

Исследование особых точек алгоритмов цифрового адаптивного диаграммоформирования

Н. Б. Насекина, М.В. Никитин

Московский физико-технический институт (государственный университет)
ПАО «Радиофизика»

Введение

Одной из задач, возникающих в современной радиолокации, является построение РЛС, позволяющих осуществлять обзор пространства с одновременным подавлением помех. Решить эту задачу можно применением алгоритмов цифрового адаптивного диаграммоформирования. Наиболее эффективным при этом является построение цифровой АФАР с полностью цифровым формированием диаграмм направленности, но данное решение является очень дорогостоящим и его использование целесообразно в редких случаях. В настоящее время, среди систем с цифровым формированием диаграмм направленности, получили широкое распространение системы с комбинированным аналого-цифровым формированием диаграмм направленности, которые позволяют совместить преимущества цифрового и адаптивного диаграммоформирования. Обеспечивается это делением АФАР на подрешётки. Диаграмма направленности с каждой из подрешёток будет сформирована аналоговым способом, а итоговая диаграмма направленности - цифровым способом. Таким образом, алгоритмы адаптивного диаграммоформирования будут применяться не к каждому элементу ФАР, а к целым подрешёткам, что позволит уменьшить количество аппаратных ресурсов, необходимых для реализации системы, но вызовет проблемы с диаграммой направленности множителя антенной решётки, в том числе появление особых точек, в которых алгоритм не может корректно обрабатывать данные. При задании таких точек в качестве помех, в области главного максимума появляется провал.

В настоящей работе исследуется проблема появления особых точек алгоритмов цифрового адаптивного диаграммоформирования при делении АФАР на подрешётки с аналоговым диаграммоформированием внутри подрешёток.

В работе рассмотрена проблема появления особых точек алгоритмов адаптивного диаграммоформирования, описан принцип работы адаптивных алгоритмов, приведены причины существования особых точек и рассмотрены возможные способы решения проблем, связанных с существованием особых точек.

Адаптивное диаграммоформирование.

Адаптивное диаграммоформирование – способ диаграммоформирования, позволяющий улучшить выходное соотношение сигнал/(помеха+шум), посредством перераспределения поля на антенной решётке, т.е. с помощью создания провалов в направлении на помеху. В отличие от обычной антенной решётки, решётка с адаптивным диаграммоформированием осуществляет оценку направления появляющихся помех для создания провала в заданных направлениях. Для этого к обучающему пакету и направляющему вектору применяют один из алгоритмов оценки весовых коэффициентов. [1]

На вход алгоритму подаются обучающий пакет X и управляющий вектор S . Обучающий пакет состоит из N обучающих векторов $X_1 - X_N$, задающих направление на помеху. [1] Векторы $X_1 - X_N$ состоят из элементов $\{X_k^1 \dots X_k^N\}$, которые рассчитываются по следующей формуле:

$$X_k^i = \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot j \cdot (x(i) \cdot u_n + y(i) \cdot v_n)\right) \cdot \cos \frac{2\pi k f_0}{f_d} + 0,001 \cdot \eta_k^i$$

Здесь:

k – номер вектора;

i – номер подрешётки;

N - количество подрешёток;

λ – длина принимаемых волн;

j – мнимая единица;

$x(i), y(i)$ - координаты центра;

u_n, v_n – направление на помеху в биконической системе координат;

f_D – частота дискретизации;

f_0 – частота помехи (после фильтрации);

элементы η_k^i образуют вектор-столбец $\{\eta_k^1 \dots \eta_k^n\}$ из N элементов, содержащий белый комплексный гауссовский шум с мощностью 0 дБ.

Управляющий вектор состоит из элементов $\{S_1 \dots S_N\}$, которые рассчитывается по формуле

$$S_i = \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot j \cdot (x(i) \cdot u_0 + y(i) \cdot v_0)\right),$$

где u_0, v_0 – направление на максимум диаграммы направленности, а остальные обозначения совпадают с обозначениями предыдущей формулы.

Применение одного из алгоритмов оценки весовых коэффициентов к обучающему пакету и управляющему вектору позволяет получить вектор весовых коэффициентов W . Итоговая диаграмма направленности выражается формулой $y = W^H X$. Здесь X - столбец принятых элементами решётки сигналов.

В данном исследовании рассматривались следующие алгоритмы цифрового адаптивного диаграммоформирования:

- Алгоритм прямого обращения корреляционной матрицы;
- Алгоритм, использующий модифицированный алгоритм Грама – Шмидта;
- Алгоритм, использующий модифицированный алгоритм Грама – Шмидта с нормализацией вне цикла;
- Алгоритм с рекуррентной оценкой коэффициента регуляризации;
- Проекционный алгоритм.

Особые точки.

Деление ФАР на аналоговые подрешётки при комбинированном аналого-цифровом адаптивном диаграммоформировании приводит к появлению особых точек в обозреваемом пространстве. Попытка задать помеху в этих точках приводит к появлению провала в направлении главного максимума ДН. Появление особых точек напрямую связано с диаграммой направленности множителя решётки, состоящей из подрешёток. Именно множитель решётки является функцией,

задающей направление на помеху. Если подать два различных максимума ДН множителя на вход алгоритма (один в качестве обучающего вектора, другой – в качестве управляющего), будет получен провал в направлении главного максимума итоговой ДН, что очевидно.

Описанные выше способы задания обучающего пакета и управляющего вектора не учитывают ДН подрешётки, однако учёт ДН не позволит решить проблему, т.к. обучающий пакет в случае использования подрешёток содержит существенно более короткие векторы, чем в случае полного цифрового диаграммоформирования, а значит на вход алгоритму не подаётся достаточное кол-во информации о решётке.

Существует два варианта решения проблемы особых точек. Первый - сместить максимум так, чтобы необходимое направление попадало в луч на уровне -3 дБ. Второй - сместить все помехи на фиксированное значение, а затем механически повернуть решётку на это же значение так, чтобы точка, в которой мы будем формировать максимум, попадала в область -3дБ диаграммы направленности.

На практике оба варианта оказываются невозможными. Если сместить главный максимум, не смещая направление на провал, то в той точке, где мы хотим сформировать максимум, будет образовываться только более глубокий провал, т.к. вектор, задававший особую точку, остался неизменным, следовательно, остальные направления, задаваемые этим вектором, останутся неизменны.

Смещение трёх провалов также не позволяет решить проблему. Если мы сместим наше направление на помеху так, чтобы оно было близко к границе трёхдецибелльной области соответствующего максимума ДН множителя решётки, то и провал, оказывавшийся в направлении главного максимума, сместится ровно на то же расстояние. Главный максимум при этом тоже сместится по очевидным соображениям. Поворот решётки в направлении, противоположном смещению провалов, позволит вернуть провалы в те точки пространства, где они должны быть на самом деле, но в направлении, где должен быть главный максимум, мы получим не ожидаемые -3 дБ, а гораздо меньшее значение. Таким образом, проблему невозможно решить, не изменив либо направление главного максимума (т.е. проводя сканирование в другой точке), либо направление на помеху (но тогда помеха может влиять на результаты).

С учётом вышеизложенной проблемы, проектирование адаптивных радиолокационных систем требует учёта существования особых областей, если планируется разделение решётки на подрешётки.

Для определения количества максимумов по одному из направлений можно воспользоваться простой формулой, полученной из основных соотношений для антенных решёток:

$$N_{max} = \text{round} \left(\frac{d}{\lambda} \right) \cdot 2 + 1.$$

Здесь $\text{round}(\)$ означает округление содержимого скобок, d – расстояние между центрами подрешёток. Количество максимумов по одному из угловых направлений строго зависит от расстояния между центрами подрешёток в этом направлении, а значит для определения полного количества максимумов множителя решётки достаточно посчитать, сколько будет максимумов по каждому из двух направлений, и перемножить результаты. Расстояние между центрами подрешёток обратно пропорционально количеству подрешёток в этом направлении, а значит количество особых областей, приблизительно можно считать обратно пропорциональным общему количеству подрешёток. В таблице 1 приведены данные, показывающие количество особых областей решётки в зависимости от количества подрешёток и элементов в подрешётке с учётом расположения подрешёток и элементов по горизонтали и вертикали.

Таблица 1. Количество особых областей в обозреваемом пространстве в зависимости от количества подрешёток. В скобках указано число элементов в подрешётке в соответствующем направлении.

ряды \ столбцы	2 (48)	4 (24)	8 (12)	16 (6)	32 (3)
2 (32)	2535	1287	663	351	195
4 (16)	1235	627	323	171	95
8 (8)	585	297	153	81	45
16 (4)	325	165	85	45	25
32 (2)	195	99	51	27	15

На рис. 1 и 2 приведены графики зависимости количества особых областей от количества элементов в подрешётке по горизонтали и по вертикали.

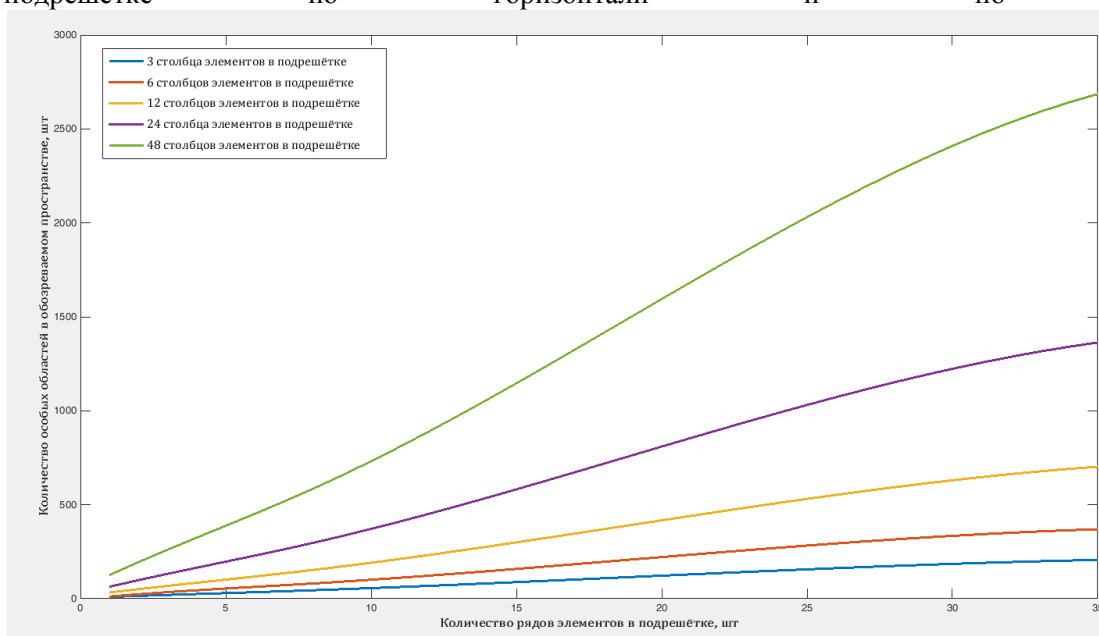


Рис.1. Зависимость кол-ва особых областей от числа элементов в подрешётке по вертикали

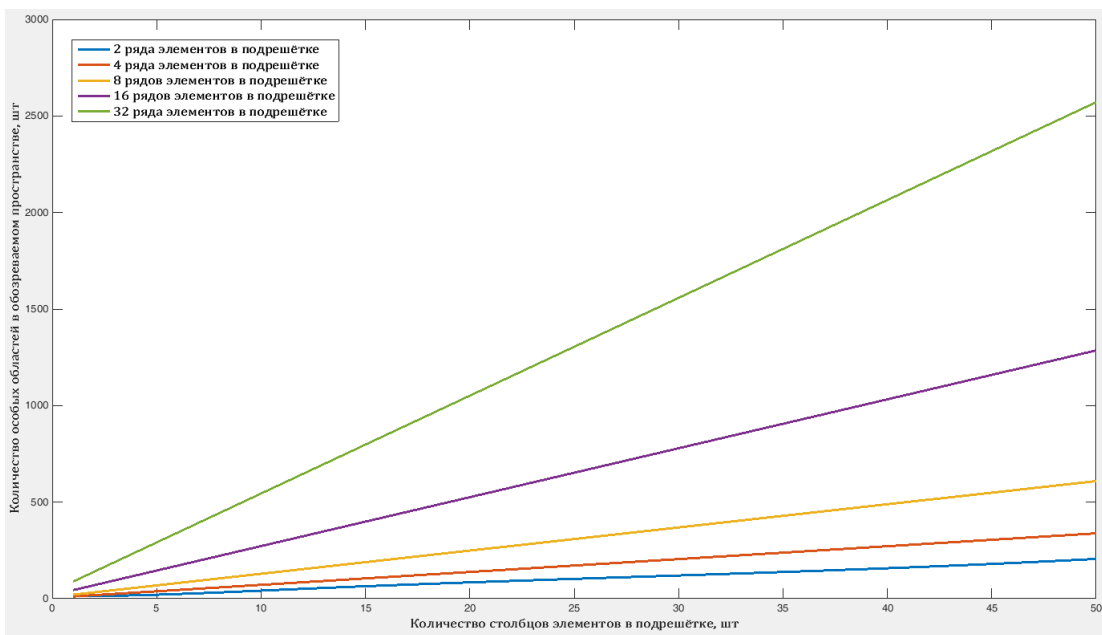


Рис.2. Зависимость кол-ва особых областей от числа элементов в подрешётке по горизонтали

Выбор количества подрешёток надо осуществлять исходя из отношения стоимости и простоты реализации системы к количеству получаемых особых областей и качеству обработки данных. При этом необходимо учитывать возможное различие в длине сторон АФАР, т.к. при разном количестве элементов в АФАР по вертикали и по горизонтали, количество особых областей по этим направлениям при одинаковом количестве подрешёток будет различным.

Заключение

Особые области АФАР при аналого-цифровом адаптивном диаграммоформировании являются максимумами диаграммы направленности множителя решётки. Это явление является очевидным, однако требует учёта при проектировании АФАР. На данный момент способов борьбы с этим явлением без изменения конструкции решётки не обнаружено

Литература

1. *Рытязский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
2. *Robert A. Monzingo, Thomas W. Miller,* Introduction to adaptive arrays. New York: SciTech Publishing, 2004. 552 p.