

УДК 537.877

Экспериментальное определение коэффициента прохождения электромагнитных волн через щели и отверстия в экране

А. А. Чухланцев¹, Г. Г. Язерян²

¹д. ф.-м. н., ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

²к. т. н., ОАО «Российские космические системы»

e-mail: ¹alchuk51@mail.ru, ²gyazeryan@yandex.ru

Аннотация. Предложены методика и установка для измерения коэффициента прохождения электромагнитных волн через отверстия и щели в экране конечной толщины, а также через слой полупрозрачного вещества. Приведены примеры проведения измерений и их результаты.

Ключевые слова: коэффициент прохождения электромагнитных волн, дифракция волн, сечение рассеяния

Experimental Determination of the Transmission Ratio of Electromagnetic Waves through Slits and Holes in a Screen

A. A. Chukhlantsev¹, G. G. Yazeryan²

¹doctor of physical and mathematical science, Fryazino branch of Kotelnikov IRE RAS

²candidate of engineering science, editing group head at the Department of Scientific and Technical Information, Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: ¹alchuk51@mail.ru, ²gyazeryan@yandex.ru

Abstract. A method and unit for determining the transmission ratio of electromagnetic waves through slits and holes in a screen of finite thickness as well as through a semi-transparent substance layer are suggested. Examples of measurements and their results are given.

Key words: transmission ratio of electromagnetic waves, wave diffraction, scattering cross-section

Введение

Определение коэффициента прохождения электромагнитных волн через щели и отверстия в экране, а также через слой какого-либо вещества, является важным в ряде задач антенной техники, распространения радиоволн и дистанционного радиофизического зондирования. Как известно, аналитическое решение данной дифракционной задачи удается получить лишь для ограниченного количества идеализированных объектов. А известные экспериментальные методики, как правило, требуют привлечения сложного оборудования и прецизионной аппаратуры.

В данной работе предлагается простая методика и установка для измерения коэффициента прохождения электромагнитных волн через отверстия и щели в экране конечной толщины, а также через слой полупрозрачного вещества. Приведены результаты измерений коэффициента пропускания щели в экране (листе) из различных материалов — металлических, полупрозрачных, поглощающих.

Исходные положения

Дифракция электромагнитных волн характеризуется такими величинами, как пространственное распределение амплитуды и фазы рассеянного поля, элементы матрицы рассеяния, диаграмма рассеяния и пр. Во многих задачах вводят некоторые средние (интегральные) характеристики способности объекта переизлучать (рассеивать), поглощать или пропускать падающую на него плоскую волну. К таким характеристикам относятся интегральные сечения рассеяния, поглощения и ослабления тел, на которых рассматривается дифракция, или коэффициент пропускания для щелей и отверстий в экранах [1].

Интегральное сечение рассеяния σ_p определяется как отношение полной мощности рассеянной волны P_p к абсолютному значению вектора плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) Π_0 падающей волны:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{\Pi_0} = \frac{1}{\Pi_0} \oint_{\Sigma} \Pi ds,$$

где Σ — любая поверхность, охватывающая объект дифракции.

Аналогичным образом определяются интегральное сечение поглощения:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{\Pi_0}.$$

Сечение ослабления в соответствии с оптической теоремой является суммой сечений рассеяния и поглощения.

Соответственно коэффициенты рассеяния (отражения) r , поглощения γ_{Π} и пропускания (прохождения) t через слой определяются как отношения P_p , P_{Π} и P_t к полной мощности падающей волны P_0 .

В основе предлагаемой методики лежат основные выводы теории теплового излучения, разработанной С. М. Рытовым и М. Л. Левиным [2]. В данной теории доказано, что интенсивность радиотеплового излучения тела на данной поляризации в каком-либо направлении прямо пропорциональна поглощению в данном теле энергии вспомогательной волны той же поляризации, падающей на тело с этого направления. При этом соотношение между размерами тел (α) и длиной волны (λ) никак не ограничивается, поэтому теория применима и к задачам, в которых α соизмерима с λ . Именно в этих условиях решение краевых задач электродинамики затруднено, особенно когда тело имеет сложную форму. Однако, как следует из вышесказанного, упомянутые энергетические (интегральные) характеристики дифракционного поля можно определять путем измерения параметров собственного радиотеплового излучения объектов.

Описание экспериментальной установки и методики

СВЧ радиометрическая установка (рис. 1) состоит из радиометрического приемника с антенной, помещенной в меньшее основание усеченной пирамиды из поглощающего материала — «черного тела» (с коэффициентом отражения, близким к нулю для данного диапазона волн). Большое основание пирамиды ориентировано в зенит и закрыто металлическим листом с круглым отверстием, диаметр которого много больше длины волны радиометра λ , что позволяет пренебречь краевыми эффектами на данной апертуре. Однако площадь отверстия (S_0)

меньше площади «пятна» (S) главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны в плоскости верхнего основания пирамиды (схематически показано пунктирной линией), что уменьшает влияние на измерения неравномерности диаграммы направленности. Для удобства расположения и фиксации исследуемых объектов оно может быть закрыто сплошной радиопрозрачной пластиной (например, из тонкого и прочного оргстекла). Возможны, конечно и другие варианты конструкции для закрепления исследуемых объектов в зависимости от их формы и размеров.

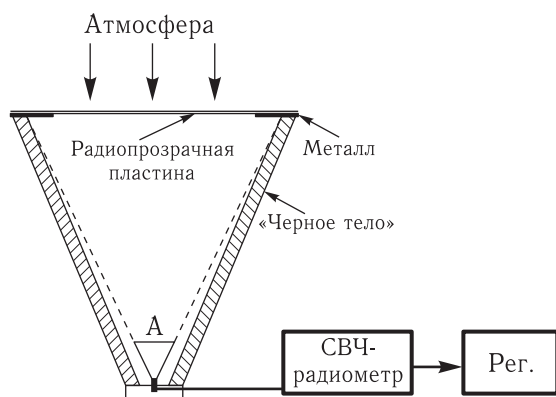


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Выходной сигнал радиометра регистрируется с помощью измерительного прибора (регистратора). Установка должна располагаться на открытой площадке (а не в помещении), чтобы исключить «подсветку» от посторонних объектов (от потолка и стен помещения).

Мощность на входе радиометра, выраженная в значениях яркостной температуры, при открытом отверстии равна:

$$T_1^{\text{Я}} = T_0(1 - t_0) - t_0 T_{\text{АЗ}}^{\text{Я}}, \quad (1)$$

а при закрытом металлическим листом отверстии

$$T_2^{\text{Я}} = T_0, \quad (2)$$

где T_0 — температура поглощающего материала («черного тела»); t_0 — коэффициент пропускания отверстия, принимаемый за единицу; $T_{\text{АЗ}}^{\text{Я}}$ — яркостная температура атмосферы (в зенит).

Проведением измерений уровня радиотеплового излучения (фиксируемого в виде напряжения

на выходе регистратора) при открытом и закрытом отверстиях формируется шкала коэффициента пропускания. На данной шкале уровень выходного напряжения при открытом отверстии соответствует значению коэффициента пропускания единица. Уровень выходного напряжения при закрытом отверстии соответствует коэффициенту пропускания ноль.

В случае закрытия отверстия металлическим экраном со щелью (или отверстиями) или полупрозрачным экраном мощность на входе антенны радиометра равна

$$T_3^{\text{Я}} = T_0(1 - t) + t \cdot T_{\text{А}}^{\text{Я}'}, \quad (3)$$

где t — коэффициент пропускания экрана, $T_{\text{А}}^{\text{Я}'}$ — яркостная температура атмосферы, усредненная с учетом индикатрисы рассеяния щели.

Решая совместно уравнения (1)–(3) относительно t и учитывая, что величина $(T_0 - T_{\text{АЗ}}^{\text{Я}})/(T_0 - T_{\text{А}}^{\text{Я}'})$ в диапазоне сантиметровых волн близка к единице, получаем:

$$t = \frac{T_3^{\text{Я}} - T_2^{\text{Я}}}{T_1^{\text{Я}} - T_2^{\text{Я}}}. \quad (4)$$

Коэффициент прохождения через отверстие или щель находится в предлагаемом методе из соотношения

$$t_{\text{щ}} = t \cdot \frac{S_0}{S_{\text{щ}}} = \frac{T_3^{\text{Я}} - T_2^{\text{Я}}}{T_1^{\text{Я}} - T_2^{\text{Я}}} \cdot \frac{S_0}{S_{\text{щ}}}. \quad (5)$$

Точность измерения величины t определяется в основном флуктуационной чувствительностью радиометра и флуктуациями радиоизлучения атмосферы. В предложенной установке использован радиометр с длиной волны 2,25 см, имеющий флуктуационную чувствительность при постоянной времени выходного устройства 1 с не хуже 0,2 К и полосу пропускания 120 МГц. На этой волне флуктуации излучения атмосферы за время одного цикла измерений незначительны. По проведенным оценкам относительная погрешность измерений коэффициента прохождения не превышает 5 %.

Некоторые примеры измерений

С помощью описанной установки получены оценки коэффициента пропускания щелей в экранах, наиболее часто встречающихся в практике антенной техники и дистанционного радиофизического зондирования.

В качестве примера на рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости коэффициента пропускания щели в металлическом экране (t) от ее ширины (δ) при различных толщинах экрана (d) для E -поляризованной волны. Там же приведены аналогичные зависимости для щелей в слое пресноводного льда и «черного тела» разной толщины. Любопытно, что резонансные явления (при $\delta \approx \kappa\lambda/2$, $\kappa = 1, 2, \dots$), которые для щели в металлическом экране приводят как к увеличению t , так и к его уменьшению по сравнению с приближением геометрической оптики, для щели во льду приводят лишь к уменьшению t , а для щели в «черном теле» они практически не проявляются.

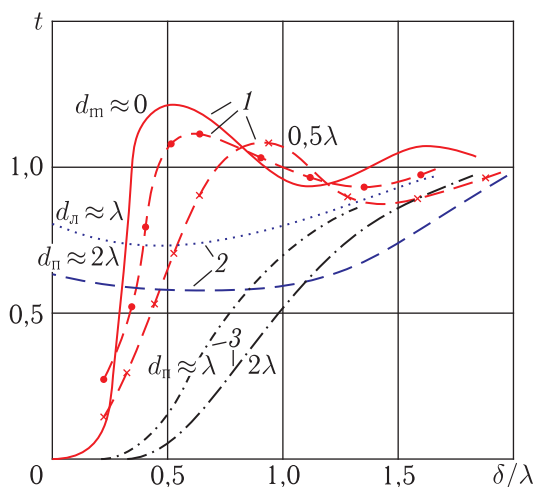


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания щели t от ее ширины δ при нормальном падении E -поляризованной электромагнитной волны:

- 1 — щель в металлическом листе толщиной d_m , (красные кривые);
- 2 — щель в слое льда толщиной d_l , (синие);
- 3 — щель в листе из поглощающего материала толщиной d_n (черные)

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента прохождения H -поляризованной электромагнитной волны через щель в металлическом экране от его толщины при разных значениях ширины щели (δ). Сплошной (красной) линией показан результат расчетов при $\delta = \lambda/\pi$, заимствованный из работы [3]. В плане показана схема эксперимента (исследуемого листа со щелью).

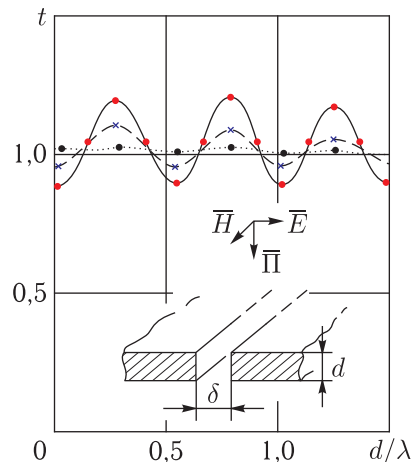


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания щели в металлическом листе от его толщины (d) при нормальном падении H -поляризованной волны:

- красные точки соответствуют $\delta = 0,3\lambda$ ($\approx \lambda/\pi$);
- синие крестики с пунктиром: $\delta = 0,5\lambda$;
- черные кружки: $\delta = \lambda$

Заключение

В работе предложена методика и установка для определения коэффициента прохождения электромагнитных волн через отверстия и щели в экране по данным СВЧ радиометрических измерений. К основным достоинствам методики измерения следует отнести простоту ее реализации, обусловленную, в первую очередь, отсутствием активного источника излучения и фиксацией положения приемной антенны. Установку можно использовать для измерения коэффициента прохождения через экраны с отверстиями различной формы, через слой природной среды (лед, снег, растительность), через слой рассеивателей и пр.

Список литературы

1. Кинг Р., Тай-Цзунь У. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 190 с.
2. Рытов С.М., Левин М.Л. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967. 307 с.
3. Литвиненко Л.Н., Просвирин С.Л., Шестопалов В.П. Дифракция плоской H -поляризованной электромагнитной волны на щели в металлическом экране конечной толщины // Радиотехника и электроника. 1977, т. 22, № 3, с. 475–484.