

Кластеризованные и разреженные антенные решетки с электронным сканированием. Особенности проектирования и разработки.

В.В. Демшевский¹, С.С. Сидоренко¹, Г.С. Аникин^{1,2}

¹АО НПП «Исток «им. Шокина»

²Московский авиационный институт

Аннотация: в статье приведен аналитический обзор и рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей проектирования разреженных и кластеризованных АР, а также показано их принципиальное отличие.

Ключевые слова: АФАР, разреженная антенная решетка, кластеризованная антенная решетка, коэффициент усиления, углы электронного сканирования.

1. Введение

Говоря об антенных решетках (АР), мы представляем их планарными с периодическим расположением элементов по обеим строительным осям на плоскости. Это не обязательное условие для их существования, но оно упрощает понимание вопроса и описывает большинство примеров, наиболее часто встречающихся на практике (Рис.1), а именно: АР с прямоугольной и треугольной (гексагональной) сетками. Треугольное или гексагональное расположение элементов в АР обычно рассматривается как суперпозиция двух смещенных прямоугольных решеток.

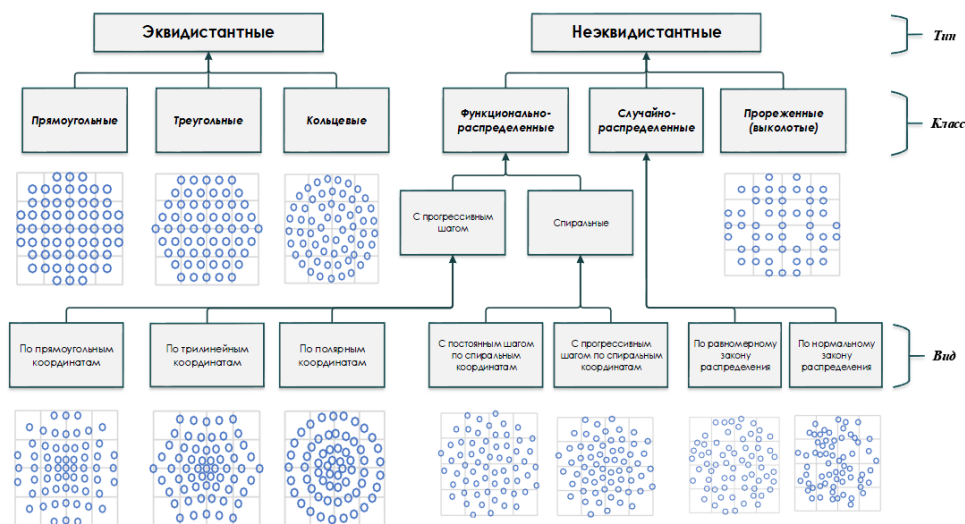


Рисунок 1 – Классификация расположения элементов в АР

Говоря об активных фазированных антенных решетках (АФАР) число дискретных элементов (количество отдельных каналов) определяет не только их возможности, но и стоимость. Теоретически, к каждому излучателю в АФАР должен быть подключен свой приемо-передающий модуль (ППМ), имеющий фазовращатель и аттенуатор. Но с экономической точки зрения, стоимость такой системы будет однозначно высокой. Поэтому разработчиками проводится большое количество исследований направленных на поиск способов уменьшения количества элементов в АФАР.

Существует и другая практическая причина, уменьшения количества ППМ в составе АФАР – это уменьшение количества, соединителей, кабелей, жгутов и шин управления, т.е. упрощение изделия.

Разреженные АР представляют собой ФАР с уменьшенным количеством элементов в сравнении с исходными регулярными АР, но при этом сохраняют основные характеристики, такие как ширина основного луча, УБЛ или углы электронного отклонения луча.

Способ разрежения АР определяется исходя из поставленной задачи и функционального назначения системы (навигация, связь, пеленгация и др.) с целью обеспечения собираемости изделия и сокращения времени разработки за счет исключения использования алгоритма случайного перебора. В работе [1] приведена классификация АР по способу их разрежения.

Одним из способов разрежения АР является т.н. кластеризация антенного полотна - объединение дискретных элементов АР в группы с помощью делителя/сумматора, имеющего один выход, к которому будет подключен ППМ. Другими словами, установка фазы и амплитуды будет проводиться не для каждого дискретного излучателя в АР, а для группы излучателей.

2. Обзор примеров и особенностей проектирования разреженных и кластеризованных АР

По проблеме кластеризации и разрежения АР имеется большое количество публикаций в открытой научно-технической литературе, но решения описаны в основном для случаев многоэлементных АР больших электрических размеров, имеющих 400 и более дискретных элементов. Так в работе [3] рассмотрена возможность кластеризации регулярной многоэлементной антенной решетки из 351-го элемента с гексагональной сеткой для вариантов 7-ми элементного и 4-элементного кластеров и амплитудным распределением «косинус на пьедестале» с пьедесталом 0.5.

В работе [4] рассмотрен пример линейной кластеризации антенной решетки в одной из плоскостей с целью упрощения системы и минимизации количества отдельных приемно-передающих блоков.

В работах [5-6] рассмотрен способ разбиения антенного полотна на кластеры, представляющие из себя плитки домино на основе схемной оптимизации и на основе оптимизации методом Парето.

Таким образом в работах показана и численно подтверждена методика проектирования плоских фазированных антенных решеток, состоящих из полных и нерегулярных вертикальных (σV) и горизонтальных (σH) кластеров в форме домино.

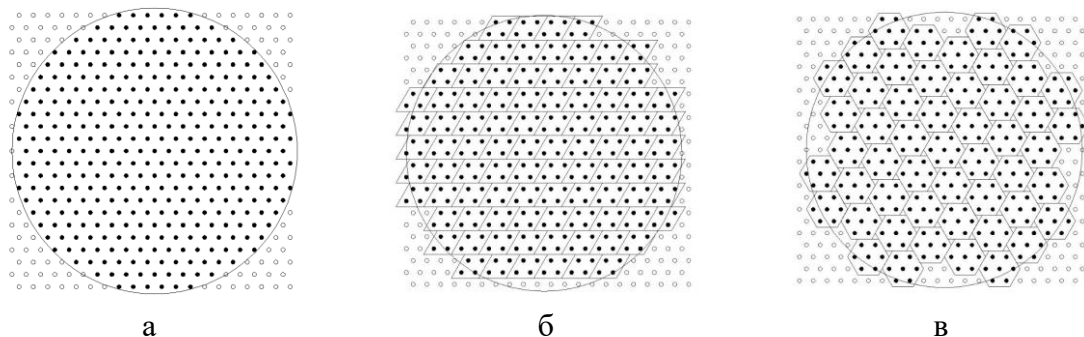


Рисунок 2 – Антенная решетка: регулярная с дискретными элементами а); кластеризованная, с размерностью кластера 4 элемента б); кластеризованная, с размерностью кластера 7 элементов в)

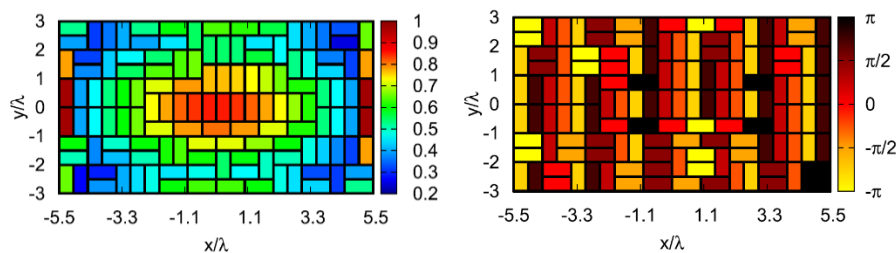


Рисунок 3 – Численное моделирование характеристик кластеризованной AP на основе домино, амплитудное и фазовое распределение

В работе [7] приведен всесторонний обзор направлений использования разреженных AP, в том числе и для задач пеленгации, а также проведено сравнение эффективности их применения. Авторами была разработана экспериментальная платформа, на которой был проведен анализ и сравнение характеристик разреженных и регулярных линейных AP.

В работе [8] рассматриваются разреженные AP со случайным расположением элементов. Разреженные AP со случайным размещением элементов были получены авторами из эквидистантных решеток путем удаления части излучателей по случайному равномерному закону.

Несмотря на большое количество статей проблеме кластеризации и разрежения AP не приводится их прямое сравнение, и они рассматриваются как совершенно разные виды.

3. Расчет и сравнение характеристик разреженной и кластеризованной AP

Используя алгоритм X, методом одноэтапной кластеризации мы синтезировали разреженную и кластеризованную AP, которые показаны на Рис.4 Синими точками обозначены положения дискретных элементов в разреженной и соответствующей ей кластеризованной AP. Обе AP имеют одинаковое количество каналов (выходов). В реальной схеме парные элементы в кластеризованной AP соединены через сумматор.

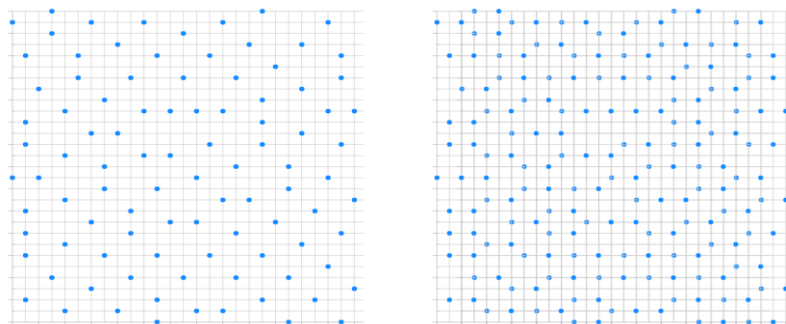


Рисунок 4 – Расположение элементов в разреженной и кластеризованной AP, где разреженная AP а); кластеризованная, AP б).

На Рис.5 приведено сравнение ДН, полученных по результатам электродинамических расчетов электронного отклонения луча в E- и H-плоскостях для разреженной и кластеризованной AP, приведенных на Рис.4, построенных на основе исходной двумерной регулярной AP с прямоугольной сеткой 14x15 элементов.

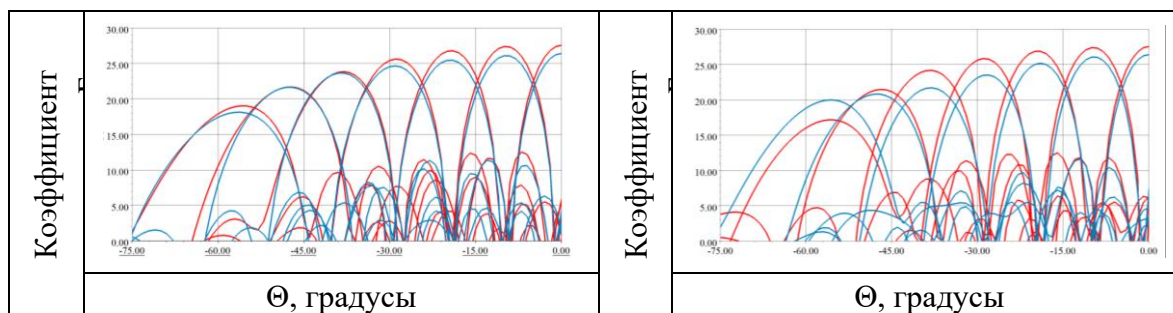


Рисунок 5 – Сравнение КУ кластеризованной и разреженной АР при электронном отклонении луча в Е и Н-плоскости (красный цвет – кластеризованная АР; синий цвет – разреженная АР)

Сравнение КУ кластеризованной и разреженной АР приведены в Таблице 1. Видно, что КУ кластеризованной АР в нормальном положении и при электронном отклонении луча до 30° в среднем на 1.5-2 дБ больше чем КУ разреженной АР, что объясняется большим (фактически в 2 раза) коэффициентом используемой поверхности (КИП) АР, но ограничивается потерями при делении мощности сигнала в нижнем слое кластера. При этом из приведенных графиков ДН также видно, что на углах электронного отклонения луча, КУ АР могут быть равны или вовсе, КУ разреженной АР может превышать КУ кластеризованной АР. Связано это с тем, что несмотря на большой КУ у кластеризованной АР за счет большего КИП, ДН отдельных кластеров и сочетаний кластеров в одной из плоскостей могут быть уже, что в конечном счете приводит к некоторому снижению эффективности излучения в заданных направлениях в составе полноразмерной АР, сокращает углы электронного сканирования и приводит к резкому падению КУ на углах электронного отклонения луча, близких к предельным.

Элементы в разреженных АР, напротив, имеют практически идентичные ДН во всех плоскостях, что при электронном отклонении луча с увеличением угла отклонения от нормали, ведет к более плавному снижению КУ.

Таблица 1. Электронное отклонение луча в Е и Н-плоскости

$\Theta, ^\circ$	Кластеризованная АР (Е)	Разреженная АР (Е)	Кластеризованная АР (Н)	Разреженная АР (Н)
0	27.57 дБ	26.36 дБ	27.57 дБ	26.36 дБ
10	27.4 дБ	25.88 дБ	27.39 дБ	26.21 дБ
20	26.79 дБ	24.81 дБ	26.87 дБ	25.38 дБ
30	25.62 дБ	23.95 дБ	25.84 дБ	24.61 дБ
40	23.84 дБ	22.18 дБ	24.17 дБ	23.8 дБ
50	21.69 дБ	21.41 дБ	21.48 дБ	21.75 дБ
60	19.03 дБ	20.43 дБ	17.18 дБ	17.8 дБ

Выводы

Отвечая на вопрос, чем состоит принципиальное отличие кластеризованной и разреженной АР, мы пришли к определенным выводам. Так как отдельные кластеры состоят из нескольких дискретных излучателей, соединенных между собой сумматором и имеют один общий выход, то они по сути представляют собой компактные АР, которые имеют свой фазовый центр и кластеризованную АР в этом случае можно считать разреженной, но построенной на основе нескольких типов различных сложных излучателей, работающих в одном частотном диапазоне при этом допустима замена кластеров в кластеризованной АР на одиночные элементы, что в конечном счете позволит обеспечить больший КУ, чем в разреженной АР, но при этом

меньшее снижение КУ для кластеризованной АР при больших углах электронного отклонения луча от нормали.

Список литературы

1. Дубовицкий М. А. // Многокритериальная оптимизация протяженных широкополосных антенных решеток // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Москва – 2023
2. Антенны с электрическим сканированием //О.Г. Вендик, М.Д. Парнес под редакцией Л.Д. Бахраха 2001г.
3. (Магистерская диссертация «Разработка рекомендаций по проектированию антенной системы для аэрологических исследований атмосферы», Трифонов Д.А., УрФУ им.первого президента РФ Б.Н. Ельцина, ИРИТ, Екатеринбург 2020г.)
4. (Hemprasad Ghanta, Srinivasa P, Dr. Beena Mole KS and Sreenivasulu K// A Realizable Active Array Antenna Configuration For Fighter Aircraft Having Decent Radar Performance//11th International Radar Symposium India - 2017 (IRSI-17))
5. Nicola Anselmi, Paolo Rocca, Marco Salucci and Andrea Massa//Irregular Phased Array Tiling by Means of Analytic Schemata-Driven Optimization// IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 65, NO. 9, SEPTEMBER 2017
6. Paolo Rocca, Nicola Anselmi, Alessandro Polo and Andrea Massa // Pareto-Optimal Domino-Tiling of Orthogonal Polygon Phased Arrays// IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 70, NO. 5, MAY 2022
7. Osama Ahmed Elkasraw, Amr Mohamed Abdelaziz, Hossam El-Din Abou Bakr, Mohamed Atta Aboelazm4 // Comparative Analysis and Practical Implementation of Sparse Arrays vs. Uniform Linear Arrays for Angle of Arrival Estimation Precision // Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing ©2023 ISSN 2073-4212 Ubiquitous International Volume 14, Number 4, 2023
8. О.А. Юрцев, И.Ф. Шаляпин // Сканирование в разреженной антенной решетке со случайным расположением излучателей в апертуре // Доклады БГУИР, №8(94) 2015 г.