

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета»
Минск, Республика Беларусь*

Эффективное решение существующих и перспективных задач, стоящих перед современной радиолокацией как гражданского, так и военного назначения, возможно только с использованием активных фазированных антенных решеток (АФАР), работающих в многолучевом режиме с электронным сканированием диаграммы направленности (ДН). Последнее достигается формированием в каждый момент времени в излучающем раскрытии определенного вида амплитудно – фазового распределения (АФР), обеспечивающего необходимые амплитудное распределение и наклон фазового фронта. При этом накладываются дополнительные требования на сохранение формы ДН, высокого коэффициента усиления антенны, незначительного роста боковых лепестков, что обеспечивает помехоустойчивость системы в целом. Таким образом, все основные функциональные параметры РЛС определяются законом формирования АФР, погрешностями установки амплитуды и фазы на каждом элементе АФАР, динамическими параметрами изменения АФР. Поэтому разработка алгоритмов, методов измерения измерительных комплексов для прямых измерений АФР на некоторой поверхности, в непосредственной близости от раскрытия является актуальной.

Как правило, конструктивно АФАР представляют собой двумерную решетку, в узлах которой располагаются излучающие антенные элементы, каждый из которых подключен к приемно-передающему модулю (ППМ), причем расстояние между антенными элементами по двум координатам в апертуре раскрытия должно составлять половину длины наиболее короткой волны в рабочем диапазоне частот. Это условие обеспечивает высокие технические характеристики АФАР в целом и накладывает жесткие ограничения на габариты каждого одноканального модуля.

В настоящее время оптимальной и наиболее перспективной конструкции ППМ сантиметрового диапазона длин волн, удовлетворяющей в том числе и стоимостным требованиям, выбрана следующая: многоканальный ППМ, комплексированный с печатными антенными элементами. Указанная конструкция является универсальной и может использоваться как для аналоговых АФАР с формированием амплитудно – фазового распределения (АФР) в апертуре с использованием управляемых аттенуаторов и фазовращате-

лей, так и для цифровых решеток (АЦАР) с прямым цифровым синтезом АФР.

Наиболее распространенными являются четырех и восьми канальные ППМ, хорошо укладываемые в двумерную двоичную матрицу. В качестве антенных элементов используются различные типы печатных антенн. Такие антенны имеют малые габариты, конструктивно и технологически хорошо согласуются с конструкцией и технологией изготовления СВЧ печатных плат модулей. Кроме того, изготовление таких антенн фотолитографическим способом гарантирует максимально высокую повторяемость конфигурации антенн, а, значит, и их электромагнитных характеристик. Несмотря на то, что современные пакеты программ позволяют с высокой степенью достоверности рассчитывать пространственные характеристики излучения как отдельно взятых печатных антенн, так и с учетом их взаимного влияния в двумерной антенной решетке, а также ППМ в целом, при разработке и оптимизации АФАР необходим этап физического моделирования, в том числе и печатных антенн, что предполагает их изготовление и измерение их пространственных характеристик (диаграмм направленности ДН, коэффициента усиления КУ и др.).

Таким образом, на всех этапах разработки и создания АФАР, а также в процессе эксплуатации необходимо проведение измерений основных характеристик как изделия в целом, так и отдельных элементов. Наиболее полную информацию об указанных характеристиках дают измерения в ближней зоне, достоверность и эффективность которых в значительной степени зависят от выбора поверхности измерения. Поскольку используемые антенные элементы, а также отдельные приемно-передающие модули (в том числе с числом каналов не более 8) являются слабонаправленными, наиболее рационально производить измерения на сферической поверхности, охватывающей антенну. Однако, в отличие от восстановления характеристик по измерениям на планарной и цилиндрической поверхностях, где используются эффективные алгоритмы БПФ, обработка результатов измерения на сферической поверхности требует традиционного интегрирования с привлечением присоединенных функций Лежандра и сферических функций Хамкеля.

Решение уравнения Максвелла в сферической системе координат для комплексных амплитуд тангенциальных составляющих вектора электрического поля позволяет представить электромагнитное поле $\vec{E}_\tau(\theta, \varphi, r)$ на поверхности сферы радиуса r , охватывающей излучающую систему в виде разложения φ по векторным сферическим функциям (гармоникам) [1]:

$$\vec{E}_\tau(\theta, \varphi, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^{+n} A_{mn} \cdot \vec{M}_{mn} + B_{mn} \cdot \vec{N}_{mn}$$

Векторные сферические функции $\vec{M}_{mn}, \vec{N}_{mn}$ и комплексные коэффициенты A_{mn}, B_{mn} выражаются через полиномы Лежандра $P_n^m(\theta)$, сферические функции Ханкеля $Z_n(kz)$ и тангенциальные составляющие вектора E на сферической поверхности радиуса r_0 (r_0 -радиус сферы, на которой производится измерение) [2]. Число N определяется радиусом минимальной сферы, охватывающей измеряемый объект. Тангенциальные составляющие поля E_φ, E_θ на сфере любого радиуса (как больше, так и меньше r_0) рассчитываются по формулам, содержащим Фурье преобразование по координате φ . В тоже время полиномы Лежандра $P_n^m(\cos\theta)$ можно представить в виде конечного ряда Фурье:

$$P_n^m(\cos\theta) = \frac{(2n)!}{2^n n! (n-m)!} e^{-j\frac{\pi}{2}m} \sum_{k=0}^n C_k^{mn} e^{j(n-2k)\theta},$$

где C_k^{mn} - постоянные коэффициенты, являющиеся результатом алгебраических процедур.

Таким образом, интегрирование по координате θ также сводится к преобразованию Фурье, что позволяет использовать при расчетах тангенциальных составляющих поля на поверхности произвольного радиуса эффективный алгоритм БПФ.

Разработанное на основании представленного алгоритма программное обеспечение позволяет, используя результаты измерений на сферической поверхности радиуса r_0 , рассчитывать поле в векторном виде на сферической поверхности произвольного радиуса R . При $R \gg \lambda$ амплитуда рассчитанного поля определяет пространственную диаграмму направленности исследуемого объекта. Восстановление амплитудно-фазового распределения на сфере минимального радиуса позволяет проводить дефектоскопию антенных элементов путем сравнения теоретических расчетов с результатами обработки экспериментальных данных, оптимизировать конструкцию отдельного антенного элемента и линейки антенных элементов, учитывать влияние конструктивных элементов модуля, а при наличии защитных покрытий (панелей, укрытий, обтекателей) определить степень их влияния, однородность характеристик, провести их дефектоскопию (дефектоскопия материала, накопления влаги и др.).

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн.- М.-1978.
2. Арфкен Г. Математические методы в физике.-М.-1970.

УДК 621.382

МЕТОДИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ РАСТЕКАНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Бумай Ю.А.¹, Васьков О.С.¹, Кононенко В.К.¹, Нисс В.С.¹, Керенцев А.Ф.², Петлицкий А.Н.², Рубцевич И.И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО Интеграл

Минск, Республика Беларусь

1 Методика исследования профилей растекания теплового потока

Детальные исследования тепловых характеристик полупроводниковых приборов проведены методом тепловой дифференциальной релаксационной спектрометрии ТРДС, хорошо зарекомендовавшим себя при анализе тепловых параметров внутренних элементов гетеролазеров, светодиодов и транзисторов [1].

Релаксационный метод основан на анализе переходных электрических процессов, связанных с разогревом полупроводникового прибора проходящим через него током. Из временной зави-

симости температуры перехода при нагреве прямым током находятся дискретный и дифференциальный спектры теплового сопротивления R_{th} прибора, значения тепловой емкости C_{th} и постоянной времени тепловой релаксации τ . Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауера. Два вида спектров (непрерывной и дискретный) теплового сопротивления используются для анализа и уточнения компонентов теплового сопротивления в рамках электротепловой модели Фостера