

**Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.396.67

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН. ПРАКТИЧЕСКАЯ
РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**

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

Основной характеристикой антенны, как излучающего и приемного устройства, является диаграмма направленности (ДН), определяющая структуру поля излучения антенны на значительном (по отношению к электрическим размерам излучающей апертуры антенны) расстоянии от антенны – в дальней зоне. Физический смысл понятия дальней зоны состоит в том, что исследуемая антенна находится в поле плоской волны. В зависимости от способа формирования такой плоской волны различают два основных метода измерения ДН: измерения в дальней зоне и измерения в ближней зоне.

Измерения в дальней зоне являются прямым методом, достаточно просты, не требуют сложной аппаратуры, однако обладают рядом недостатков:

- значительные расстояния между исследуемой и зондовой антенной, что предполагает проведение измерений вне помещений;
- существенное влияние окружающих предметов и подстилающей поверхности;
- зависимость от погодных условий;
- невозможность обеспечения скрытности измерений;
- невозможность измерения пространственной ДН (как правило, измеряют некоторые сечения).

Измерения в ближней зоне свободны от этих недостатков. Методологической основой этих измерений является создание на небольшом расстоянии от исследуемой антенны некоего излучателя, формирующего в раскрыве антенны плоскую волну. Это возможно двумя путями:

- формирование участка плоского фронта с помощью специальной антенны – коллиматора (коллиматорный метод);
- синтезирование участка плоского фронта за счет последовательного помещения слабонаправленной антенны в узловые точки, расположенные на некоторой поверхности вблизи исследуемой антенны и измерения амплитуды и фазы поля излучения в этих точках. Полученная информация обрабатывается и путем математических расчетов вычисляются требуемые характеристики (радиологический метод).

Общие преимущества ближнезонных измерений заключаются в том, что измерения проводятся в помещении на небольших расстояниях. Для минимизации побочных воздействий и обеспечения скрытности измерений исследуемая антенна и измерительная аппаратура располагаются в безэхо-

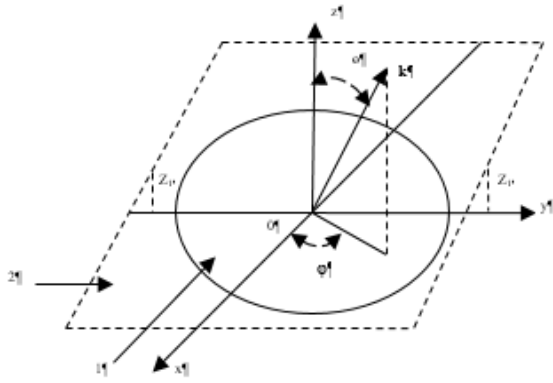
вых камерах, представляющих собой экранированные помещения, все поверхности которых покрыты радиопоглощающим материалом.

Коллиматорный метод по сути аналогичен прямым измерениям в дальней зоне и позволяет измерять основные сечения ДН. Заметим также, что коллиматорный метод в последнее время получил достаточно широкое распространение, поскольку позволяет проводить измерения параметров радиолокационной заметности различных объектов, вплоть до реальных образцов. Основным недостатком коллиматорного метода является высокая стоимость оборудования, в первую очередь самого коллиматора.

С точки зрения антенных измерений наиболее универсальным является **радиологический** метод, основой которого являются прямые измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля исследуемой антенны на некоторой поверхности в непосредственной близости от излучающей апертуры. Так как интенсивность поля излучения антенной системы и его структура на различных расстояниях от излучающей апертуры однозначно математически связаны, то по измеренному полю на некотором расстоянии возможно расчетным путем восстановить структуру поля на любом расстоянии от антенны. На значительном расстоянии от антенны (в дальней зоне) структура поля определяет диаграмму направленности. Теоретические основы такого методологического подхода заложены в классических работах по электродинамике и теории антенн [1], а их практическое приложение непосредственно к антенным измерениям началось в конце прошлого века [2,3]. Теоретически было показано, что измерения поля излучения антенн в ближней зоне возможно на некоторой поверхности вблизи апертуры исследуемой антенны. Для плоской, цилиндрической и сферической поверхности были предложены уравнения, связывающие структуру полей в ближней и дальней зонах. При этом выбор той или иной поверхности определялся конструкцией антенны и структурой поля излучения.

Планарные измерения в ближней зоне

Введем декартову систему координат $Oxuz$. Исследуемая антенна находится в плоскости $z = 0$ (1), а плоскость измерения 2 расположена параллельно исследуемой антенне на некоторой высоте Z_1 . Измерения и расчеты определяют поле в верхней полусфере $z > 0$.



Определим волновой вектор k :

$$k = i_x k_x + i_y k_y + i_z k_z,$$

где i_x, i_y, i_z – орты декартовой системы координат.

Также определим сферическую систему координат, в которой угол φ (азимутальный угол) – угол между осью x и проекцией волнового вектора k на измеряемую поверхность, угол θ (угол места) – угол между осью z вектором k . Тогда

$$k_x = k \sin\theta \cos\varphi; \quad k_y = k \sin\theta \sin\varphi; \quad k_z = k \cos\theta.$$

Компоненты вектора E в дальней зоне могут быть представлены в виде [1]:

$$E_\theta(k_x, k_y) = A \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} S_x(k_x, k_y);$$

$$E_\varphi(k_x, k_y) = A \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} S_y(k_x, k_y);$$

$$A = je^{jkR}/\lambda R.$$

Функции $S_{x,y}(k_x, k_y)$ определяются выражением:

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} E_{xy}(x, y) \cdot e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

где $E_{x,y}(x, y)$ – тангенциальные составляющие вектора электрического поля, измеренного на плоскости [4]. В случае, если измеряемое поле излучения линейно поляризовано, ориентацией системы координат возможно одну из составляющих E_x или E_y сделать равной нулю.

Для выполнения измерений в ближней зоне радиолокационным методом необходимы механические сканирующие устройства, обеспечивающие перемещение зондовой антенны по выбранной поверхности, измерительный приемник для измерения амплитуды и фазы СВЧ поля в заданных точках указанной поверхности, обеспечивающий необходимый динамический диапазон и требуемые точности измерений в заданном частотном диапазоне, контроллер ввода цифровых данных в компьютер и программное обеспечение для проведения математических расчетов, визуализации и хранения результатов.

В настоящее время ведущие фирмы, такие как Agilent, Keysight, NSI-MI, Franconia, ORBIT/FR разрабатывают измерительные комплексы и их компоненты для измерения и тестирования антенных систем, методики их применения, а также регулярно проводят семинары по антенным измерениям. Аналогичная ситуация сложилась и в России. Несколько фирм (в частности ООО «Научно-производственное предприятие ТРИМ»), компания «РАДИОЛАЙН») предлагают метрологически аттестованные измерительные комплексы для измерений в ближней зоне, реализующие коллиматорный и радиолокационный методы. Комплексы обеспечивают высокие метрологические характеристики, позволяющие измерять характеристики реальных объектов, однако имеют весьма высокую стоимость.

В [5] изложена концепция построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне. В рамках представленной концепции в лаборатории прикладной электродинамики НИИ ПФП реализован экспериментальный образец аппаратно – программного комплекса для измерений в X-диапазоне радиолокационным методом по плоскости. Проведенное тестирование показало, что комплекс имеет удовлетворительные точностные характеристики. С использованием экспериментального образца измерительного комплекса проведены измерения АФР и восстановления пространственных ДН нескольких типов антенн: измерительной антенны П6-23 и моноимпульсных антенн различных конструкций. Полученные результаты позволили оценить влияние параметров зонда и дискретов выборок на точность восстановления диаграмм. Проведены сравнения восстановленных ДН с результатами измерений в дальней зоне, которые показали хорошее совпадение.

1. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л., 1967. – 518 с.
2. Захарьев, Л.Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, В.И. Турчин, Н.М. Цейтлин – М., 1985. – 368 с.
3. Бахрах, Л.Д. Методы измерения излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин. – Л., 1985. – 272 с.
4. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений / А.П. Курочкин // Антенны. – 2009. – № 7. – С. 39–45.
5. Будаи, А.Г. Разработка концепции построения аппаратно – программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будаи, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – №2. – С 151–158.