

9. Р а д ц и г Ю.Ю. О решении задачи реализации амплитудно-фазовых распределений поля в криволинейных щелевых излучателях. " Вопросы радиоэлектроники", Вып. 12, сер. ОТ, 1969, с. 19-21.

Г.Б. Косвинцев, О.Н. Добронравов, А.Н. Журавлев

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ
КОМПОНЕНТ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ АНТЕНН

При разработке, изготовлении и настройке антенн одной из наиболее трудоемких операций является снятие диаграмм направленности, требуются специальные помещения (безэховые камеры) и высокочувствительная аппаратура. Однако, используя известную зависимость поля в дальней зоне от распределения ближнего поля антенны, диаграмму направленности можно получить расчетным путем по результатам измерений в ближнем поле антенны. Измерения проще и дешевле производить в ближней зоне, так как при этом не требуются дорогостоящие безэховые камеры и аппаратура высокой чувствительности. Знание структуры ближнего поля антенн также существенно облегчает решение ряда задач синтеза излучающих систем и коррекции диаграмм направленности.

В настоящее время широко применяются методы измерения распределений составляющих ближнего поля при помощи зондов, в качестве которых обычно используется либо электрически малая антенна, либо малое металлическое (или диэлектрическое) возмущающее тело, - это метод активного зондирования, при котором измерительный прибор подключается к зонду посредством соединительной линии, метод рассеяния или пассивного зондирования.

Рассмотрим металлические зонды, для простоты считая их идеально проводящими. Внесение в поле антенны измерительного зонда с соединительной линией приводит к искажению этого поля. Как известно, при наличии в поле падающей волны возмущающего тела (препятствия) полное поле определяется как геометрическая сумма падающего и рассеянного полей [1]:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 + \vec{E}_{S3} + \vec{E}_{SA}; \\ \vec{H} &= \vec{H}_0 + \vec{H}_{S3} + \vec{H}_{SA}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{E}_0, \vec{H}_0 - первичное (невозмущенное) поле; $\vec{E}_{S3}, \vec{H}_{S3}$ - электрическая и магнитная компоненты поля, рассеянного зондом; $\vec{E}_{SA}, \vec{H}_{SA}$ - электрическая и магнитная компоненты поля, рассеянного соединительной линией.

Очевидно, что токи, наводимые в зонде и определяющие сигнал, измеряемый прибором, обуславливаются полным полем \vec{E}, \vec{H} . Поэтому измерительный прибор фиксирует распределение искаженного \vec{E}, \vec{H} , а не первичного \vec{E}_0, \vec{H}_0 поля. Таким образом, наличие рассеянного поля в случае активного зондирования является одним из важнейших факторов, определяющих точность измерений, так как, если поле $\vec{E}_{s3}, \vec{H}_{s3}$ в принципе можно учесть (или пренебречь им при малых размерах зонда), то поле $\vec{E}_{sA}, \vec{H}_{sA}$ трудно оценить точно.

При измерении поля пассивным зондом отсутствует линия, соединяющая зонд с измерительным прибором; сигнал, несущий информацию о распределении поля, снимается непосредственно с фидера антенны. При этом полное поле

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{s3};$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_{s3}.$$

При отсутствии зонда полное поле $\vec{E} = \vec{E}_0$; $\vec{H} = \vec{H}_0$ и, если система "фидер-антенна" настроена на режим бегущей волны, то сигнал на входе измерительного прибора будет равен нулю. Если зонд внести в поле антенны, то возникает рассеянное поле, часть энергии которого принимается антенной, вследствие чего на входе измерительного прибора появляется сигнал U_3 - отклик зонда. При этом, в силу известных граничных условий, имеет место зависимость $U_3^e(\epsilon_0), U_3^m(H_0)$, где U_3^e - отклик зонда при измерении электрической компоненты поля; U_3^m - отклик при измерении магнитной компоненты. Так как в этом случае измерительный прибор индицирует сигнал, вызываемый только рассеянным полем $\vec{E}_{s3}, \vec{H}_{s3}$, то при пассивном зондировании оно является не источником погрешности, а носителем информации о первичном поле. Таким образом, задача измерения амплитудно-фазового распределения компонент поля заключается в измерении зависимости U_3 от координат зонда и в установлении соотношений:

$$U_3^e(\epsilon_0); U_3^m(H_0). \quad (2)$$

Высокая точность измерений, которая может быть получена при использовании метода пассивного зондирования, подтверждается исследованиями, проведенными рядом авторов. Так, в работе [2] приводятся результаты исследований амплитудного распределения ближнего поля волноводно-целевых излучателей короткими ($L_3/\lambda \ll 1,0$) пассивными зондами. Хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными наглядно демонстрирует эффективность метода.

Для сравнительной оценки точности методов активного и пассивного зондирования поля были проведены измерения зависимости амплитуды

ϵ_y - компоненты пучности ближнего поля резонансной щели в волноводе от смещения ее от оси. Результаты этих измерений представлены на рис.1, где кривая 1 отображает расчетную зависимость [3];

Кривые 2,3 - соответственно зависимости, измеренные методами пассивного и активного зондирования. Кривая 4 построена по данным контрольных измерений в дальней зоне. Из приведенных данных видно, что результаты, полученные методом пассивного зондирования, являются более точными.

Как при активном, так и при пассивном зондировании поля на точность измерений существенно влияют размеры зонда. Работая

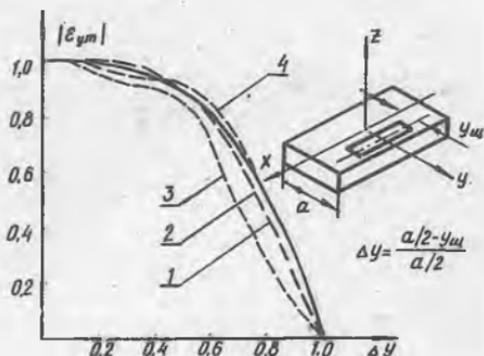


Рис.1

с линейным зондом длиной l_z , мы измеряем не фактическое распределение поля $\epsilon(z)$, а распределение его некоторого среднего значения $\bar{\epsilon}(z)$ на интервале $l_z/2 \leq z \leq l_z$.

Равномерное уклонение функций $\epsilon(z)$, $\bar{\epsilon}(z)$:

$$\epsilon = \|\epsilon(z) - \bar{\epsilon}(z)\|$$

будет, очевидно, тем меньше, чем меньше l_z/λ . Однако измерение полей малыми, по сравнению с длиной волны, зондами нежелательно по двум причинам: с увеличением частоты возрастают конструктивные трудности при изготовлении малых (по сравнению с длиной волны) зондов; уменьшение размеров зонда ведет к снижению уровня рассеянного поля, и, следовательно, уровня сигнала U_z , поступающего на измерительный прибор. Так, согласно расчетным данным [4], величина рассеянного пассивным вибратором поля в свободном пространстве с уменьшением его длины от $l/\lambda = 0.5$ до $l/\lambda = 0.25$ снижается на 30 дБ (по мощности), в результате чего снижается динамический диапазон и точность измерений. Например, применение коротких зондов [2] позволило получить динамический диапазон измерений амплитуды поля резонансной щели в волноводе, равный всего 10 дБ. Наибольшая чувствительность

измерительной установки может быть обеспечена при использовании зондов резонансной длины, преимуществом которых является независимость функции распределения тока по зонду от распределения возбуждающего поля [5].

Функциональная зависимость (2) вытекает непосредственно из теоремы взаимности [6] и для линейного зонда может быть записана в виде

$$U_3 = C \int \varepsilon_r J_3 dl, \quad (3)$$

где C - константа, имеющая размерность I/Ампер; ε_r - распределение тангенциальной составляющей поля вдоль зонда; J_3 - распределение тока по зонду; l_3 - длина зонда.

Следовательно, U_3 определяется как функцией ε_r , так и функцией J_3 , и независимость J_3 от ε_r является важным фактором, влияющим на точность измерений (в случае резонансных зондов).

Изложим методику проведения эксперимента. Зонд помещается в исследуемую область поля антенны с помощью диэлектрического зондодержателя. При этом нельзя аналитически определить его резонансную длину из-за трудностей, возникающих при записи граничных условий. Поэтому было проведено экспериментальное определение резонансной длины линейных зондов, наклеенных на стеклянные зондодержатели диаметром $0,03\lambda$. Измерения проводились для различных значений отношения $l_3/2a$ (где $2a$ - диаметр зонда). Результаты измерений в ближнем поле полуволновой щели, прорезанной в экране размером $(5 \times 5)\lambda$ для зондов с $l_3/2a = 95$, приведены на рис.2. Они показывают, что

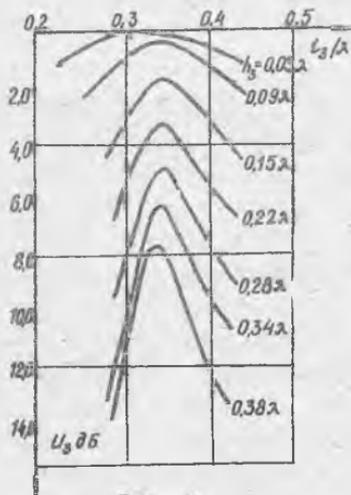


Рис. 2

резонансная длина практически не зависит от расстояния между зондами раскрытом h_3 для $h_3 > 0,1\lambda$. При $h_3 < 0,1\lambda$ изменение этой величины компенсируется увеличением ширины резонансной кривой. Высокая избирательность линейных зондов по кроссполяризационным составляющим зондируемого поля достигается за счет высоких значений отношения $l_3/2a$.

Принципиальная электрическая схема стенда для измерения амплитудно-фазовых распределений в раскрывах антенн методом пассивного зондирования приведена на рис. 3.

В основе построения схемы лежит принцип сравнения измеряемого вектора с эталонным.

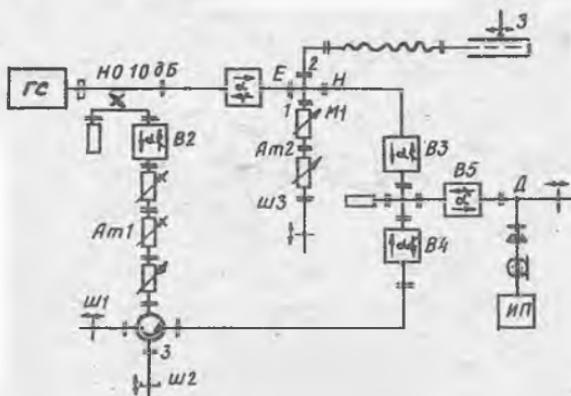


Рис. 3

Исследуемая антенна А получает питание с выходного фланца 2 основного волновода двойного Т-образного моста М1, предназначенного для разделения сигналов прямой и обратной волны. Начальная установка нуля (при отсутствии зонда в раскрыве антенны) осуществляется настройкой плеча I моста грубым и точным аттенюаторами блока Ам2, реактивным шлейфом Ш3. Сигнал, вызываемый полем рассеяния зонда, снимается с Н-плеча моста М1 и подается на сумматор, собранный на двойном Т-образном мосте М2. Цепь эталонного (опорного) сигнала, развязанная вентилями В2 и В4, составлена из блока аттенюаторов Ат1 и отсчетного фазсворачивателя, собранного на Х-циркуляторе ЦВ в плечи 2 и 3 которого включены волноводные реактивные шлейфы Ш1 и Ш2. Точность отсчета фазы опорного сигнала полностью определяется точностью отсчета положения поршня шлейфа. Установка амплитуды эталонного сигнала производится при помощи прецизионного отсчётного аттенюатора, включенного в блок Ат1, что позволяет получать достаточно высокую точность отсчета амплитуды.

Индикация нуля осуществляется при помощи детекторной секции Д и индикаторного прибора ИП. Чувствительность и уровень его собственных шумов являются одними из важнейших факторов, определяющих погрешность и динамический диапазон измерений. Максимально допустимый уровень собственных шумов индикатора при заданной допустимой погрешности измерений, когда отношение "сигнал-шум" равно 1,0, определяется уравнением

$$|A_{ш}| = A_0 + A_3 + A_{\partial} + |A_p|,$$

где A_0 - затухание тракта СВЧ, дБ; $A_{ш}$ - уровень собственно-го шума индикаторного прибора относительно выходной мощности генератора ГС, приведенный ко входу детекторной секции; $A_2 = 10 \lg P_{3m}/P_0, P_{3m}$ - мощность отклика зонда в максимуме распределе-ния поля; P_0 - мощность, подводимая к антенне; A_d - динамический диапазон измерений амплитуды, дБ; A_p - погрешность измерения, дБ.

Величина A_p определяет также погрешность измерений по фазе. При равных амплитудах измеряемого и опорного сигналов и разности фаз между ними $\Delta\varphi$, применяя теорему о предельной погрешности, нетрудно установить, что

$$\Delta\varphi = 2 \arcsin \frac{\Delta}{2},$$

где Δ - модуль относительной разности векторов измеряемого и опорного сигналов; $A_p = 20 \lg \Delta$.

В рассматриваемой схеме затухание волноводного тракта составляет около 15 дБ, динамический диапазон измерений принят равным 30 дБ. Затухание на зонде A_3 зависит от типа и размеров зонда, от исследуемой антенны, а также от расстояния между зондом и раскрывом. Для резонансных линейных зондов при исследовании полей в области $0,05\lambda < h_3 < 0,50\lambda$ эта величина лежит в пределах от 5 до 20 дБ. В подобных схемах в качестве индикаторов желательно применять микровольтметры (например, типа В2-11). Это позволяет довести уровень шума индикатора, приведенный ко входу детекторной секции, до весьма малых значений (в нашем случае до 150 дБ), что обеспечивает достаточно высокую точность отсчета амплитуды и фазы во всем динамическом диапазоне измерений.

Для примера приведем результаты измерений на описанном стенде ближнего поля волноводно-целевой антенны вытекающей волны. На рис. 4а представлено амплитудно-фазовое распределение E_y -компоненты поля антенны - , измеренное на расстоянии $0,095\lambda$ от раскрыва резонансным зондом с отношением $L_3/2a = 70$ на частоте 9,592 ГГц. Диаграмма направленности антенны в плоскости xoz приведена на рис. 4б, где в виде сплошной кривой отображен результат расчёта диаграммы по распределению поля, представленному на рис. 4а, а точками - диаграмма, измеренная в камере с коэффициентом безэховости 35 дБ. Достаточно хорошее совпадение диаграмм, полученных методом пересчёта распределения ближнего поля антенны в дальнюю зону с диаграммами, снятыми в безэховой камере, свидетельствует об удовлетворительной точности измерений.

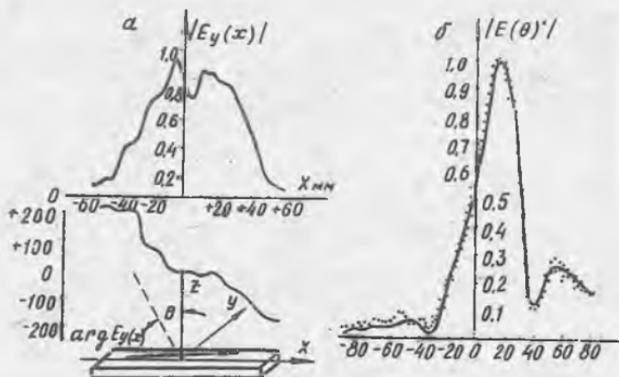


Рис.4

Л и т е р а т у р а

1. К и н г Р., У Т а й - цзунь. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн. М., И.Л., 1962.
2. Г о р о б е ц Н.Н., Д я щ е н к о В.А. С и р о т н и к о в А.И. Экспериментальное исследование распределения поля в волноводно-щелевых излучателях. - В сб.: Антенно-фидерные и измерительные устройства СВЧ. Харьковский госуниверситет, 1971.
3. Ф е л ь д Я.Н. Основы теории щелевых антенн. М., " Сов. радио", 1948.
4. У ф и м ц е в П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции, М., " Сов. радио", 1962.
5. Л е о н т о в и ч М., Л е в и н М. К теории возбуждения колебаний в вибраторах антенн. ЖТФ, т. XIV, вып. 9, 1944.
6. *Stzait B.J., Cheng D.K. Microwave magnetic-field measurements by a modulated scattering technique. Proc. IEE, vol. 109 B, N43, 1962, 33-39*