УДК 621.396

В. А. УСИН, канд. техн. наук, *С. В. КИРИЛЛОВ, Н. А. ШВЕДОВА*

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН

Известные методы измерения диаграмм направленности (ДН) антенн в дальней зоне обладают рядом недостатков. Так, наземные методы, методы облета, радиоастрономические методы (особенно методы облета) являются неоперативными, сложными в организации и малоинформативными.

Свободны от перечисленных недостатков методы измерения параметров антенн в ближней зоне [1]. Они основаны на измерении амплитуды и фазы электромагнитного поля исследуемой антенны на некоторой замкнутой поверхности, охватывающей антенну, и последующем пересчете измеренного поля в дальнюю зону.

На практике ближнее поле антенн обычно измеряют на плоской, цилиндрической или сферической поверхности, что определяется условиями измерений, наличием механизмов перемещения СВЧ-зонда, видом аппаратуры измерения, обработки и др. В большинстве созданных измерительных комплексов ближнее поле определяют на плоской поверхности. Такие комплексы чаще всего стационарные, их подвижные варианты позволяют определять

характеристики небольших по геометрическим размерам антенн. Это связано со сложностью и громоздкостью устройства сканирования СВЧ-зонда. В результате подобные измерительные комплексы практически невозможно применять для определения ДН и оперативной оценки технического состояния крупногабаритных антенн в процессе эксплуатации.

При измерении параметров антенн, установленных на азимутальном поворотном устройстве (а именно такими являются антенны ряда радиотехнических систем, в частности РЛС управле-

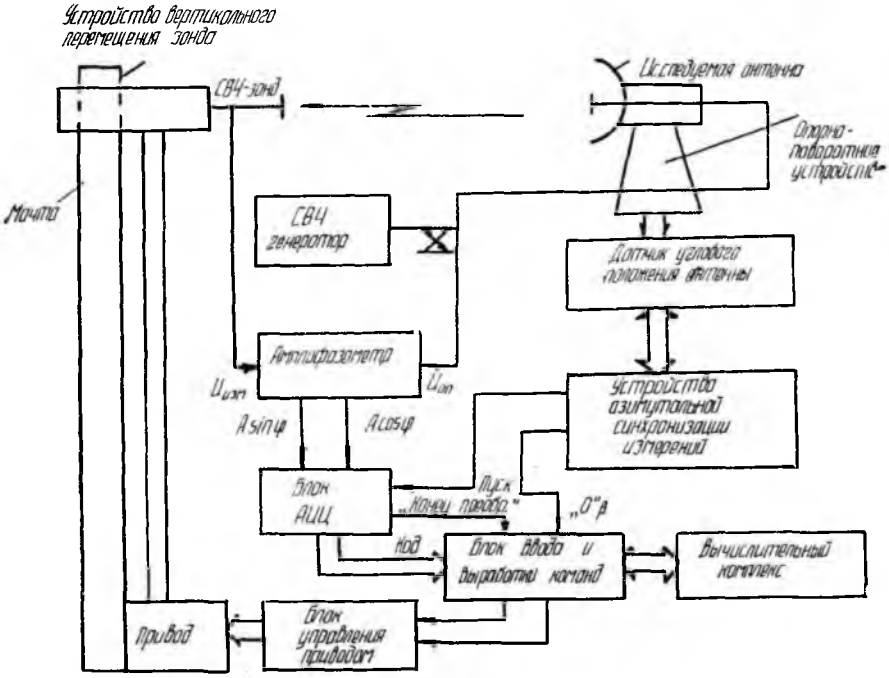

Рис. 1

ния воздушным движением, метеорологических радиолокаторов), наиболее естественно и удобно в качестве поверхности измерений выбрать цилиндрическую поверхность, когда ось цилиндра совпадает с осью азимутального вращения антенны. При этом можно использовать простое сканирующее устройство, обеспечивающее перемещение СВЧ-зонда лишь по одной координате — высоте.

Основным препятствием при практической реализации измерений на цилиндрической поверхности является относительная сложность алгоритмов пересчета ближнего поля в дальнюю зону. Если ограничить область восстановления ДН главным лепестком и ближайшими к нему боковыми лепестками, представляющими наибольший практический интерес, то обработку результатов измерений можно выполнить оперативно, используя микроЭВМ.

Для оперативного определения параметров антенн, установленных на азимутальных поворотных устройствах, разработан и построен подвижный автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий определять основные характеристики антенн с электрическими размерами до 30λ. Комплекс, функциональная схема которого представлена на рис. 1, состоит из устройства вертикального перемещения СВЧ-зонда, разворачиваемого в непосредственной близости от антенной системы и аппаратной части, размещенной в кабине на шасси грузового автомобиля. Аппаратура комплекса включает в себя устройство азимутальной синхронизации измерений (УАСИ), устройство управления приводом вертикального сканера, амплифазометр, аналого-цифровые преобразователи, вычислительный комплекс и аппаратуру связи микроЭВМ с элементами измерительного комплекса. Измерение ближнего поля производится следующим образом.

Сигнал от СВЧ-генератора, входящего в состав амплифазометра, подается на вход исследуемой антенны. Принятый зондом сигнал поступает на вход амплифазометра, с выхода которого напряжения, пропорциональные амплифазным компонентам ближнего поля, поступают на входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Преобразование измеренных значений поля выполняется в процессе азимутального вращения по сигналам, вырабатываемым УАСИ через каждые 10θ′ поворота антенны. Цифровые коды измеренных значений поля заносятся в память микроЭВМ. По окончании одного «кольца» измерений, которое осуществляется за один полный оборот антенны, измерения прерываются и микроЭВМ подает команду на перемещение зонда. Шаг перемещения обычно составляет λ/2. По прекращении перемещения зонда процесс измерений повторяется. Командой для возобновления измерений служит сигнал «ноль азимута», вырабатываемый УАСИ. Требуемое число «колец» измерений задается оператором в процессе начального диалога с ЭВМ. Число «колец» выбирается исходя из условия обеспечения необходимой вертикальной зоны измерений и связано с требуемым сектором восстановления ДН по углу места. После измерений микроЭВМ переходит к обработке информации.

Составляющие электрического поля антенны в дальней зоне находят из выражений [1]

$$E_{\theta(\varphi)}(\theta, \varphi) = \sin\theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} (j)^n \frac{a_{1(2)n}(h)}{H_n^{(2)}(\Lambda r_0)} e^{jn\varphi}, \qquad (1)$$

где $H_n^{(2)}(\Lambda, r_0)$ — функция Ханкеля второго рода порядка n;

$$h = k\cos\theta, \ \Lambda = \sqrt{k^2 - h^2} \text{ для } h \leqslant k;$$

$$\Lambda = -j\sqrt{h^2 - k^2} \text{ для } h > k, \ k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$a_{1n}(h) = \int_{-\pi}^{\pi} d\psi \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z,\psi)\, e^{-jn\psi} e^{jhz}\, dz; \qquad (2)$$

$$a_{2n}(h) = j \int_{-\pi}^{\pi} d\psi \int_{-\infty}^{\infty} E_\psi(z, \psi)\, e^{-jn\psi} e^{jhz}\, dz; \qquad (3)$$

$E_{z(\varphi)}(z, \psi)$ — измеренные компоненты ближнего поля антенны на цилиндрической поверхности радиуса r_0. Выражения (1) записаны с точностью до постоянного множителя.

Пределы суммирования в (1) ограничены величинами $\pm (N_0/2) = (2\pi/\lambda)\, a$, где a — наименьший радиус цилиндра, полностью охватывающего антенну с учетом ее размещения относительно поверхности измерений [2].

Реализация алгоритма (1) в микроЭВМ встречает ряд трудностей, которые связаны с малым объемом ОЗУ современных микроЭВМ и необходимостью вычисления функций Ханкеля для произвольных и достаточно больших значений n, kr_0.

В целях уменьшения размерности преобразуемых массивов ДН вычисляется по «прореженному» ряду [1]

$$E_{\theta,(\varphi)}(\theta, \varphi) = \sin\theta \sum_{p=-p_0}^{p_0} (j)^{n_p} \frac{a_{1(2)n_p}(h)}{H^{(2)}_{n_p}(\Lambda r_0)} e^{jn_p\varphi}, \qquad (4)$$

где $p_0 = [N_0/2\Delta] + 1$; $[F]$ — целая часть числа F.

Коэффициенты $a_{1(2)n_p}$ вычисляются по соотношениям (2), (3), в которых в качестве входных данных используются значения функций

$$w_{z(\psi)}(z, \psi) = \sum_{t=0}^{\Delta-1} E_{z(\psi)}\left(z, \frac{\psi + 2\pi t}{\Delta}\right). \qquad (5)$$

При использовании выражения (4) размерность преобразуемых массивов уменьшается в Δ раз, но сектор восстановления ДН также уменьшается в Δ раз и составляет $2\pi/\Delta$.

Алгоритм (1) представим в виде

$$E_{\theta(\varphi)}(\theta, \varphi) = \sin\theta \int_{-\pi}^{\pi} K_\theta(\varphi - \psi)\, E^h_{1(2)}(\psi)\, d\psi, \qquad (6)$$

где

$$E^h_1(\psi) = \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z, \psi)\, e^{jhz}\, dz; \qquad (7)$$

$$E^h_2(\psi) = j \int_{-\infty}^{\infty} E_\psi(z, \psi)\, e^{jhz}\, dz; \qquad (8)$$

$$K_\theta(\psi - \varphi) = K_\theta(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (j)^n e^{jn\tau} / [H^{(2)}_n(\Lambda r_0)]. \qquad (9)$$

Аналогичное представление возможно и для алгоритма (4).

Согласно выражению (6) ДН антенны рассматриваем как результат прохождения входного сигнала $E^{h}_{1(2)}(\psi)$ через фильтр с импульсной характеристикой $K\theta(\tau)$. Импульсную характеристику фильтра $K\theta(\tau)$ для конкретных условий эксперимента можно вычислить заранее на производительных ЭВМ и записать в память микроЭВМ. При этом общее время вычисления ДН существенно уменьшается. Алгоритм (6) реализован в программном обеспечении комплекса при $\Delta = 12$. Выбор такого значения Δ позволил при сравнительно малом объеме памяти микроЭВМ (32 Кбайт) обеспечить обработку ближнего поля антенны, измеренного на цилиндрической поверхности в приемлемое (порядка 30 мин) время.

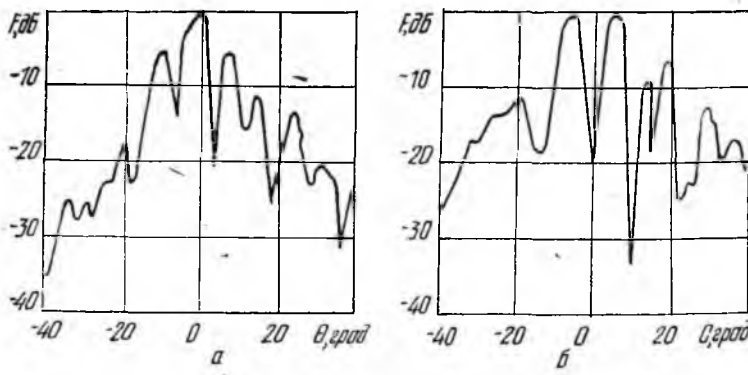

Рис. 2

Для оценки возможностей измерительного комплекса были проведены измерения ДН антенны, состоящей из двух одинаковых веркал размером $14\lambda \times 7\lambda$. Зеркала антенны представляют собой симметричные вырезки из параболоидов вращения, размещены в вертикальной плоскости и могут быть запитаны синфазно и противофазно. В процессе эксперимента были измерены ДН отдельных секций антенны, ДН всей антенны в различных режимах работы на основной и кроссполяризационной компонентах. В целях проверки повторяемости результатов и оценки случайных погрешностей восстановления ДН измерения проводилось многократно. Разброс отдельных реализаций ДН от среднего значения не превышал 1 дБ на уровне — 20 дБ. Графики реализаций ДН в вертикальной плоскости в свободном пространстве на основной поляризации представлены на рис. 2. Здесь показана нормированная диаграмма направленности исследуемой антенны при синфазной (рис. 2,*а*) и противофазной (рис. 2,*б*) запитке зеркал антенны. Результаты испытаний показали хорошее совпадение измеренных параметров ДН антенны с данными измерений, полученными другими методами.

Таким образом, описанную схему построения измерительной аппаратуры и предложенный алгоритм обработки результатов измерений можно использовать при создании аналогичных автоматизированных измерительных комплексов, предназначенных для оперативного определения характеристик антенн и объективного контроля их технического состояния в процессе эксплуатации.

Список литературы: 1. *Методы* измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин и др.— Л. : Наука, 1985.— 272 С. 2. *Усин В. А., Шведова Н. А.* О требуемой дискретности измерений ближнего поля антенн на цилиндрической поверхности // Радиотехника.— 1983.— Вып. 68.— С. 91—95.

Поступила в редколлегию 11.05.86