

Применение метода поверхностных интегральных уравнений для решения задач подповерхностного зондирования

А.А. Комаров, В.А. Пермяков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14, E-mail: alex_alex_komarov@mail.ru, valerypermyakov@yandex.ru*

Изложено применение метода поверхностных интегральных уравнений для решения ключевой задачи подповерхностного зондирования – задачи дифракции на объекте, погружённом под поверхность земли, однородную, а в общем случае слоистую. Приведены результаты численных исследований дифракции плоской электромагнитной волны на идеально проводящем цилиндре, погруженном в диэлектрическое полупространство.

Implementation of the surface integral equation method for solution of the key problem of ground penetrating radar is described. Some numerical results of diffraction of a plane wave by a perfectly conducting cylinder buried beneath a dielectric surface are presented.

Введение

Радары подповерхностного зондирования [1,2] предназначены для мониторинга скрытых объектов, они позволяют осуществлять диагностику подземных коммуникаций, грунтов под строительные площадки, дорожных покрытий и взлетно-посадочных полос аэродромов, локальных неоднородностей в грунте, мин, утечек из подземных хранилищ топлива, уровня грунтовых вод, а также проведение геофизических, археологических и других исследований.

Ключевой задачей подповерхностной радиолокации является задача дифракции на объекте, погруженном под поверхность земли, однородную, а в общем случае слоистую. Поверхность может быть нерегулярной, а падающая волна, как правило, плоская.

На сегодняшний момент существует большое количество публикаций [1-6], в которых излагается множество различных подходов для решения широкого круга задач подповерхностного зондирования.

В докладе изложено применение метода поверхностных интегральных уравнений (ПИУ) для решения ключевой задачи подповерхностной радиолокации. При этом поверхность земли может быть как плоской, так и с неровностями.

1. Применение метода ПИУ для решения ключевой задачи подповерхностной радиолокации

Постановка ключевой задачи представлена на рис.1. Идеально проводящий цилиндр с произвольной формой поперечного сечения поверхности Σ_0 расположен под диэлектрической границей раздела. Полупространство ограничено поверхностью Σ_1 и характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Параметры внешней по отношению к границе раздела Σ_1 области V_2 характеризуются величинами $\epsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$ (свободное пространство). Первичные источники поля \mathbf{J}^n , \mathbf{M}^n расположены в области V_2 .

Система поверхностных интегральных уравнений, описывающая поставленную задачу, составляется по стандартной методике [7]. Проблема состоит в том, что в исходной системе ПИУ контур интегрирования по границе раздела является бесконечным. Это приводит к невозможности численного решения. Преодолеть возникшую трудность удаётся с помощью применения идеи П.Я. Уфимцева [8] о том, что поверхност-

ный ток можно представить в виде суммы равномерной (постоянной) и неравномерной (убывающей) составляющей.

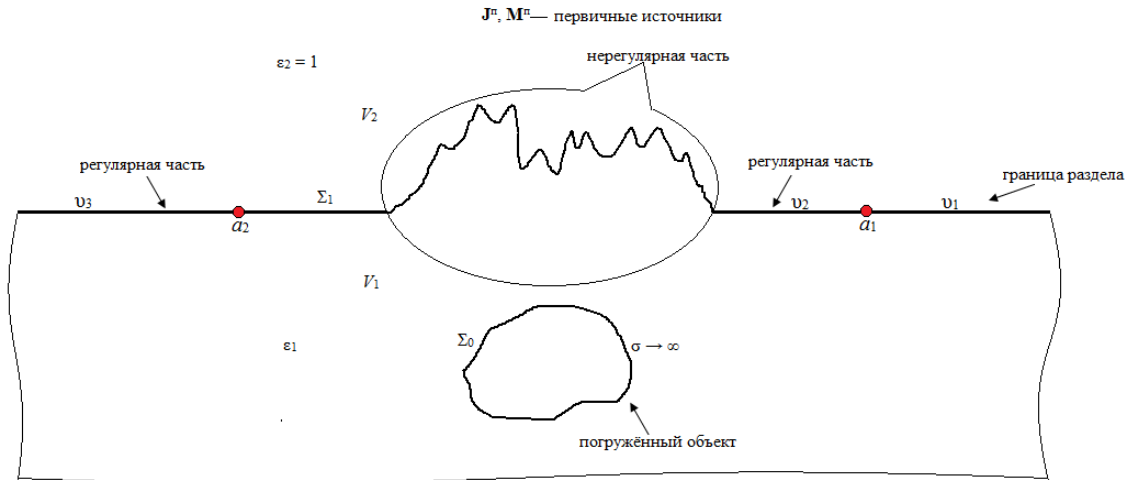


Рис.1. Постановка ключевой задачи

Равномерные составляющие токов определяются из задачи падения волны на плоскую границу раздела сред, т.е. могут быть вычислены аналитически и в этом смысле считаются известными. Неравномерные составляющие токов на поверхности Σ_1 обусловлены следующими факторами:

- 1) неровности на границе раздела;
- 2) наличие погруженного объекта.

Основное предположение [8, 9] заключается в том, что неравномерная составляющая поверхностных токов быстро убывает с увеличением расстояния от порождающего центра (неровности, погружённого объекта) и на больших расстояниях становится пренебрежимо малой по сравнению с равномерной составляющей.

Разобьём контур поперечного сечения границы раздела (рис.1) точками a_1 и a_2 на три части v_1 , v_2 и v_3 . При этом положения точек выбираем так, чтобы на участках v_1 и v_3 можно было пренебречь неравномерной составляющей поверхностного тока. Тогда исходная система ПИУ сводится к системе с конечным контуром интегрирования

$$I_0(v_0) + \int_{v_0} P(v_0, v'_0) I_0(v'_0) dv'_0 + \int_{v_2} Q(v_0, v'_2) I_1(v'_2) dv'_2 = -\Delta I_0(v_0);$$

$$\int_{v_0} T(v_2, v'_0) I_0(v'_0) dv'_0 + \tau I_1(v_2) + \int_{v_2} R(v_2, v'_2) I_1(v'_2) dv'_2 = 2I_1^p(v_2) - \Delta I_1(v_2),$$
(1)

где

$$\Delta I_0(v_0) = \int_{v_1} Q(v_0, v') I_1^0(v') dv' + \int_{v_3} Q(v_0, v') I_1^0(v') dv',$$

$$\Delta I_1(v_2) = \int_{v_1} R(v_2, v') I_1^0(v') dv' + \int_{v_3} R(v_2, v') I_1^0(v') dv'.$$
(2)

В (1) обозначено $I_0(v_0)$, $I_1(v_2)$, $I_1^p(v_2)$ – векторы-столбцы искоемых и первичных токов; $I_1^0(v_2)$ – равномерная составляющая тока; τ – диагональная матрица с главной диагональю $\{2, 2, 1 + \varepsilon_1, 1 + \varepsilon_1\}$; $R(v_2, v_2')$ – матричное ядро, учитывающее взаимодействие

токов на границе раздела Σ_1 ; $P(u_0, u_0')$ – матричное ядро, учитывающее взаимодействие токов на поверхности идеально проводящего цилиндра Σ_0 ; $Q(u_0, u_2')$ и $T(u_2, u_0')$ – матричные ядра, учитывающие взаимное влияние токов на поверхностях Σ_0 и Σ_1 .

Дополнительные члены в правой части системы (1), записанные в (2), представляют собой интегралы по полубесконечным интервалам от произведения равномерной части тока на соответствующие матричные ядра.

2. Результаты численных экспериментов

Была проведена серия расчётов для случая дифракции плоской электромагнитной волны на идеально проводящем круговом цилиндре, погруженном в диэлектрическое полупространство (рис.2). Расчёты проводились для Е- и Н-поляризации (вектор электрического/магнитного поля параллелен оси идеально проводящего цилиндра) падающего поля; диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon_1=2,55-i0,003$ (сухой песок), радиус цилиндра $r_0 = (0,5; 1,0; 1,5) \lambda_0$, глубина погружения $h=1,3 \lambda_0$.

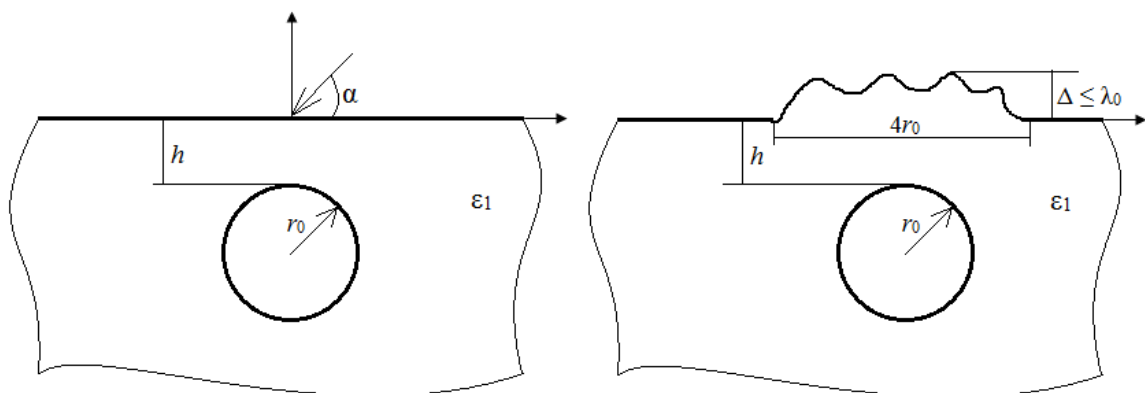


Рис.2. Дифракция плоской волны на идеально проводящем цилиндре, погруженном в диэлектрическое полупространство: слева - плоская граница, справа - с неровностями

На рис.3,4 представлены рассчитанные зависимости амплитуды отражённого поля в дальней зоне от угла наблюдения при нормальном падении плоской волны на гладкую границу раздела и на границу с неровностями в случае Е- и Н-поляризации.

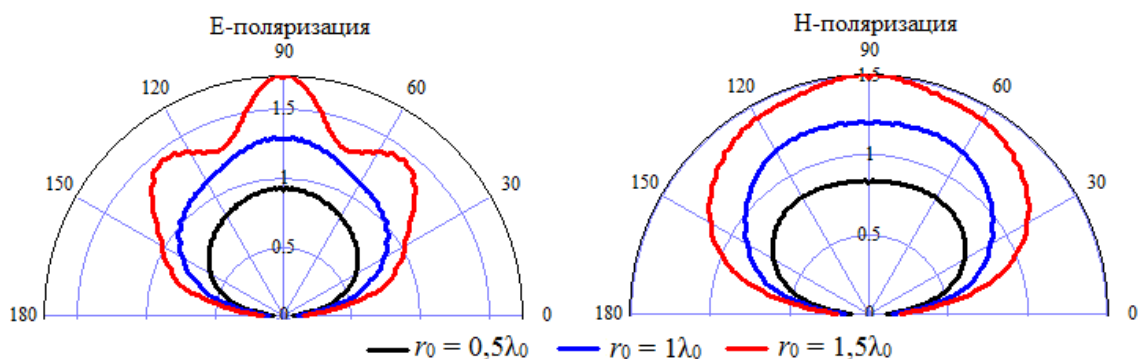


Рис.3. Диаграмма рассеянного поля при гладкой границе раздела ($\alpha = 90^\circ$)

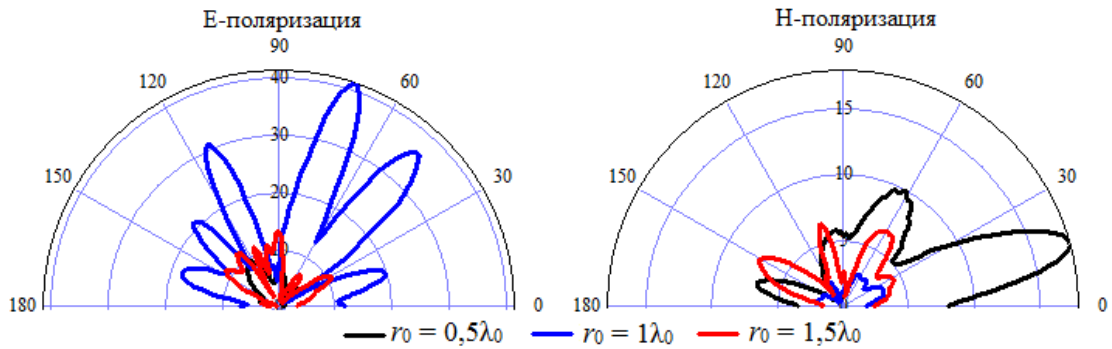


Рис.4. Диаграмма рассеянного поля с учетом неровностей ($\alpha = 90^\circ$)

Из анализа результатов, представленных на рис.3,4 видно, что при наличии неровностей сравнимых с длиной волны диаграммы рассеяния принимают многолепестковый характер. Связано это с трансформацией полей неровностями на границе раздела.

На рис.5 представлено сравнение результатов расчёта эффективной площади обратного рассеяния (ЭПР) идеально проводящего цилиндра от глубины его погружения в диэлектрическое полупространство с гладкой границей по методу ПИУ с приближением метода геометрической оптики из [6].

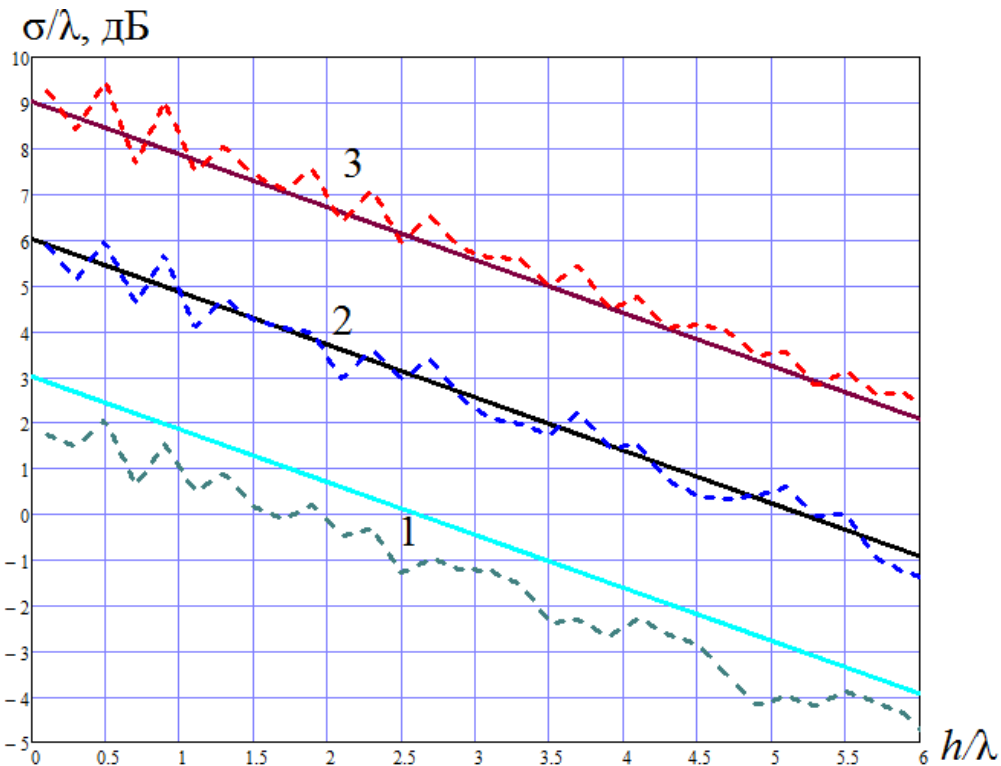


Рис.5. Зависимость ЭПР идеально проводящего цилиндра от глубины его погружения в диэлектрическое полупространство. Е-поляризация. Сплошная линия – приближение геометрической оптики, штриховая – метод ПИУ. 1 – $r_0 = 1\lambda_0$, 2 – $r_0 = 2\lambda_0$, 3 – $r_0 = 4\lambda_0$

Видно, что при увеличении радиуса цилиндра уровень ЭПР возрастает. При увеличении глубины погружения цилиндра в полупространство наблюдается ослабление отражённого сигнала. Приближение геометрической оптики качественно правильно описывает исследуемый процесс.

Заключение

Представлено применение метода ПИУ для решения ключевой задачи подповерхностной радиолокации – задачи дифракции на объекте, погруженном под поверхность земли. При этом поверхность земли может быть как плоской, так и с неровностями. Это позволяет моделировать задачи рассеяния, приближённые к реальным условиям.

Проведённые расчёты показывают, что наличие неровностей на границе раздела, сравнимых с длиной волны, приводит к многолепестковому характеру рассеянного поля в дальней зоне.

Показано, что уровень ЭПР идеально проводящего цилиндра, погружённого в диэлектрическое полупространство, увеличивается при возрастании радиуса цилиндра и спадает при увеличении глубины погружения цилиндра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1729).

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. /Под ред. А.Ю.Гринева. –М.: Радиотехника, 2005, 416 с.
2. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications // Editor Harry M. Jol, First edition, 2009, Elsevier Science.
3. Cui, T. J. and W. C. Chew Novel diffraction tomographic algorithm for imaging two-dimensional dielectric objects buried under a lossy earth // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 4, 2033–2041, July 2000.
4. Cui, T. J., W. C. Chew, A. A. Aydinler, and S. Y. Chen Inverse scattering of two dimensional dielectric objects buried in a lossy earth using the distorted born iterative method // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 2, 339–345, Feb. 2001.
5. Lawrence D.E., Sarabandi K. Electromagnetic scattering from a dielectric cylinder buried beneath a slightly rough surface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 50, no. 10, 2002, pp. 1368-1376.
6. Пермяков В.А., Владимиров Л.М. Новый подход к решению спектральным методом задачи дифракции электромагнитной волны на круговом цилиндре, находящемся в диэлектрическом полупространстве с потерями // Вестник МЭИ, 2009, №1, с. 32-37.
7. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. Метод интегральных уравнений в задачах дифракции на полубесконечных диэлектрических структурах. Препринт № 25(397), -М.: ИРЭ РАН СССР, 45 с.
8. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. Радио, 1962, - 243 с.
9. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрическом клине. //Известия ВУЗов, Радиофизика, 1974, т. 17, № 10, с. 1518-1528.