

УДК 531.951

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В СЛОЕ С ДИСКРЕТНЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Коган Лев Петрович^{1,2}, к.ф.-м.н., доцент кафедры Общая физика и теоретическая механика ННГАСУ

e-mail: L.kog@list.ru

Заборонкова Татьяна Михайловна^{3,4}, д.ф.-м.н., профессор кафедры Общая и Ядерная Физика НГТУ

e-mail: t.zaboronkova@rambler.ru

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п.г.т. Научный, республика Крым, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

⁴ Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

⁵ ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Исследовано рассеяние плоской электромагнитной волны на слое со случайными неоднородностями диэлектрической проницаемости прямоугольной формы. Средняя интенсивность поля волны определена методом численного усреднения интенсивностей, соответствующих отдельным реализациям возмущений диэлектрической проницаемости в слое. Проанализировано распределение средней интенсивности поля внутри слоя от усредненных параметров неоднородностей диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: электромагнитные волны, рассеяние, случайные среды, средняя интенсивность.

INTENSITY OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN A LAYER WITH DISCRETE RANDOM INHOMOGENITIES OF DIELECTRIC PERMITTIVITY

Lev P. Kogan^{1,2,3}, Associate Professor of the Department of General Physics and Theoretical Mechanics

e-mail: L.kog@list.ru

Tatiana M. Zaboronkova^{3,4}, Professor of Department of Nuclear Physics

e-mail: t.zaboronkova@rambler.ru

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

² Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Scientific urban-type settlement, Republic of Crimea, Russia

³ Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

⁵ Institute of Applied Physics RAN, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The scattering of a plane electromagnetic wave on a layer with random rectangular-shaped inhomogeneities of the dielectric constant has been studied. The intensity of the wave field has been determined by numerically averaging the intensities corresponding to individual realizations of the dielectric constant perturbations in the layer. The distribution of the average intensity within the layer has been analyzed in terms of the averaged parameters of the dielectric inhomogeneities.

Keywords: electromagnetic waves, scattering, random media, and average intensity.

Введение

Рассматривается задача об определении интенсивности электромагнитной волны рассеянной слоем со случайными близко расположенными одномерными возмущениями диэлектрической проницаемости прямоугольной формы произвольной ширины (относительно длины волны), амплитуда которых предполагается меньше или сравнимой со значениями фоновой проницаемости среды. При распространении электромагнитных волн имеет место влияние случайных изменений параметров среды на рассеяние и рефракцию волн, а также их интенсивность в месте приема [1]. Проблема распространения волн в случайных средах рассмотрена достаточно подробно и соответствующие результаты опубликованы в научной литературе [2, 3]. Однако остаются вопросы, требующие дальнейшего изучения, например, задачи о свойствах средней интенсивности поля волны в слоях с близко расположенными неоднородностями в зависимости от протяженности слоя, амплитуды и ширины возмущений диэлектрической проницаемости. С помощью таких неоднородностей можно моделировать среду в задачах зондирования в геофизике [4].

Математический аппарат, используемый при решении задачи

Рассматривается рассеяние плоской электромагнитной волн с напряженностью электрического поля

$$\vec{E}_0(x) = \vec{n} E_0 \exp[i(2\pi f t - kx)] \quad (1)$$

при нормальном падении на слой $0 \leq x \leq L$ со случайными одномерно-неоднородными флуктуациями диэлектрической проницаемости прямоугольной формы. В (1) величина E_0 – амплитуда падающей волны, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали, перпендикулярный к оси x , $k = k_0 \sqrt{\varepsilon^{(0)}}$, где $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{2\pi f}{c}$, $\varepsilon^{(0)}$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды при отсутствии возмущений. Диэлектрическая проницаемость возмущенного хаотического слоя, отвечающая совокупности сколь угодно близко расположенных независимых возмущений прямоугольной формы, записывается в виде:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon^{(0)} \left(1 + \sum_{m=1}^N A_m(x) [U(x - x_m) - U(x - x_m - S_m)] \right). \quad (2)$$

В (2) функция $U(z)$ – единичная функция Хевисайда, N – количество неоднородностей в реализации, x_m – координата начала неоднородности номера m , обладающей шириной S_m



и амплитудой $|A_m|$. Считаем, что при всех индексах m ($1 \leq m \leq N$) параметры S_m и A_m – независимые случайные величины. При этом ширина неоднородности S_m распределена по Гауссу со средним значениями $\langle S_m \rangle = S$ и стандартом флуктуаций σ_S , а амплитуда $|A_m|$ равномерно распределена на интервале $[-\mathcal{A}, \mathcal{A}]$.

Среднюю интенсивность поля волны внутри слоя получим путем численного усреднения интенсивностей, соответствующих отдельным реализациям слоя. В [3] получено следующее выражение интенсивности волны внутри слоя для его отдельной реализации (нормированной на интенсивность падающей волны) в явном виде

$$J(x_m + S_m + 0) = \frac{T_m T_{m-1} \dots T_1 [\Lambda_{N,m+1} + \Phi_{N,m+1} (T_{N+1} T_N \dots T_{m+1})^2]}{\Lambda_{m,1} - \Phi_{1,m} \Phi_{N,m+1} (T_{N+1} T_N \dots T_1)^2} \quad (3)$$

Функции $\Lambda_{m,1}$ и $\Lambda_{N,m+1}$, $\Phi_{m,1}$ и $\Phi_{N,m+1}$ в (3) определяются выражениями

$$\Lambda_{m,1} = 1 + \sum_{n=1}^{m-1} \sum_{j=n}^{m-1} \delta_n \alpha_{j+1}, \quad \Lambda_{N,m+1} = 1 + \sum_{n=m+1}^{N-1} \delta_n \left(\sum_{m=n+1}^N \alpha_m \right),$$

$$\Phi_{m,1} = \sum_{n=1}^m \alpha_n, \quad \Phi_{N,m+1} = \sum_{n=m+1}^N \alpha_n,$$

где $\delta_n = -R_n \prod_{s=n+1}^N T_s^2$, $n = 1, 2, \dots, N-1$; $\delta_N = -R_N$; $\alpha_n = R_n \prod_1^N T_n^{-2}$.

В выражении (3) коэффициенты отражения и прохождения волны по энергии, R_m и T_m соответственно, записываются в виде

$$R_m = \left| \frac{Z_m^2 - 1}{Z_m^2 + 1 - 2iZ_m \operatorname{ctg} \theta_m} \right|^2, \quad T_m = 1 - R_m.$$

Здесь $\theta_m = k S_m \sqrt{1 + A_m}$, а $Z_m = (1 + A_m)^{-1/2}$ – нормированный (на величину $[\mu_0/(\epsilon_0 \epsilon^{(0)})]^{1/2}$) импеданс неоднородности. Формула (3) определяет интенсивность $J(x_m + S_m)$ для отдельной реализации слоя. Выражение (3) справедливо при условии $\left(\frac{A_m}{2 + A_m} \right)^2 N \leq 1$, на основании которого может быть определено максимальное число N одномерных дискретных возмущений относительной диэлектрической проницаемости и соответствующие этому числу максимально допустимые значения амплитуды A_m отдельных неоднородностей в любой реализации слоя. Проводя усреднение вида

$$\langle J(x) \rangle = \frac{J_1(x) + J_2(x) + \dots + J_N(x)}{N}, \quad (4)$$

по совокупности интенсивностей $J(x)$, соответствующих отдельным реализациям слоя с номерами $1, 2, \dots, N$, получим выражение для средней интенсивности поля $I(x) = \langle J(x) \rangle$.

Результаты численного анализа и их обсуждение

Расчеты средней интенсивности рассеянного поля проводились по формуле (4) при усреднении по $N = 30$ независимым реализациям слоя.

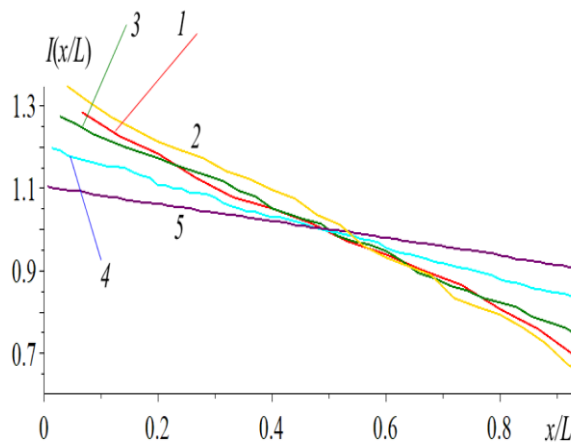


Рисунок 1 – Средняя интенсивность
рассеянного поля при $S = \lambda_0$, $\sigma_S = 0.01 \lambda_0$

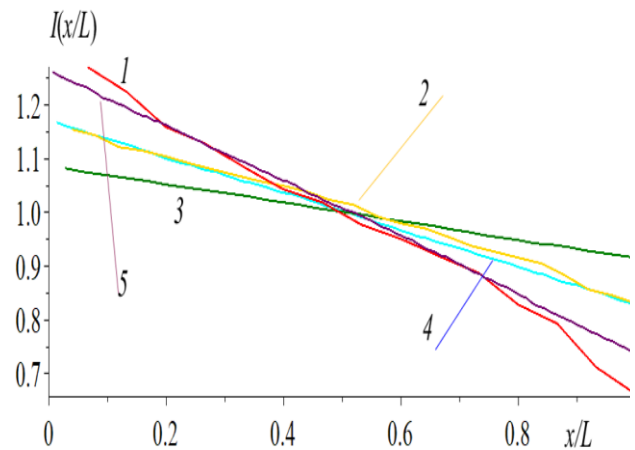


Рисунок 2 – Средняя интенсивность
рассеянного поля при $S = 1.25 \lambda_0$, $\sigma_S = 0.01 \lambda_0$

На рис. 1 и 2 приведены зависимости нормированной средней интенсивности $I(x/L) / I_0$ для разного числа неоднородностей N (и соответствующей им длине слоя $L = NS$) при двух значениях ширины неоднородностей прямоугольного профиля. Равномерное распределение для величины A_m задается на интервале $-\mathcal{A} \leq A_m \leq \mathcal{A}$. На рис. 1 интенсивность $I(x/L) / I_0$ соответствует параметрам $S = \lambda_0$, $\sigma_S = 0.01 \lambda_0$. При этом: значение $\mathcal{A} = 0.70$, $L = 15 \lambda_0$ (кривая 1); $\mathcal{A} = 0.55$, $L = 25 \lambda_0$ (кривая 2); $\mathcal{A} = 0.43$, $L = 35 \lambda_0$ (кривая 3); $\mathcal{A} = 0.30$, $L = 70 \lambda_0$ (кривая 4); $\mathcal{A} = 0.20$, $L = 155 \lambda_0$ (кривая 5). На рис. 2 приведены зависимости средней интенсивности $I(x/L) / I_0$ при $S = 1.25 \lambda_0$, $\sigma_S = 0.01 \lambda_0$. При этом: $\mathcal{A} = 0.70$, $L = 18.75 \lambda_0$ (кривая 1); $\mathcal{A} = 0.55$, $N = 25$, $L = 31.25 \lambda_0$ (кривая 2); $\mathcal{A} = 0.43$, $N = 35$, $L = 43.75 \lambda_0$ (кривая 3); $\mathcal{A} = 0.30$, $N = 70$, $L = 87.50 \lambda_0$ (кривая 4); $\mathcal{A} = 0.20$, $N = 155$, $L = 193.75 \lambda_0$ (кривая 5). Из численных расчетов следует, что для случая неизменной длины слоя и равного числа неоднородностей по мере уменьшения интервала изменения амплитуды $[-\mathcal{A}, \mathcal{A}]$ неоднородностей диэлектрической проницаемости внутри слоя имеет место уменьшение величины изменения средней интенсивности $I(x/L) I_0$ внутри слоя. Увеличение длины слоя (и соответственно числа неоднородностей N) с одновременным уменьшением параметра $\mathcal{A}$ приводит к тому, что в обоих рассматриваемых случаях (соответствующих разной средней ширине неоднородностей) не смотря на сильное (на порядок) увеличение толщины слоя размах вариаций зависимости $I(x/L) I_0$, соответствующей кривой 1, все равно оказывается существенно большим, чем для кривой 5. Кроме того, при уменьшении $\mathcal{A}$ происходит «линеаризация» средней интенсивности $I(x/L) I_0$ как функции от горизонтальной координаты x .

Заключение

Рассмотрено рассеяние плоских электромагнитных волн на диэлектрическом слое с одномерными случайными неоднородностями прямоугольной формы. Исследование средней интенсивности волны проводилось численно в зависимости от средней ширины, от средней амплитуды неоднородностей, а также от числа неоднородностей в слое. Показано, что:

- В середине слоя средняя интенсивность стремится к своему невозмущенному значению независимо от ширины интервала распределения амплитуды неоднородностей.
- Размах изменения средней интенсивности внутри слоя в основном определяется шириной используемого вероятностного распределения $\mathcal{A}$.

– При уменьшении ширины распределения $\mathcal{A}$ увеличивается степень линейности рассматриваемой средней интенсивности $I(x/L)I_0$ внутри слоя.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00459). Авторы выражают благодарность сотруднику НИРФИ при ННГУ Григорьеву Г.И. за обсуждение результатов.

Список литературы:

1. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. – М.: Наука. 1977. – 171 с.
2. Григорьев Г.И., Заборонкова Т.М., Коган Л.П. Рассеяние электромагнитных волн на слое с одномерными неоднородностями прямоугольной формы //Радиотехника и Электроника. – 2017. – Т.62. – № 10. – С. 945-952.
3. Коган Л.П., Заборонкова Т.М., Григорьев Г.И., Вольвач А.Е. Средняя интенсивность поля электромагнитной волны в слое с флуктуациями диэлектрической проницаемости. //РЭНСИТ. – 2025. – Т.17. – № 2. – С. 177-186.
4. [Семенов А.А.](#), [Арсеньян Т.И.](#) Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. М.: Наука, 1978. – 272 с.

