывом диаметром 27 элементов – 39,3 % (с 529 до 321).

Рис. 3. Синтезированная топология ИС для раскрывов: а) квадратного; б) круглого

Для проверки результатов работы предложенного метода проведен расчет объемных ДН и их сечений для синтезированных ИС с квадратным раскрывом размерами 27 x 27 и 39 x 39 элементов и с круглым раскрывом диаметром 27 и 39 элементов.

Расчетная объемная ДН синтезированной ИС и ее сечения для квадратного раскрыва размером 27 x 27 элементов в координатах направляющих косинусов приведены на рис. 6 и 7. Расчет проведен без учета взаимного влияния отдельных элементов и формы их ДН.

Расчетные значения КНД для рассмотренных типов ИС, найденные по объемной ДН, приведены в табл. 1 и 2. При неотклоненной ДН синтезированная ИС имеет КНД, превышающий КНД эквидистантной ИС со спадающим амплитудным распределением на 0,05–0,42 дБ за счет более узкой ширины ДН. При сканировании ДН в секторе $\pm 30^\circ$ ухудшение КНД в синтезированной ИС составляет 2–2,3 дБ относительно эквидистантной ИС со спадающим амплитудным распределением.

Таблица 5

Значения КНД для различных типов ИС при не отклоненной ДН

Тип ИС	КНД ИС, дБ		
	Эквидистантная с равномерным распределением	Эквидистантная со спадающим распределением	Синтезированная
Квадратная 27x27	33,47	32,82	33,09
Круглая Ø27	32,11	31,79	31,84
Квадратная 39x39	36,70	35,78	36,20
Круглая Ø 39	35,42	34,49	34,84

Таблица 6

Значения КНД для различных типов ИС при отклонении ДН на 30° по углу места и азимуту

Тип ИС	КНД ИС, дБ		
	Эквидистантная с равномерным распределением	Эквидистантная со спадающим распределением	Синтезированная
Квадратная 27x27	32,87	32,19	29,91
Круглая Ø27	31,48	31,17	29,51
Квадратная 39x39	36,09	35,15	32,84
Круглая Ø 39	34,80	33,87	31,83

Графики зависимости максимального УБЛ объемной ДН от отклонения максимума ДН в угломестной плоскости для синтезированной ИС приведены на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость максимального УБЛ от отклонения луча по углу места при различных отклонениях луча по азимуту для ИС с раскрытиями: а) квадратным; б) круглым

Величина УБЛ в ИС с квадратным раскрывом из-за ограниченного числа осей симметрии имеет минимум при отклонении ДН на 30° для размеров 27×27 элементов и на $32-38^\circ$ для размеров 39×39 элементов соответственно при отсутствии и наличии отклонения в азимутальной плоскости. ИС с круглым раскрывом обеспечивает более низкий УБЛ по сравнению с квадратным раскрывом, при этом увеличение УБЛ имеет более монотонный характер с увеличением угла наклона. Кривая зависимости УБЛ для ИС с круглым раскрывом диаметром 39 элементов имеет более высокую скорость роста из-за применения при синтезе амплитудного распределения с увеличенным спаданием.

Топология синтезированной ИС с круглым раскрывом диаметром 27 элементов для спадающего распределения с УБЛ – 35 дБ обеспечивает снижение числа каналов АФАР на 53,3 % (с 529 до 247 канала). Синтезированная ИС для этого случая приведена на рис. 5а. Полученная величина снижения каналов превышает величину 46,5 % в [4; 5]. Сечение объемной ДН с неотклоненной ДН приведено на рис. 5б, график прерывистой линией – сечение ДН эквидистантной ИС со спадающим распределением.

Рис. 5. Синтезированная ИС с круглым раскрывом диаметром 27 элементов со сниженным на 53,3 % числом каналов (а); сечение объемной ДН с неотклоненной ДН (б)

Зависимость максимального УБЛ объемной ДН от отклонения ее максимума для этого варианта ИС приведена на рис. 6. Снижение числа каналов в АФАР с такой ИС вызывает более резкое увеличение УБЛ ДН при сканировании. Так, ИС со снижением числа активных каналов на 39,3 % обеспечивает увеличение УБЛ на 2 дБ при сканировании в секторе около $\pm 30^\circ$ (рис. 4), а снижение числа активных каналов на 53,3 % дает такое же увеличение УБЛ в более узком секторе сканирования $\pm 18^\circ$ (рис. 6).

Предложенный метод может быть использован при проектировании ИС для АФАР со сниженным числом каналов для приемопередающих устройств систем связи в соответствии с требуемым сектором сканирования ДН и уровнем боковых лепестков.

Предложенный метод синтеза ИС АФАР обеспечивает снижение количества ее каналов путем объединения элементов ИС в излучатели увеличенного размера при формировании спадающего амплитудного распределения.

Увеличение спадания амплитудного распределения обеспечивает снижение числа каналов АФАР: так, при использовании амплитудного распределения с УБЛ – 35 дБ в ИС с круглым раскрывом 27 элементов число каналов снижается на 53,3 %, что сопровождается снижением сектора сканирования и КНД. Разработанный метод позволяет выполнять синтез топологии ИС за время нескольких минут для ИС с 729 элементами.

Рис. 6. Зависимость максимального УБЛ ИС от отклонения луча по углу места: *а)* без отклонения по азимуту; *б)* при отклонении по азимуту на 30°

Синтезированная ИС для АФАР со сниженным количеством каналов по сравнению с эквидистантной ИС со спадающим амплитудным распределением при заданном УБЛ – 22 дБ обеспечивает сканирование в секторе $\pm 30^\circ$ с ухудшением КНД при максимальном отклонении на 2–2,3 дБ для квадратного раскрыва размерами 27 x 27 и 39 x 39 элементов и круглого раскрыва диаметром 27 и 39 элементов. Величина УБЛ синтезированной ИС превышает УБЛ эквидистантной ИС на 3–5 дБ при неотклоненной ДН и до 10 дБ при отклонении ДН на 30° по углу места и азимуту. С увеличением размеров ИС с 27 x 27 до 39 x 39 элементов величина УБЛ снижается на 1,4 дБ и 2,72 дБ соответственно для квадратного и круглого раскрывов, но все равно превышает УБЛ эквидистантной ИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация приемных цифровых антенных решеток / В.В. Задорожный [и др.] // Антенны. 2012. № 9. С. 24–31.
2. Planar Thinned Arrays: Optimization and Subarray Based Adaptive Processing / P. Lombardo [et al.] // Int. Journal of Antennas and Propagation. Vol. 2013, pp. 1–13.
3. Задорожный В.В., Стрельченко Л.И., Стрельченко С.А. Метод синтеза разреженной излучающей системы АФАР с заданным коэффициентом заполнения на основе генетического алгоритма // Общие вопросы радиоэлектроники. 2018. Вып. 1. С. 42–49.
4. Touya T., Auroux D. Control and topological optimization of a large multibeamarray antenna // Proceedings of Antennas Radar and Wave Propagation, 2008.
5. Large multibeam array antennas with reduced number of active chains / G. Caille [et al.] // The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007, pp. 1–9.
6. Pantz O. Topological Gradient. January 28, 2015, pp. 1–10. URL: http://www.pdf.semanticscholar.org/f362_свободный, загл. с экрана, яз. англ.