

СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ (СЛОИСТЫХ) СРЕД С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Судакова Мария Сергеевна

Геологический ф-т МГУ, Москва, maria_sudakova@mail.ru

Проблема получения физических свойств и параметров строения сложно построенной среды по измеренным эффективным значениям физических полей – это одна из основных проблем геофизики. Эти вопросы возникают и в георадиолокации, когда по результатам измерения характеристик поля электромагнитных волн необходимо определить ряд физических параметров геологического разреза, например влажность. Причём широко используемые аналитические зависимости между характеристиками поля и параметрами среды не дают удовлетворительных результатов или дают их только в частных случаях [4, 5, 7]. К тому же, в георадиолокации наблюдается острая нехватка данных прямых измерений. Существует необходимость массовых измерений диэлектрических свойств геологических сред (диэлектрической проницаемости (скорости распространения электромагнитной волны), параметров поглощения) в диапазоне частот, используемом в георадиолокации (50МГц до 2ГГц).

Традиционно в лабораторных условиях диэлектрические свойства измеряются с помощью специализированной аппаратуры, на образцах, много меньших, чем структурные единицы разреза, и зачастую на более высоких частотах, чем диапазон георадиолокации [3, 5,6]. Отсутствие промышленно выпускаемых специализированных приборов для диэлектрических измерений на образцах геологических сред в лабораториях заставляет исследователей пользоваться разнообразными собственными разработками и действующими макетами устройств. Альтернативой этим методам является метод измерения диэлектрических свойств стандартным георадаром, выпускаемым серийно, используемым в полевых работах. В качестве информационного сигнала при таких измерениях могут быть использованы волны, отражённые от противоположной прибору грани образца (при вертикальном расположении установки – от дна или «подошвы» образца). Измерения можно вести с помощью самой высокочастотной антенны из набора антенн любого неспециализированного георадара (ОКО-2, Зонд-12Е, Sir-2000). Этот способ лабораторных измерений описан в работе [2].

Данная работа посвящена краткому анализу аналитических зависимостей диэлектрической проницаемости эффективных сред от диэлектрических проницаемостей составляющих, сравнению с результатами измерений на физических моделях слоистых сред с контрастными и неконтрастными свойствами слоёв, оценке погрешности измерений. В экспериментах

использовался георадар «ОКО-2» отечественного производства с центральной частотой антенны 1700МГц в воздухе.

Для расчета диэлектрической проницаемости композита были использованы следующие зависимости: формула Беренцвейга, формула Лихтенеккера, аппроксимация параллельным и последовательным соединением импедансов.

Наиболее часто используемой [4] является формула Беренцвейга.

$$e_{\text{смеси}} = e_{\text{среднее}} + \sum_i \frac{V_i (e_i - e_{\text{среднее}})}{(e_i + 2e_{\text{среднее}})}, \quad e_{\text{среднее}} = \sum_i V_i * e_i$$

Для случая статистической смеси из n компонентов применяется формула Лихтенеккера:

$$\lg e_{\text{смеси}} = \sum_i V_i \lg e_i [7]$$

Большинство других формул сводится к расчету диэлектрической проницаемости модели вида (рис.1), предельными случаями которой являются аппроксимации параллельным (a=0) или последовательным (a=1) соединением импедансов.

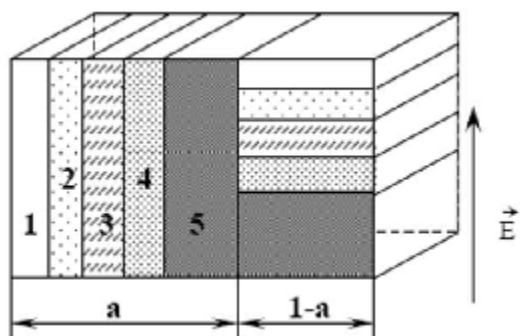


Рис.1. Представление емкостной модели грунта [1].

Были физически смоделированы 2 слоистые среды: модель 1, состоящая из слоёв с близкими значениями диэлектрической проницаемости и модель 2, состоящая из слоёв, диэлектрическая проницаемость которых отличается в несколько раз. Примером таких сред может служить многолетнемерзлая глинистая порода слоистой текстуры с прослоями льда при температуре в состоянии «холодной» и «тёплой» мерзлоты.

Модель 1 (слои слабоконтрастны): песчано-суглинистая слоистая среда, состоящая из прослоев влажного моренного суглинка и песка при полной влагонасыщенности (30%). Скорость в песке 6,8 см/нс; в суглинке – 6,35 см/нс. В полученной слоистой модели 10 слоёв песка, общей мощностью 11см, и 10 слоёв глины, общей мощностью 13, 5 см, высота прослоев 1-2 см. Доля песка: 47%. Модель 2 (контрастные слои): среда, состоящая из низкоскоростных слоёв моренного суглинка и высокоскоростных слоёв поликарбонатной решётки, наполненной воздухом (в дальнейшем – «воздух»). Скорость в поликарбонатной решётке 29 см/нс; в суглинке – 5,15 см/нс. В слоистой модели по 7 слоёв

суглинка и поликарбонатной решётки (7см решётки, слои по 1 см, 11 см суглинка, слои по 1-2см). Доля суглинка: 60%.

Измерения времени прихода отражённой волны для большей точности проводилось на нескольких базах: модель 1 - 18см, 20см и 23см; модель 2 – 11,5 см и 18см. Также измерения на разных базах дают возможность рассчитать параметры поглощения среды (выходит за рамки данной работы).

Графики зависимостей диэлектрической проницаемости моделируемых сред от диэлектрических проницаемостей составляющих представлены на рис. 2 (Модель 1) и рис.3 (Модель 2); измеренные значения обозначены звёздочками.

Как видно на рис. 2, нет большой разницы между расчетными значениями, полученными по разным формулам; чем больше доля песка (более скоростной составляющей), тем больше разница между меньшим и большим расчетными значениями. Средняя скорость в слоистой модели по измерениям на разных базах – 6, 5см/нс. Полученное значение выходит за пределы приведённых на рис.4 формальных оценок, самой близкой зависимостью является параллельное соединение импедансов.

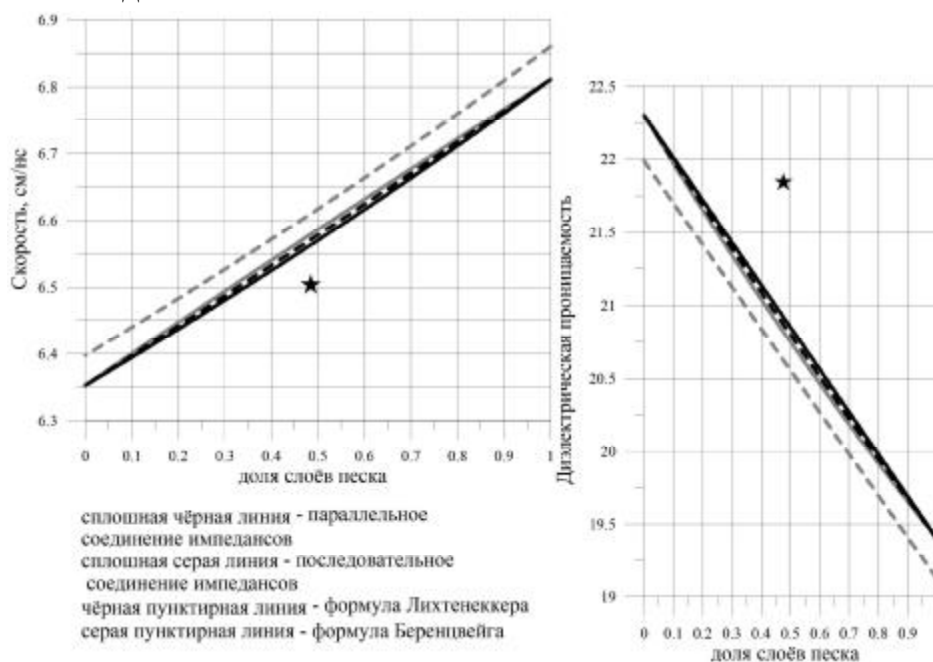


Рис. 2. Графики аналитических зависимостей диэлектрической проницаемости суглинисто-песчаного композита от доли песка в нём.

На рис. 3 разница между расчетными значениями очень велика, соответствия между зависимостями не наблюдается. Средняя скорость в слоистой модели по измерениям на разных базах – 10см/нс. Это значение находится в пределах, определяемых аппроксимациями параллельным и последовательным соединением импедансов и ближе всего к значению, рассчитанному по формуле Лихтенеккера – зависимости для статистических смесей.

Полученные радарограммы представлены на рис. 4 (Модель 1) и рис. 5 (Модель 2). На рис. 4 пунктирной чертой показано время прихода отражённого сигнала. На рис. 5. видна интерференция отражённого сигнала с сигналом прямого прохождения, скорость в слоистой модели была рассчитана с использованием разницы времён прихода кратных волн.

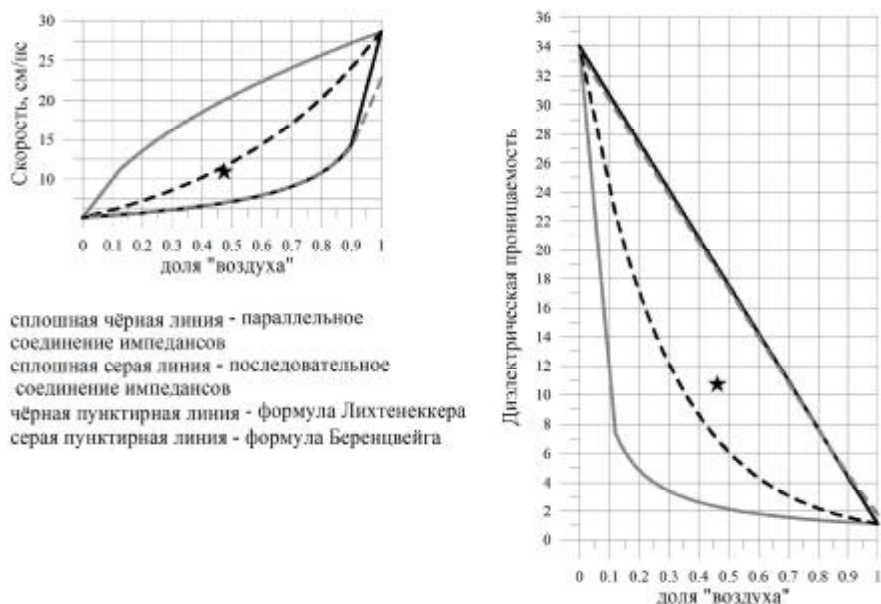


Рис. 3. Графики аналитических зависимостей диэлектрической суглинисто-«воздушного» композита от доли «воздуха».

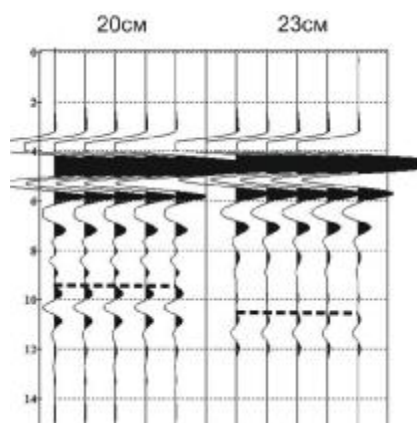


Рис. 4. Георадиолокационная запись, полученная для модели суглинисто-песчаной слоистой среды.

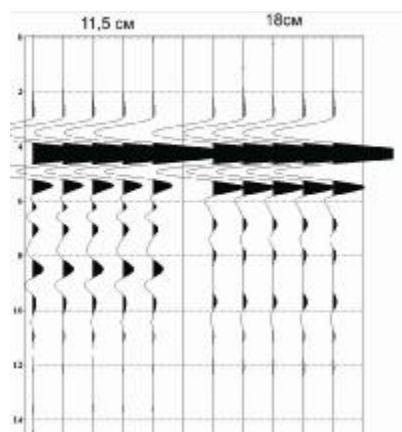


Рис. 5. Георадиолокационная запись, полученная для модели слоистой среды суглинок-«воздух».

Среднеквадратическая погрешность в определении скорости электромагнитной волны в модели №1 составила 0.06 см/нс, т.е. 1%. Среднеквадратическая погрешность в модели №2 составила 1 см/нс, т.е. 10%.

Такая разность в погрешностях объясняется тем, что в низкоскоростных моделях разрешить отражённый сигнал от сигнала прямого прохождения намного проще, а для высокоскоростной модели пришлось использовать кратные волны.

Выводы: 1) Для эффективной среды, состоящей из слабоконтрастных компонент, рассмотренные зависимости дают примерно одинаковый результат. Однако, этот результат в пределах погрешности отличается от измеренных в лаборатории значений эффективных времен пробега волн (скоростей и диэлектрических проницаемостей соответственно). 2) Для эффективной среды, состоящей из контрастных компонент, рассмотренные зависимости дают существенно различные результаты и прямое их использование затруднительно. Но измеренное значение находится внутри рамок, определённых параллельным и последовательным соединениями импедансов.

Литература:

1. Бобров П., Галеев О., Исследование метода определения диэлектрической проницаемости почв по модулям коэффициента отражения и прохождения, Естественные науки и экология, Межвузовский сборник научных трудов, Вып. 6 – Омск: Изд-во ОмГГУ, 2001. с.7-10.
2. Владов М.Л., Судакова М.С., Диэлектрические измерения в лабораторных условиях с использованием георадара., в печати.
3. Ильин В., Слободчикова С., Эткин В., Лабораторные исследования электрофизических характеристик мёрзлых песчаных почв. М., ИКИ, 1994, 30с.
4. Лещанский Ю.И. Георадиолокация и одностороннее радиопросвечивание грунтов и сред с поглощением: Автореф. дис. д-ра техн. наук в форме науч. доклада: 05.12.04 / Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации. - М., 1998. - 48 с.
5. Фролов А., Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов, Пушино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515с.
6. Щербаченко Л., Карнаков В., Марчук С., Исследование комплексной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков при радиочастотах: Методические рекомендации, Иркутск: ИГУ, 2005. - 15 с.
7. Martinez A. and Byrnes A., Modeling Dielectric-constant values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation, Current Research in Earth Sciences, Bulletin 247, part 1, 2001.