

Коррекция аппаратных амплитудно-фазовых искажений в фазированных антенных решетках*

М.А. Димов¹, С.Э. Шипилов¹, И.С. Цепляев¹, А. Зеар¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Описан алгоритм повышения точности синтеза диаграммы направленности фазированных антенных решеток путем коррекции аппаратных искажений управляющих элементов. Продемонстрировано, что цифровые аттенюаторы и фазовращатели при каскадном включении вносят значительные погрешности, в частности, фазовый сдвиг до 60° , не связанный с работой фазовращателя. Предложенный метод компенсации основан на использовании расчетной калибровочной таблицы, сформированной по результатам измерений. Вместо независимого подбора управляющих кодов алгоритм осуществляет поиск их оптимальной пары, минимизирующей ошибку для амплитудно-фазового распределения. Эффективность подхода подтверждена электродинамическим моделированием. Показано, что предложенная коррекция позволяет снизить максимальный уровень боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности на 3.4 дБ, что представляет практический интерес для проектирования антенных систем.

Ключевые слова: *фазированная антенная решетка, амплитудно-фазовое распределение, электродинамическое моделирование, фазовращатели, аттенюаторы.*

Введение

Фазированные антенные решетки (ФАР) широко востребованы в радиосвязи и радиолокации. Перспективным направлением использования ФАР является их интеграция в беспилотные летательные аппараты (БПЛА), где в условиях ограниченных размеров и веса они предлагают возможность электронного управления лучом, что особенно ценно в ситуациях, когда механическое сканирование антенны затруднительно или нежелательно. Методы расчета амплитудно-фазового распределения (АФР) определяют конфигурацию и возможности ФАР, что делает актуальным поиск и совершенствование таких методов. Формирование многолучевых диаграмм направленности (ДН) – перспективное направление применения ФАР [1–4]. Существуют различные методы расчета АФР для ФАР, отличающиеся реализацией и возможностями формирования ДН или распределения поля. Например, в [5] предложен полуаналитический метод для фокусировки в ближней зоне, где амплитудное распределение оптимизируется для снижения боковых лепестков. В [6] генетический алгоритм синтезирует ДН с узким лучом и низкими боковыми лепестками, но сложен в реализации и не гарантирует оптимальность. Аналитический метод [7] подавляет боковые лепестки линейной ФАР, требуя задания как амплитудного, так и фазового распределения. В [8] использование нечетных функций позиций элементов позволяет синтезировать асимметричные ДН с пониженными боковыми лепестками. В [9] сверточные нейронные сети применяются для фокусировки излучения, компенсируя «неидеальность» ФАР, однако, как и генетические алгоритмы, не гарантируют оптимального решения и сложны в реализации.

Для решения задачи синтеза АФР в данной работе используется метод наименьших квадратов (МНК) [10], позволяющий получить аналитическое решение и его численное приближение для оптимального амплитудно-фазового распределения при заданной ДН. Переход от теоретического расчета к практической реализации всегда сопряжен с аппаратными ограничениями. Во-первых, реальные управляющие элементы – цифровые аттенюаторы [11] и фазовращатели [12] – являются дискретными, что вносит погрешность квантования при аппроксимации заданного АФР. Во-вторых, что более критично, эти элементы вносят взаимные искажения, а именно: изменение управляющего кода фазовращателя влияет на амплитуду проходящего сигнала, а изменение кода аттенюатора – на фазу сигнала. Традиционные подходы к реализации АФР, как правило, корректируют амплитуду и фазу независимо, игнорируя это взаимное влияние, что приводит к существенному расхождению синтезированной ДН и расчетной. Подходы к коррекции подобных перекрестных искажений также разрабатываются в современных исследованиях по ФАР [13].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).