

УДК 621.317

В. Ф. ПАВЛОВ, канд. техн. наук,
В. Д. САХАЦКИЙ, канд. техн. наук

ПРОСТОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Экспериментальное определение коэффициента отражения (R) различных материалов, в том числе материалов, из которых состоят «освещенные» поверхности радиолокационных объектов, представляет практический интерес. Особенно важно определение R в свободном пространстве в натуральных и лабораторных условиях для решения задач электромагнитной совместимости и помехозащищенности. Нередко возникает необходимость быстрого определения R всей или части поверхности объекта на небольших расстояниях от этой поверхности. Ограниченность расстояния может быть обусловлена рядом причин, например, наличием вблизи интересующей поверхности объектов с высокой отражающей способностью, отсутствием безэховой камеры и измерительных антенн с требуемыми характеристиками. Измерения на малых расстояниях от «освещенной» поверхности объекта можно проводить, например, с помощью установки, состоящей

в основном из генератора, приемника, направленного ответвителя (ферритового циркулятора) и приемно-передающей антенны.

В работе [1] предложен метод быстрых измерений путем использования подобной установки для определения коэффициента отражения. При этом экспериментально определяются коэффициенты стоячей волны в волноводном тракте, когда перед антенной на расстоянии 23—25 см находится сначала исследуемый образец, а затем металлический лист. На основании этих измерений вычисляется коэффициент отражения. Для более точного нахождения коэффициента стоячей волны и, соответственно, R в работе [1] предлагается выполнять несколько измерений на разных расстояниях от исследуемого образца. Последнее обстоятельство не полностью обосновано и делает определение R менее оперативным.

Цель статьи — разработка простого обоснованного и оперативного метода оценки коэффициента отражения материалов, расположенных в ближней зоне излучения антенны измерительной установки. Поскольку рассматриваемые измерения проводятся вблизи от поверхности объектов, то сами объекты часто находятся в ближней зоне излучения антенны установки. Характерной особенностью ближней зоны излучения является сильная осцилляция плотности потока мощности вдоль направления главного максимума излучения до расстояния $0,2 L^2/\lambda$, где L — максимальный размер раскрыва антенны; λ — длина волны [2]. Поэтому располагать исследуемый образец от антенны на расстоянии менее $0,2 L^2/\lambda$ не желательно. В противном случае результаты измерений сложно интерпретировать. На расстояниях, превышающих отмеченную выше границу, амплитуда поля спадает монотонно, и закон ее изменения можно учесть. Следовательно, в интересах получения достаточно достоверных результатов расстояние между измерительной антенной и исследуемым образцом должно быть не менее $0,2 L^2/\lambda$.

При измерениях следует учитывать, что влияние отражений от окружающих исследуемый образец объектов может быть весьма значительным. Для снижения интегрального уровня нежелательных отражений применяют беззховые камеры или покрывают поглотителями электромагнитных волн участки с наиболее высокой отражающей поверхностью. Кроме того, желательно использовать измерительные антенны с достаточно узкой диаграммой направленности, чтобы облучать края исследуемой поверхности образца на уровне менее — 10 дБ по сравнению с центром этой поверхности.

Допустим, что приведенные рекомендации выполнены и необходимо определить коэффициент отражения некоторого материала, который расположен в ближней зоне излучения измерительной антенны. Пусть приемно-передающая антенна имеет прямоугольный раскрыв $A \times B$ с главной оптической осью вдоль оси z .

Электромагнитная волна от антенны падает нормально на гладкую плоскую перекрывающую главный лепесток антенны

поверхность исследуемого материала. Для определения коэффициента отражения воспользуемся методом зеркальных изображений. В общем случае, когда исследуемый материал обладает комплексными диэлектрической и (или) магнитной проницаемостями, падающее электромагнитное поле будет создавать отраженную и прошедшую сквозь материал волны. Кроме того, будет иметь место поглощение части энергии в материале. Граничные условия на поверхности материала (на границе раздела сред) будут следующие:

$$E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} = E_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{пад}}$, $E_{\text{отр}}$, $E_{\text{пр}}$ — тангенциальные составляющие напряженности электрического поля падающей, отраженной и прошедшей в материал волн соответственно.

Согласно условиям, оценка коэффициента отражения в нашем случае производится при нормальном падении электромагнитной волны на исследуемый образец. Когда он находится в дальней зоне излучения антенны, то в пространстве антенна—образец на нормали к поверхности образца суммарное поле можно записать в виде

$$E_z = \dot{E}_{\text{пад}} + \dot{E}_{\text{отр}} \quad (2) \quad \text{или} \quad E_z = \dot{E}_{\text{ст}} + E_{\text{бег}} \quad (2a)$$

где $\dot{E}_{\text{ст}}$ — стоячая волна, образованная отраженной и одной частью падающей волн; $E_{\text{бег}}$ — бегущая волна, образованная оставшейся частью падающей волны.

В ближней зоне излучения справедливость использования выражения (2 а) следовало бы проверить.

Качественно проверим справедливость выражения (2 а) в ближней зоне излучения расчетным и экспериментальным путями. Для ближней зоны излучения в приближении Френеля можно записать падающее поле антенны с прямоугольным раскрытием $A \times B$ в направлении главной оптической оси (вдоль оси z) с учетом [2], в виде

$$E_{\text{пад}} = i \frac{E_0}{\lambda} \int_{-A/2}^{A/2} \int_{-B/2}^{B/2} f(x', y') e^{i\psi(x', y')} \exp \left[ik \left(z + \frac{(x')^2 + (y')^2}{2z} \right) \right] \frac{dx' dy'}{z + \frac{(x')^2 + (y')^2}{2z}} \quad (3)$$

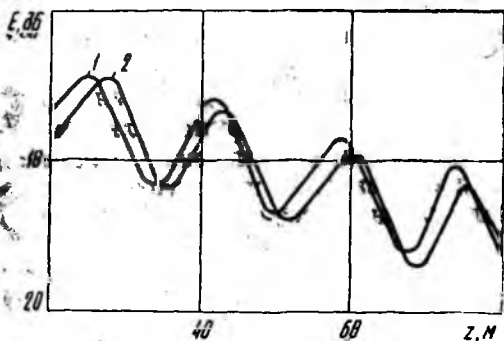
где E_0 — амплитуда напряженности электрического поля в центре раскрытия, $f(x', y')$ — амплитудное и $\psi(x', y')$ — фазовое распределение на поверхности раскрытия; x' , y' — координаты текущей точки на раскрытии; k — волновое число.

Отраженную волну (поле зеркального источника) в соответствии с выражением (3) и с учетом коэффициента отражения можно определить по следующей формуле:

$$E_{\text{отр}} = iR \frac{E_0}{\lambda} \int_{-A/2}^{A/2} \int_{-B/2}^{B/2} f(x', y') e^{ik(x'y')} \times \exp \left[-ik \left(z_2 + \frac{(x')^2 + (y')^2}{2z_2} \right) \right] \times \frac{dx'dy'}{z_2 + \frac{(x')^2 + (y')^2}{2z_2}}, \quad (4)$$

где $z_2 = 2l - z_1$; l — расстояние от источника до границы раздела; z_1, z_2 — расстояние по оси апертуры (оси z) между точкой наблюдения и источниками излучения реального и зеркального, соответственно.

По формулам (2) — (4) для реальной рупорной антенны и образца в виде листа оргстекла с идеально ровной передней поверхностью были рассчитаны зависимости изменения амплитуды поля от расстояния. На рисунке кривая 1 отражает расчетный материал. Были проведены также экспериментальные исследования зависимости E_z от расстояния между антенной и образцом (кривая 2).



Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей показывает вполне удовлетворительное качественное их совпадение. Расстояние между соседними минимумами (максимумами) в обоих случаях равно $\lambda/2$, что свидетельствует о наличии стоячей волны. Количественное отличие связано в

первую очередь с неточностями задания амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве и отличиям параметров расчетной модели оргстекла от реальных.

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что в пространстве антенна—образец при расстоянии между этими объектами больше $0,2 L^2/\lambda$ существует стоячая и бегущая волны, а суммарное поле можно определить по формуле (2 а).

В данном случае следует обратить внимание на одно обстоятельство. В реальных условиях могут существовать еще волны, обусловленные многократным переотражением между антенной

и образцом, образцом и элементами измерительной установки. Таким образом, в пространстве антенна—образец возможна нежелательная интерференция ряда бегущих и стоячих волн, которые значительно изменяют общую картину. С целью снижения влияния этих побочных явлений желательны покрытие краев раскрыва и всей измерительной установки поглотителем электромагнитных волн.

Считаем, что приняты все меры для уменьшения амплитуд побочных волн, за исключением излученной антенной (падающей) и отраженной от образца. Следовательно, в пространстве образец—антенна будут существовать только бегущая и стоячая волны. Стоячая определится в основном коэффициентом отражения образца.

Как известно, коэффициент отражения R по полю определяется непосредственно у поверхности образца соотношением $R = E_{\text{отр}}/E_{\text{пад}}$ (5). В нашем случае измерение величин, определяющих $E_{\text{отр}}$, $E_{\text{пад}}$ происходит на некотором расстоянии от образца, что приводит к занижению величины R из-за затухания $E_{\text{отр}}$ в процессе распространения в свободном пространстве. При этом величина, определяющая $E_{\text{пад}}$, измеряется в питающем тракте. Обозначим измеренное заниженное значение коэффициента отражения $R_{\text{изм}}$, которое связано с истинным коэффициентом R следующим соотношением: $R_{\text{изм}} = nR$ (6), где n — некоторый поправочный коэффициент ($n < 1$).

Для образца с известными характеристиками и теми же геометрическими размерами, что и исследуемый, также верно соотношение $R_{1 \text{ изм}} = nR_1$ (7). Если условия эксперимента не меняются, то для отношения найденных посредством измерений коэффициентов отражения известного образца $R_{1 \text{ изм}}$ к исследуемому образцу $R_{\text{изм}}$ можно записать

$$\frac{R_{1 \text{ изм}}}{R_{\text{изм}}} = \frac{R_1}{R} = \frac{E_{1 \text{отр}}}{E_{\text{отр}}} \quad (8)$$

Как известно, для отраженной волны в стоячей волне справедливо следующее соотношение

$$E_{\text{отр}} = E_{\text{max}} - E_{\text{min}}, \quad (9)$$

где E_{max} , E_{min} — максимальное и минимальное значения напряженности электрического поля, полученные в результате интерференции падающей и отраженной волн.

Подставив выражение (9) в (8), получим

$$\frac{R_1}{R} = \frac{E_{1 \text{max}} - E_{1 \text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \quad (10)$$

Из выражения (10), зная E_{max} и E_{min} двух образцов и коэффициент отражения одного из них, можно определить коэффициент отражения второго образца. Величины, пропорциональные E_{max} и E_{min} , находят экспериментально с помощью указанной изме-

рительной установки. Для этого изменяется расстояние между антенной и образцом в пределах $\lambda/2$. Систематические погрешности измерений E_{\max} и E_{\min} при определении коэффициента отражения образца в основном устраняются за счет того, что в данном случае используется отношение разностей измеренных величин. Погрешность определения коэффициента отражения данным методом для различных образцов, в том числе и для поглотителей электромагнитных волн, в результате проверки не превысила 10 %. Интересно отметить, что эта же погрешность имеет место и в случае шероховатости передней поверхности образца, когда выбросы составляют величину $\lambda/4$.

Таким образом, используя эталонный образец с известным R и предлагаемый простой метод, можно оперативно и с достаточной для практики точностью определять коэффициент отражения исследуемого образца.

Список литературы: 1. *Однорупорный* рефлектомер для быстрых измерений диэлектрических характеристик в диапазоне СВЧ//Радиотехника. 1988. № 56. С. 39—45. 2. *Сканирующие* антенны системы СВЧ. В 3-х т.: Пер. с англ./Под ред. Г. Т. Маркова, А. Ф. Чаплина. М., 1966. Т. 1. 536 с.

Поступила в редколлегию 17.05.89