

УДК 550.837

С.А. КОМАРОВ, К.В. МУЗАЛЕВСКИЙ

МЕТОД ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЗАДАЧЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ВИБРАТОРА В СЛОИСТОЙ СРЕДЕ

Вибраторы широко применяются в качестве излучателей электромагнитных волн радиодиапазона. Характеристики излучения тонких вибраторов обычно анализируют, сводя задачу к интегральным уравнениям Халлена и Понклингтона. Вместе с тем для решения внешних краевых электромагнитных задач развит метод дискретных источников (МДИ), который может дать экономию вычислительных ресурсов в подобных задачах. Воспользуемся МДИ для моделирования поля излучения вибратора при импульсном возбуждении плоскостойкой среды с частотной дисперсией.

Постановка проблемы и метод решения

Геометрия задачи изображена на рис 1. В декартовой системе координат (x, y, z) , плоскость $z = 0$ совпадает с границей раздела двух полупространств. Верхнее полупространство $z > 0$ однородное с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) $\epsilon_U(\omega)$, нижнее полупространство $z < 0$ представляет собой плоско-слоистый диэлектрик $\epsilon_L(z, \omega)$, ω – круговая частота электромагнитного поля. Слоистое пространство обладает частотной дисперсией. Центр цилиндрической антенны радиуса a и длиной L находится на высоте D от границы $z = 0$ и возбуждается в точке разрыва $(x = 0, y = 0, z = D)$ импульсным генератором, поле наблюдается поперек оси антенны на расстоянии $y = y_r$ на той же высоте.

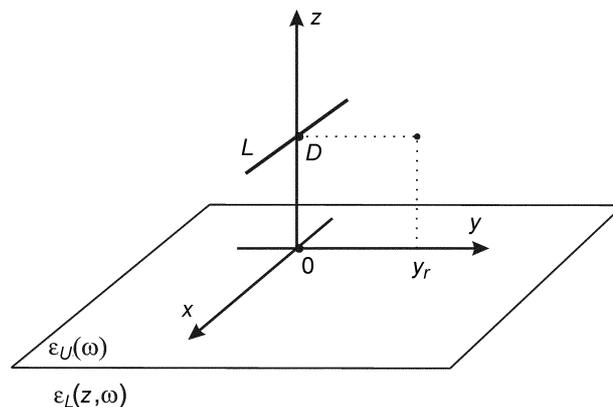


Рис. 1. Геометрия задачи. Вибратор и точка приёма расположены над слоистым полупространством на высоте $z = D$ в точках $y = 0$ и $x_r = 0, y = y_r$

Принимается физическая модель полого цилиндрического тонкого проводника. В отличие от работы [1], ток на поверхности вибратора определяется вспомогательными дискретными источниками (электрические диполи конечной длины), расположенными на оси проводника. Примем, что произвольный во времени электромагнитный процесс представляется с помощью преобразования Фурье в виде суперпозиции монохроматических составляющих, удовлетворяющих уравнениям Максвелла и изменяющихся во времени по закону $e^{-i\omega t}$. Спектр объемной плотности тока n -го дискретного источника, ориентированного вдоль орта e_x , выразим через дельта-функцию Дирака

$$j^e(x, y, z, \omega) = I_n(\omega)\Delta l \cdot \delta(x - x_n)\delta(y)\delta(z - D)e_x, \quad (1)$$

где Δl – длина элементарного диполя; $I_n(\omega)$ – спектральная амплитуда n -го элемента тока. Тогда отраженное спектральное поле в верхнем полупространстве $z > 0$ можно построить в виде пространственного спектра плоских волн вида

$$E_{x,n}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{8\pi^2} \frac{I_n(\omega)\Delta l}{\omega\epsilon_0\epsilon_U} \int_{-\infty}^{\infty} d\alpha_x d\alpha_y e^{i\alpha_x(x-x_n)+i\alpha_y y} \frac{e^{iw(z+D)}}{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \left[\alpha_x^2 R_{\parallel}(\alpha, \omega)w - \alpha_y^2 \frac{k_0^2 \epsilon_U(\omega)}{w} R_{\perp}(\alpha, \omega) \right], \quad (2)$$

где $w = \sqrt{k_0^2 \epsilon - \alpha_x^2 - \alpha_y^2}$ – поперечное волновое число; k_0 – волновое число в вакууме; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ с/(Ом·м) – диэлектрическая проницаемость вакуума; $R_{\perp, \parallel}$ – комплексные коэффициенты отражения, которые в случае произвольной слоистости находятся численно методом инвариантного погружения. Суммируя вклады каждого дипольного источника и удовлетворяя граничным условиям на поверхности иде-

ально проводящего проводника в точках коллокаций, можно получить систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных токов $I_n(\omega)$.

Численные результаты

Применим данную модель к зондированию границы $z = 0$ между нефтеносным $z > 0$ и водоносным $z < 0$ слоями нефтяного коллектора. КДП слоев определялась на основе рефракционной модели для дисперсных смесей [2, 3]. Вибратор возбуждается одним периодом синусоидального напряжения длительностью $\tau = 1,0$ нс. Использовались 70 точечных источников и 284 точки коллокаций. Длина антенны и радиус задавались $L = 0,15$ м и $a = 0,002$ м. На рис. 2 изображена форма отраженного импульса поля на различных расстояниях в нефтеносной среде. Значения ослабления потока энергии P в точке приема по результатам численного анализа аппроксимируются выражением $P = 1,7-71,3D$ (дБ), при среднеквадратичном отклонении 4,9. Принимая предельную чувствительность современных георадаров -140 дБ [4], можно сделать вывод, что использование наносекундных импульсов позволяет оценивать расстояние до границы в пределах $D \sim 1$ м.

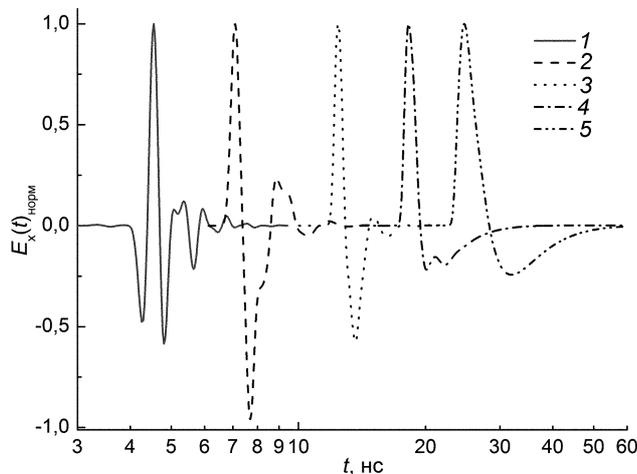


Рис. 2. Временная зависимость нормированной компоненты E_x поля: кр. 1 — падающий импульс и отраженные импульсы в точке наблюдения ($x = 0$ м, $y_r = 0,5$ м, $z = D$) на различных расстояниях от границы D , м: кр. 2 — 0,4, кр. 3 — 0,8, кр. 4 — 1,2, кр. 5 — 1,6

Заключение

В данной работе рассмотрено возбуждение цилиндрического вибратора наносекундным импульсом напряжения длительностью $\tau = 1,0$ нс. Антенна находится в слоистой диспергирующей среде, имитирующей нефтяной коллектор. Решение построено на основе метода дискретных источников для нестационарных полей. При распространении импульс теряет высокочастотную часть спектра, приобретая спадающую экспоненциальную форму со временем (рис. 2). Расчет полного потока энергии отраженного импульса показывает, что удельное затухание составило около $-71,3$ дБ/м, что позволяет современным георадарам зафиксировать отраженный сигнал в нефтеносной среде на расстояниях до 1 м от границы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaklamani D.I. and Anastassiou H.T. // IEEE Antennas Propagat. Magazine. — 2002. — V. 44. — No. 3. — P. 48–64.
2. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. — 2004. — V. 42. — No. 4. — P. 773–785.
3. Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. / Препринт 836Ф. — Красноярск, 2006. — 24 с.
4. Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю. // УФН. — 2000. — № 5. — С. 565–568.