

Сравнение алгоритмов синтеза диаграмм направленности малоэлементных ФАР

С.В. Кузьмин, К.О. Коровин, А.Н. Космынин

СПбГУТ

Аннотация: В статье представлена методика синтеза диаграмм направленности малоэлементных антенных решеток при наличии дифракционных максимумов, основанная на последовательном применении оптимизационного алгоритма с использованием генетического алгоритма и усовершенствованного прямого алгоритма с использованием разложения в ряд Котельникова и приведены результаты работы указанной методики.

Ключевые слова: ФАР, синтез ДН, генетический алгоритм, адаптация

Антенные решётки стали доминирующим типом антенн для специальных применений, где без них невозможно построить современные быстродействующие системы с пространственно-временной обработкой сигналов. Традиционно, военные системы дали толчок для развития элементной базы, которая стала достаточно дешёвой и доступной для применения в гражданской продукции. В результате антенные решётки стали доминировать и в гражданском секторе.

Основные преимущества антенных решёток связаны с возможностью формирования ДН специальной формы и адаптации антенной системы под различные задачи, для чего необходимо сформировать некоторое амплитудно-фазовое распределение (АФР) на входах излучателей, т. е. решить задачу синтеза ДН, которая и по сей день остаётся актуальной (см., например, [1]).

Антенные решетки, состоящие из сотен или тысяч элементарных излучателей дороги и, зачастую, избыточны. Кроме того, пока трудно говорить о большом количестве цифровых каналов, хотя ЦАФАР и является наиболее гибким и перспективным инструментом. Существуют массо-габаритные ограничения, например, малый беспилотный аппарат не может нести на борту многоэлементную ФАР. Поэтому сосредоточимся на рассмотрении ФАР с количеством элементов не более 16. Для таких малоэлементных ФАР стремятся максимизировать коэффициент усиления, для чего увеличивают расстояние между элементами, которые могут быть подрешётками. Это приводит к формированию интерференционных максимумов, влияние которых стараются компенсировать суженной ДН излучателя, несомненно, в ущерб сектору сканирования. При решении задачи синтеза ДН для малоэлементных решёток с дифракционными максимумами появляются дополнительные трудности.

Существуют два основных вида алгоритмов поиска необходимого АФР для синтеза ДН заданной формы - оптимизационные и прямые. Оптимизационные методы приближают ДН к заданной итерационно. Прямые методы позволяют найти АФР в результате решения уравнения. К сожалению, оба подхода имеют ряд многократно описанных в литературе недостатков и не позволяют сформулировать единую методику поиска АФР. В данной работе приведены результаты практического применения оптимизационного алгоритма на основе генетического алгоритма из [2] и развит подход, предложенный в [3] и [4].

Перед тем как описать особенности применения указанных алгоритмов отметим, что использование радиотехнических методов, хорошо описанное в [5] и [6], а именно аппарата рядов Фурье, не позволяет решать задачи синтеза, поскольку в результате

обратного преобразования существенные для формирования ДН значения АФР получаются в узлах, которые выходят за границы антенной решётки. Для решения задачи анализа ряд Фурье подходит с двух точек зрения. Во-первых, поскольку множитель решётки является преобразованием Фурье, то мы можем существенно ускорить вычисление ДН по известному АФР за счёт применения алгоритма БПФ. Во-вторых, при наличии дифракционных максимумов, синтез осуществляется только в той области, в которой существует ряд Фурье. ДН вне этой области повторяет структуру основной ДН и, в основном, определяется ДН излучателя.

Первое обстоятельство, использование БПФ, существенно ускоряет применение оптимизационных методов. В частности, именно так формируются ДН на каждой итерации в алгоритме из [2]. Особенностью было то, что приведённый в [2] алгоритм не учитывал длину волны и шаг решётки, поэтому в него был добавлен соответствующий масштабный сдвиг по углу:

$$\sin \vartheta_s = \frac{\lambda * (1 - u)}{f_s * d} - \frac{\lambda * (1 - u_{cp})}{f_s * d},$$

где ϑ_s – угловая координата, зависящая от длины волны λ и шага решётки d ;

f_s – частота дискретизации;

$u = 1, 2, 3 \dots f_s$ – обобщённая координата.

Ряд особенностей был выявлен при написании программы по алгоритму, рекомендованному в [3], несомненным достоинством которого является приведённая на стр. 44 процедура, указывающая на то, что нужно вычитать именно коэффициенты разложения, а не диаграммы направленности. Но, к сожалению, при малом количестве излучателей и расстоянии между ними, когда начинают появляться дифракционные максимумы алгоритм работал неудовлетворительно. Поэтому было введено дополнение – пределы интегрирования брались из ДН, полученной при помощи БПФ. Стоит отметить, что алгоритм из [3] имеет несколько большую функциональность, чем заявлено в названии – он позволяет установить любое значение ДН, а не только сформировать ноль. Для этого нужно брать соответствующий уровень вспомогательной ДН, который после вычитания из основной ДН, даст желаемое значение. Последовательное, многократное, применение усовершенствованного алгоритма позволяет не только формировать несколько нулей, но и синтезировать требуемую ДН, превращая алгоритм в оптимизационный.

Далее будут приведены примеры последовательного применения оптимизационного алгоритма и нескольких итераций усовершенствованного прямого алгоритма. При этом полученная в ходе работы оптимизационного алгоритма ДН становится исходной для прямого и может быть отредактирована. Указанный сценарий работы предполагается использовать в ближайшем будущем во встроенном рабочем программном обеспечении радиотехнических систем. Необходимые для формирования ДН специальной формы АФР будут находиться заранее при помощи медленного оптимизационного алгоритма, а быстрый прямой алгоритм будет применён при адаптации.

Рассмотрим линейную эквидистантную решётку из 16 излучателей, расположенных на расстоянии 72.0 мм при рабочей частоте 5.5 ГГц.

На рисунке 1 показаны сходимость Генетического алгоритма, АФР, огибающая (квазикосеканс), полученная ДН (с использованием БПФ) и время работы алгоритма на персональном компьютере. На рисунке 2 представлена ДН, полученная методом суммирования с учётом полученного АФР. Данная ДН является множителем решетки, учет ДН излучателя существенно снизит дифракционные максимумы.

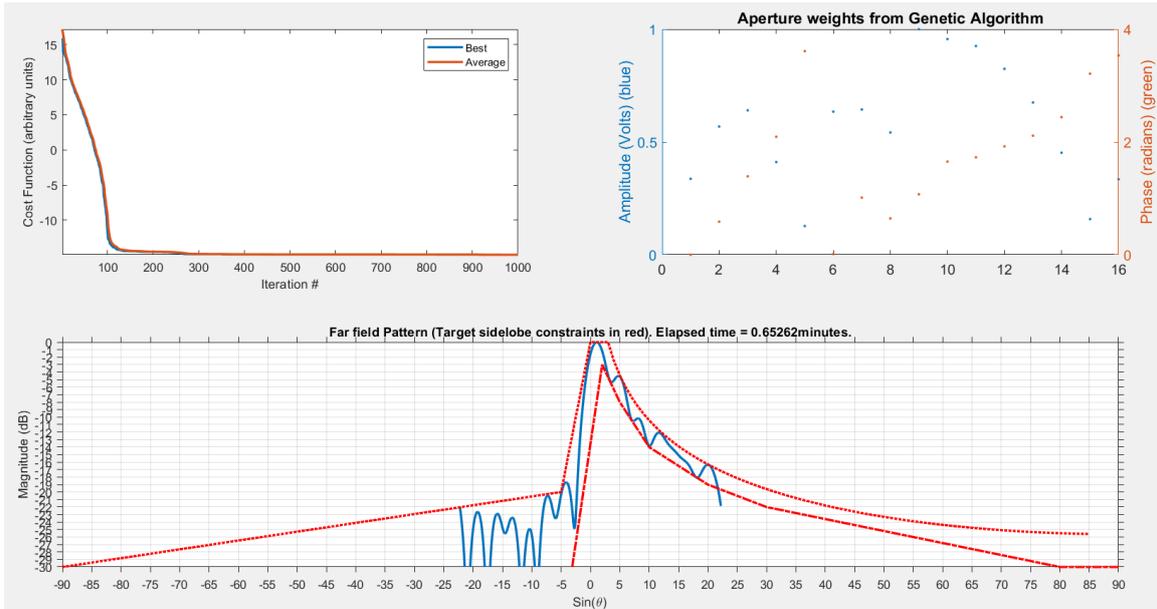


Рисунок 1. Результаты работы оптимизационного алгоритма

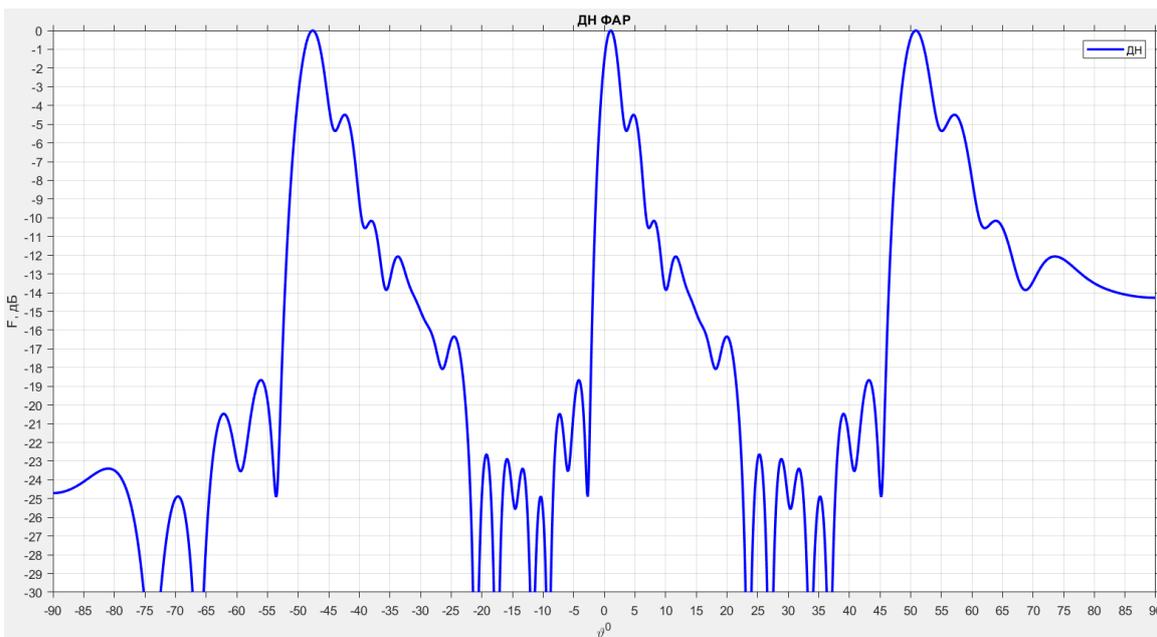


Рисунок 2. ДН антенны при суммировании полей излучателей

Теперь полученное АФР сохраним как исходное и дважды применим усовершенствованный прямой алгоритм. В первый раз изменим значение на 10 градусах с минус 14 дБ на минус 9 дБ. Результат приведён на рисунке 3.

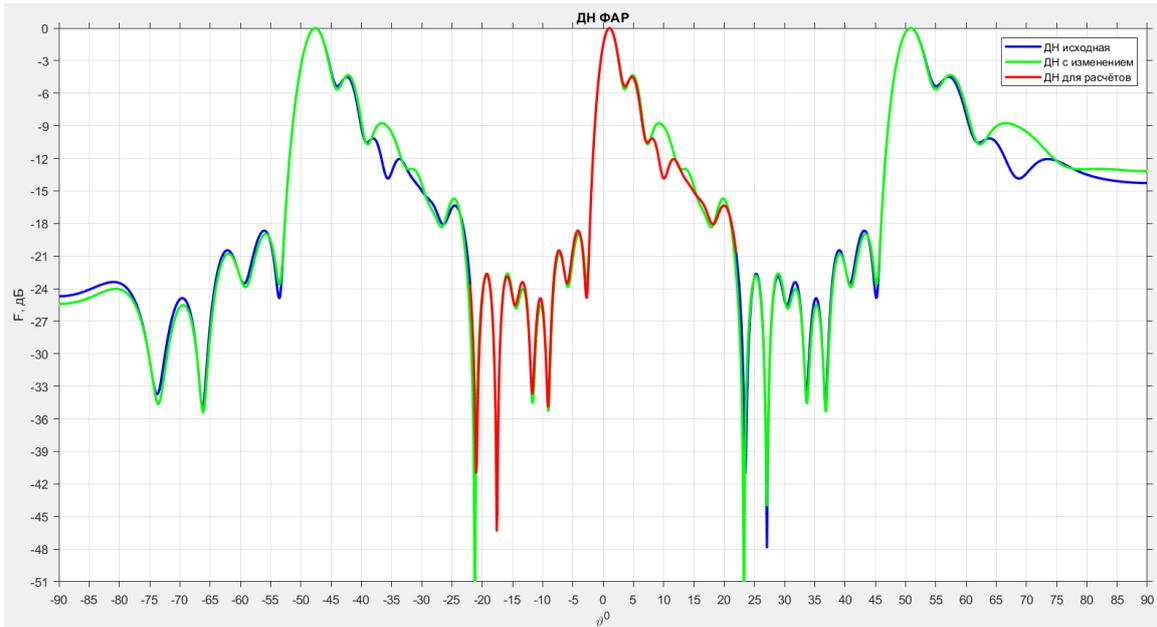


Рисунок 3. Применение усовершенствованного прямого алгоритма (первая итерация)

Во второй раз получим глубокий ноль в направлении -7.4 градуса, что представлено на рисунке 4. На рисунке 5 показано итоговое АФР.

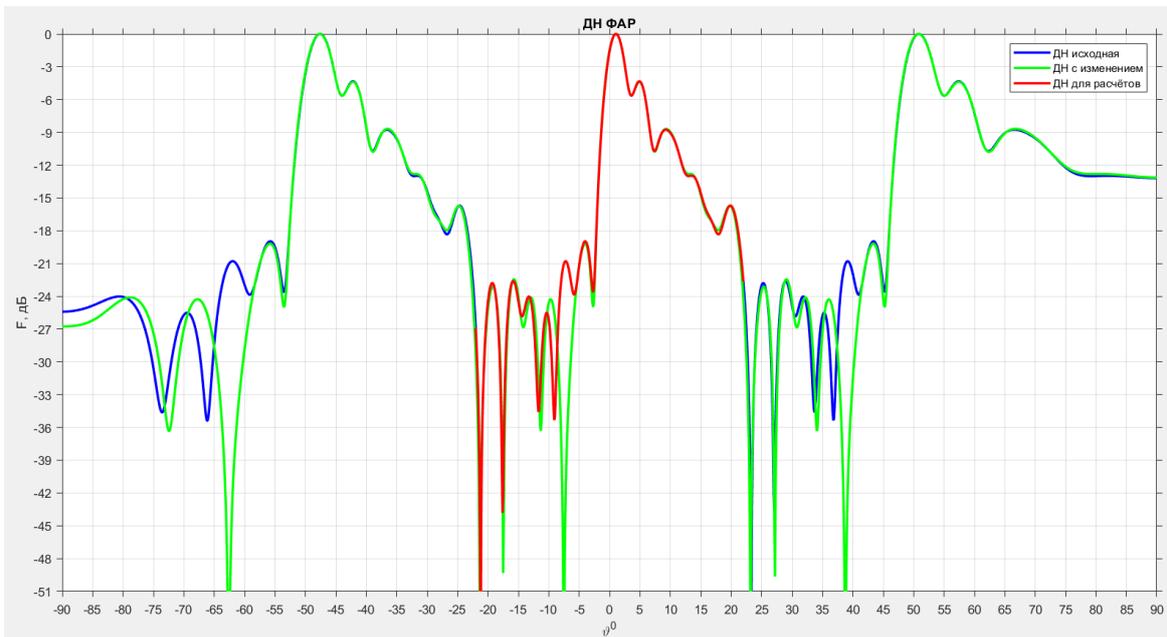


Рисунок 4. Применение усовершенствованного прямого алгоритма (вторая итерация)

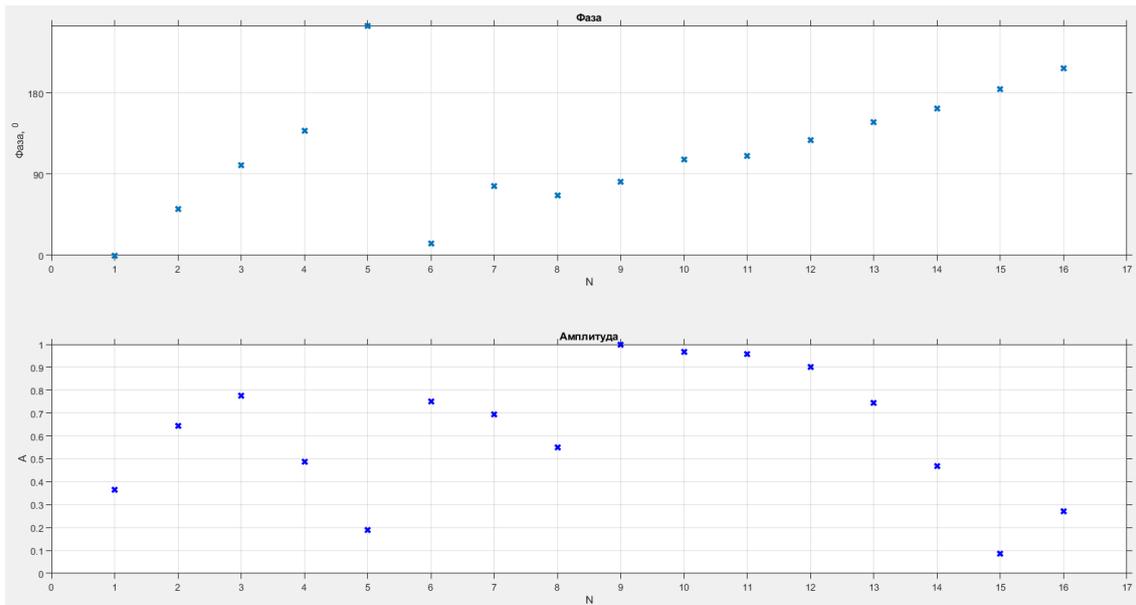


Рисунок 5. АФР, полученное в результате решения задачи синтеза

Представленные результаты показывают, что рассмотренные алгоритмы синтеза дополняют друг друга и могут быть рекомендованы для применения при первоначальной настройке радиотехнических систем с антенными решётками, а усовершенствованный прямой алгоритм может встраиваться в программное обеспечение аппаратуры с целью увеличения эффективности и скорости работы алгоритмов адаптации.

Список литературы

1. Туральчук, П. А. Расширение главного луча решетки Дольфа - Чебышева с использованием разложения по функциям Котельникова / П. А. Туральчук, О. Г. Вендик, И. Б. Вендик // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — 2018. — № 1 (1) — с. 213-216.
2. Brown, A. D. Electronically Scanned Arrays: MATLAB Modeling and Simulation / A. D. Brown. — CRC Press, 2012.
3. Козлов, Д. С. Интерференционное формирование диаграммы направленности фазированной антенной решетки с подавлением излучения в заданном направлении с учетом взаимного влияния излучателей. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Д. С. Козлов. — СПб., 2016.
4. Зелкин, Е. Г. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. Кн. 1. / Е. Г. Зелкин, В. Ф. Кравченко. — М.: ИПРЖР, 2002. — 72 с.
5. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки. Второе издание / Р. С. Хансен. — М.: Техносфера, 2012. — 560 с.
6. Drabowitch, S. Modern Antennas 2nd ed. / S. Drabowitch, A. Papiernik, J. Encinas, B. L. Smith. — Springer, 2005.