

БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ

Людмила Михайловская¹, Николай Ерохин¹, Владимир Дамгов²

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия* nerokhin@mx.iki.rssi.ru

²*Институт космических исследований БАН, София, Болгария*

NONREFLECTION PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN INHOMOGENEOUS DIELECTRIC LAYERS

Lyudmila Mikhailovskaya¹, Nikolai Erokhin¹ and Vladimir Damgov²

¹*Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*Space Research Institute of BAS, Sophia, Bulgaria*

Correspondence to: N.S.Erokhin, Space Research Institute of RAS, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Keywords: *electromagnetic waves, inhomogeneity, propagation, reflection.*

Abstract. *It is considered the exactly solvable physico-mathematical models describing the reflectionless propagation of electromagnetic waves in the inhomogeneous dielectric layers, for example, in the space plasma. The models studied may include the arbitrary number of free parameters characterizing the spatial profile of the medium refraction index. It means that the medium inhomogeneity may includes the arbitrary number of layers having quite different structures nevertheless the wave propagation is reflectionless one. The possible applications of effect considered are discussed.*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе на основе уравнения Гельмгольца рассмотрены линейные режимы безотражательного распространения электромагнитных волн в слоистой диэлектрической среде с неоднородным показателем преломления. Ранее этот вопрос исследовался в работах [1-4]. Следует отметить, что анализ, взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной средой, например, плазмой, представляет интерес для ряда приложений, в частности, для проблемы просветления волновых барьеров, диагностики плотной плазмы, ее нагрева мощным электромагнитным излучением, передачи энергии через нестационарные и стратифицированные среды, разработки безотражательных покрытий и др. Для указанной выше проблемы важен поиск точных решений волновых уравнений, описывающих безотражательные режимы распространения или сильное резонансное поглощение волн, возможности их прохождения через непрозрачные слои при определенной структуре неоднородностей. Возможные эффекты безотражательного взаимодействия волн с неоднородной средой необходимо учитывать и при интерпретации экспериментальных данных.

Природные среды, как правило, неоднородны. Например, в ионосфере средняя концентрация заряженных частиц имеет плавный профиль по высоте с максимумом в области F-слоя. При учете различных внешних факторов и турбулентности структура плазменных неоднородностей существенно усложняется, становится нерегулярной. Проведенный ниже анализ показывает, что и в таких условиях в среде возможно безотражательное распространение волн.

Таким образом, наличие в среде неоднородностей не обязательно сопровождается значительным отражением падающей волны. Более того, возбуждение или создание неоднородностей внешним воздействием может создавать условия для безотражательного прохождения волн через слоисто неоднородную среду. Отметим, что в настоящее время в литературе имеется большое количество публикаций, посвященных вопросам применения методов нанотехнологий для получения структурированных сред.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Анализ взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной средой проведем на основе уравнения для поля волны $E(x,t) = F(x) \cdot \exp(i \omega t)$ вида

$$d^2 F / dx^2 + k^2(x / L) \cdot F = 0. \quad (1)$$

Здесь $k(x / L) = k_0 \cdot n(x / L)$, k_0 – вакуумное волновое число, $n(x / L)$ – показатель преломления, L – характерный размер неоднородности. Отметим, что уравнение (1) соответствует в квантовой механике рассеянию частицы с нулевой энергией на следующем неоднородном потенциале :

$$U(x) = - (k \cdot L)^2 - (L^2 / 2 \cdot k) \cdot (d^2 k / dx^2) + 3 (L / 2 \cdot k)^2 \cdot (dk / dx)^2. \quad (2)$$

Аналогично [2, 3] точное решение уравнения (1) ищем в квазиклассической форме

$$F(x) = A \cdot \exp [i \Psi(x)] \cdot [k_0 / k(x)]^{1/2}, \quad d\Psi / dx = k(x),$$

где $A = \text{const}$ [2,3]. В дальнейшем полагаем $A = 1$. При этом пространственный профиль волнового числа $k(x)$, который считается заданным, будет, согласно (2), определять форму эффективного рассеивающего потенциала $U(x)$. Ряд примеров потенциала $U(x)$ с безотражательным распространением волн был представлен ранее в работах [2-4].

Зададим волновое число формулой $k(x) = k_0 \cdot [(x / L)^2 + \beta^2]^{1/2}$ с параметром β , определяющим минимальное значение волнового числа $\min k = k_0 \cdot \beta$, и перейдем в (1), (2) к безразмерной переменной $\xi = (x / L)$. Тогда введя параметр неоднородности $\rho = k_0 \cdot L$ для потенциала U получаем выражение

$$U(\xi) = \{ (3 \cdot \xi^2 - \beta^2) / [4 \cdot (\xi^2 + \beta^2)^2] \} - \rho^2 \cdot (\xi^2 + \beta^2). \quad (3)$$

В случае слабой неоднородности $\rho \gg 1$ естественно имеем $U(\xi) \approx - [k(x) \cdot L]^2$. Графики функций $U(\xi)$ и $U_1(\xi) = [k(x) \cdot L]^2$ показаны на рис.1 при $\beta = 0.2$. в случае сильной неоднородности $\rho = 0.8$.

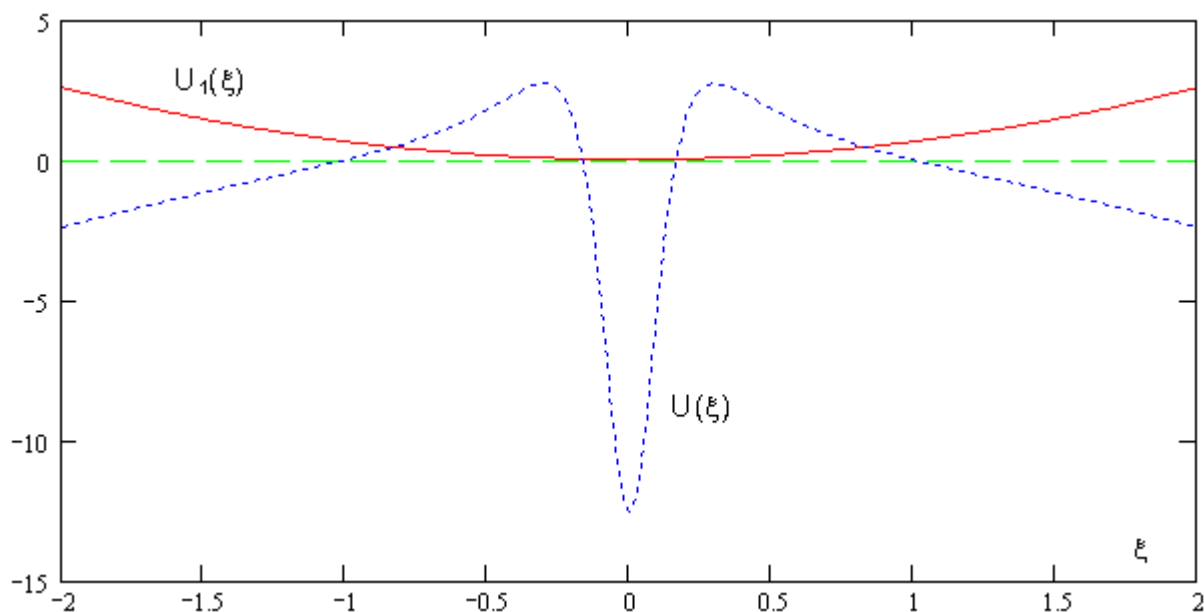


Рис.1. График эффективного рассеивающего потенциала $U(\xi)$ и квадрата безразмерного волнового числа $U_1(\xi)$ при сильной неоднородности.

Как следует из рис.1 при сильной неоднородности среды имеется существенный потенциальный барьер в области $-1 < \xi < 1$ и тем не менее волна проходит область непрозрачности без отражения при любых значениях параметра неоднородности ρ . В указанной области для малого β волновое число $k(x)$ весьма мало.

Рассмотрим пример другой, квазипериодической неоднородности. Определим базовые функции неоднородности $f_n(x)$ следующим выражением для отдельного возмущения с номером n

$$f_n(x) = 0.25 \cdot a_n \left\{ 1 + (x - b_n) / [\varepsilon_n^2 + (x - b_n)^2]^{1/2} \right\} \cdot \left\{ 1 + (c_n - x) / [\delta_n^2 + (x - c_n)^2]^{1/2} \right\}$$

с параметрами a_n (амплитуда возмущения), b_n и $c_n > b_n$ соответственно левая и правая границы возмущения, ε_n и δ_n задают толщины переходных слоев. Теперь при неоднородности, содержащей m структур, волновое число можно записать в виде $k(x) = k_0 \cdot [1 + \sum_n f_n(x)]$, где $n = 1, 2 \dots m$. Пример неоднородности из пяти слоев показан на рис.2 графиком функции неоднородности $G(x) = 0.1 + \sum_n f_n(x)$ в случае суперпозиции структур с разными амплитудами, но одинаковыми прочими параметрами. Волна проходит через эту неоднородность без отражения.

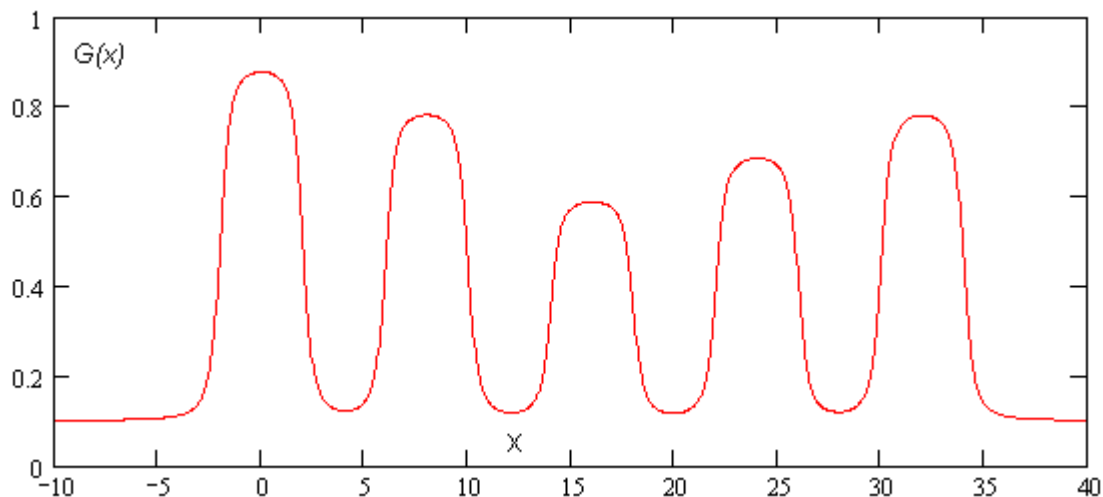


Рис.2. График функции неоднородности $G(x) = 0.1 + \sum_n f_n(x)$.

График эффективного рассеивающего потенциала $U(x)$ для данного варианта слоистой структуры при значении параметра неоднородности $\rho = 0.8$ (сильная неоднородность) представлен на рис.3. Заметим, что в рассмотренном примере x измеряется в длинах неоднородности L .

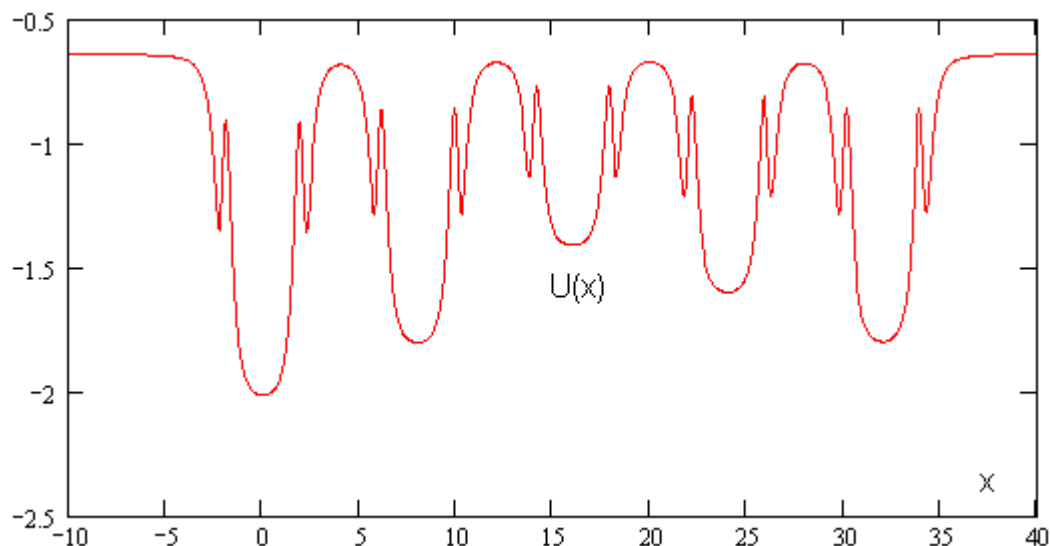


Рис.3. График рассеивающего потенциала $U(x)$.

Ясно, что можно привести и другие варианты сложного типа неоднородностей, допускающих безотражательное распространение волн через слоистую среду с использованием других базовых функций для моделирования структуры отдельного слоя. В частности, нами была рассмотрена синусоидальная неоднородность с плавной огибающей мелкомасштабных слоев.

Кроме того, необходимо отметить следующее. В случае магнитоактивной плазмы появляются слои гибридного резонанса [5,6], в которых показатель преломления имеет сингулярность и происходит конечное поглощение волны при сколь угодно малой диссипации. В данной задаче такие случаи моделируются слоями, в которых волновое число в некоторых точках обращается в нуль. Пример такой ситуации был дан в [3]. Поэтому выбрав необходимое число параметров и используя различные базовые функции можно получить неоднородную структуру с наперед заданным коэффициентом поглощения энергии при безотражательном взаимодействии электромагнитных волн с плазмой.

Из проведенного анализа видна также возможность безотражательного взаимодействия и при наличии случайных неоднородностей среды.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы можно сформулировать следующим образом. Для случая одномерной задачи приведены примеры безотражательного взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной средой при сложном типе слоистых диэлектрических структур. Показана возможность построения различных профилей неоднородности на основе системы базовых функций с любым числом заранее заданных параметров слоев (структур).

Из проведенного анализа также следует возможность управления в широком диапазоне характеристиками неоднородной слоистой среды для получения безотражательного распространения волн, что представляет интерес для ряда приложений включая передачу энергии через сильно стратифицированные среды, разработки безотражательных покрытий и др. Кроме того, рассмотренный эффект может быть полезен для интерпретации экспериментальных данных при наличии особенностей в наблюдаемых спектрах отражения и прохождения электромагнитных волн.

Использованный выше подход существенно дополняет другие методы нахождения точных решений для описания взаимодействия волн с неоднородными средами, изложенные, например, в работах [7-9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Электромагнитные волны в плазме. М.: Наука, 1970. 207 с.
2. Шварцбург А.Б. // УФН. 2000. Т.170. № 12. С.1297.
3. Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Ерохин Н.Н. Некоторые примеры точных решений математических моделей, описывающих колебания непрерывных сред. Препринт ИКИ РАН, Пр-2109, М.: 2005, - 14 с.
4. Лаговский Б.А. Поглощение и просветление плавно неоднородных покрытий для электромагнитных волн. // Радиотехника и электроника. 2006. Т.51. № 1. С.74.
5. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Распространение волн в магнитоактивной плазме. Л.: Изд-во ЛПИ, 1977. 79 с.
6. Kopecky V., Preinhaelter J. Linear Mode Conversion in an Inhomogeneous Magnetized Plasma. Praha: Ceskoslovenske Akademie VED, 1983. 98 p.
7. Ерохин Н.С. // УФЖ. 1969. Т.14. № 12. С.2059.
8. Ерохин Н.С. // Дифференциальные уравнения. 1970. Т.7. С.970.
9. Ерохин Н.С., Моисеев С.С. // ЖЭТФ. 1973. Т.65. Вып.4(10). С.1431.