

УДК 537.226.1, 621.396.96

М.А. Иноземцев

Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород

Рассмотрены электрофизические характеристики горных пород и их влияние на результаты георадиолокационных измерений. Приведены основные способы измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов, используемые в диапазоне частот георадиолокации.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, измерительная ячейка, георадар, горные породы.

Развитие технологий подповерхностной радиолокации, связанное с совершенствованием элементной базы и вычислительной техники, способствовало широкому применению радаров подповерхностного зондирования (георадаров) в различных областях науки и техники. В настоящее время георадары применяются при решении задач, связанных с исследованием структуры грунтовых массивов, при выполнении геофизических и других работ. Находят применение георадары при эксплуатации подземных горных выработок. В частности, с их помощью возможно решать задачи по обнаружению неоднородностей, разуплотнений грунта, обводненных слоев, выполнять зондирование впереди забоя горной выработки [1]. Таким образом, применение георадаров позволяет осуществлять контроль состояния горной выработки.

Принцип работы радаров подповерхностного зондирования (георадаров) основан на излучении в исследуемое пространство сверхширокополосных зондирующих сигналов и последующей регистрации волн, отраженных от границ разделов сред с различными электрофизическими параметрами, или волн, отраженных от каких-либо неоднородностей. Особенностью применения таких радаров является распространение электромагнитных волн в средах со значительным затуханием.

Распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в пространстве описывается уравнениями Максвелла, а параметры среды характеризуются значениями относительной диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей, удельной электрической проводимостью (σ). Эти величины связаны с характеристиками поля материальными уравнениями:

$$\vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \vec{D}, \quad (1)$$

$$\vec{H} = \mu \mu_0 \vec{B}, \quad (2)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (3)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м; D – электрическая индукция, Кл/м²; H – напряженность магнитного поля, А/м; B – индукция магнитного поля, Тл; ϵ_0 , μ_0 – соответственно электрическая и магнитная постоянные.

При использовании георадара для контроля состояния горной выработки основной средой распро-

странения радиоволн являются горные породы. Как правило, их можно отнести к классу диэлектриков с некоторой конечной проводимостью. Характеристикой диэлектриков в переменном электромагнитном поле является диэлектрическая проницаемость, которая в общем случае является комплексной величиной:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (4)$$

где ϵ' – действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика; ϵ'' – мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота колебания, рад/с.

Электрофизические характеристики распространения электромагнитных волн определяют скорость их распространения и величину затухания в конкретной среде. Скорость распространения электромагнитной волны является важным параметром при георадиолокационных исследованиях, так как отраженные волны возникают на границах сред с различными скоростями волн в них [1]. Поскольку магнитная проницаемость большинства горных пород близка к единице и влияния на распространение поля практически не оказывает, скорость распространения электромагнитных волн определяется выражением

$$v = \frac{c}{\text{Re} \sqrt{\hat{\epsilon}}}, \quad (6)$$

где c – скорость распространения ЭМВ в вакууме, м/с.

От скорости ЭМВ зависит и разрешающая способность волновых методов [1], которая определяется длиной волны в среде:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f \cdot \text{Re} \sqrt{\hat{\epsilon}}}, \quad (7)$$

где f – частота колебаний электромагнитного поля, Гц.

Второй не менее важный параметр – глубина зондирования. Она зависит от затухания электромагнитных волн в среде, которое связано с диэлектрической проницаемостью соотношением

$$A = \frac{54,6}{\lambda} \text{Re} \sqrt{\hat{\epsilon}}. \quad (8)$$

Таким образом, электрофизические параметры среды распространения зондирующего импульса, наряду с конкретными техническими характеристиками радара, определяют возможность его применения для георадиолокационных исследований.

Как отмечено в [2], неточное знание диэлектрической проницаемости и проводимости в интересующем диапазоне глубин зондирования приводит к появлению ошибок в определении амплитуд отраженных сигналов и глубин, на которых находятся отражающие границы слоев. Для получения более точных результатов необходимо наличие значений диэлектрической проницаемости для всех слоев исследуемого грунта или горных пород. Однако в большинстве случаев распределение диэлектрической проницаемости по глубине неизвестно, и при обработке данных георадиолокации используется некоторая средняя величина диэлектрической проницаемости, что и приводит к ошибкам определения местоположения слоев по глубине.

Электрофизические свойства горных пород имеют достаточно сложную зависимость от частоты переменного электромагнитного поля, плотности, влажности, температуры и других факторов и в общем случае могут различаться даже в пределах одного района. Сильное влияние на электрофизические характеристики оказывает влажность. Так, наличие 0,1% влаги в апатите повышает его диэлектрическую проницаемость на 8% [3]. Кроме того, горные породы являются анизотропными неоднородными средами, что также оказывает влияние на распространение электромагнитных волн в их объеме и значительно усложняет определение их электрофизических характеристик. Стоит отметить, что ввиду многообразия факторов, влияющих на электрофизические параметры, в справочной литературе, как правило, приводятся их некоторые усредненные значения. В ряде источников для некоторых горных пород приводятся сведения о зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости горных пород от влажности и частоты, но зачастую этих данных оказывается недостаточно. Рядом авторов в своих работах предложены эмпирические закономерности, связывающие электрофизические параметры горных пород с другими величинами, в частности, с плотностью материала, однако данные зависимости не обладают универсальностью. В связи с этим становится актуальным вопрос о проведении измерений электрофизических характеристик горных пород в диапазоне частот георадиолокации для последующего использования полученных данных при георадарных исследованиях горных выработок.

Измерениям электрофизических свойств горных пород посвящено значительное количество литературы, научных трудов и публикаций, выполненных как отечественными [4], так и зарубежными [5] авторами.

Отдельной задачей является исследование анизотропии горных пород и ее влияние на электрофи-

зические характеристики. Этот вопрос имеет также большое практическое и теоретическое значение, поскольку многие горные породы обладают слоистым строением, что сказывается на их характеристиках. Методы определения параметров анизотропной среды приведены в работе [6].

В настоящее время известен ряд методов измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) материалов. В соответствии с [7], методы измерения КДП можно разделить на ряд групп: резонансные, коаксиальные и волноводные, широкополосные, измерения во временной области, методы, основанные на использовании волн в свободном пространстве. Основным фактором, влияющим на выбор метода, является частота электромагнитного поля, на которой проводятся измерения.

Конденсаторный метод, являющийся разновидностью резонансных методов, предполагает использование измерительного конденсатора, состоящего из двух обкладок цилиндрической формы, пространство между которыми заполняется диэлектриком. Изменение емкости конденсатора будет зависеть от свойств материала. Данный метод применяется для измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ в диапазонах частот от сотен герц до единиц мегагерц. Для проведения измерений необходимо подготовить образец чаще всего в виде цилиндрической или плоской формы и поместить его между обкладками измерительного конденсатора. Измеряемыми величинами в данном случае могут быть значение импеданса цепи, добротность колебательного контура, образованного измерительным конденсатором и эталонной катушкой индуктивности. Находит применение также мостовой метод определения емкости. В качестве измерительного оборудования используются измерители R , L , C , измерители добротности (куметры), измерительные мосты. Основной недостаток метода – нарушение структуры материала при подготовке образца для измерений. Точность резонансных методов обычно составляет от 1 до 10% [8].

В области частот от 0,1 до 100 МГц возможно применение резонансного метода, принцип которого основан на измерении параметров колебательного контура, образованного эталонной катушкой индуктивности и измерительным конденсатором.

В диапазонах частот от 100 МГц и более для определения КДП используются волноводные методы. Их использование предполагает измерение параметров линий передачи, представляющих собой заполненные исследуемым материалом отрезки коаксиальных линий, волноводов круглого и прямоугольного сечений, объемные резонаторы [8, 9]. Линии снабжены соединителями для подключения измерительных приборов, в качестве которых в настоящее время используются векторные или скалярные анализаторы цепей. Для вычисления КДП материала производится измерение параметров матриц рассеяния (S -параметров). Также существуют методы, основанные на использовании микрополосковых линий. Коаксиальные методы применяются для изме-

рения КДП в диапазонах частот 0,05–20 ГГц [7, 8]. Прямоугольные и круглые волноводы целесообразно применять для измерения КДП материалов в диапазоне частот свыше 1 ГГц, что обусловлено значительными геометрическими размерами волноводов на более низких частотах. Метод вычисления КДП на основе измерения S -параметров подробно описан в работе [5]. Как отмечается в [8], точность измерения диэлектрической проницаемости коаксиальными и волноводными методами может составлять 1–3%, но коаксиальный метод может быть неудобен для измерения твердых материалов, так как не всегда обеспечивается достаточный контакт исследуемого материала с внутренним и внешними проводниками ячейки.

Рассмотренные выше методы обладают существенным недостатком – из-за нарушения естественной структуры материала при подготовке образцов данные, полученные в результате лабораторных исследований, могут отличаться от значений КДП в условиях естественного залегания горных пород. В связи с этим актуально измерение параметров горных пород в условиях естественного залегания. Как отмечается в [8], для этого предлагается вводить в грунт отрезок двухпроводной линии, состоящей из металлических штырей, и путем измерения комплексного коэффициента отражения рассчитать значение КДП либо использовать специальную конструкцию измерительной ячейки, не нарушающую структуру измеряемого материала (почвы). Также рядом авторов предложено выполнять измерения с использованием коаксиальной линии с открытым концом, с использованием рупорных и линзовых антенн или антенных решеток [8]. Несмотря на преимущества перечисленных методов, которые можно считать неразрушающими, они позволяют определять КДП материалов поверхности или близлежащих к ней слоев. Если же речь идет об измерении КДП горных пород, расположенных на некоторой глубине, то данные методы оказываются неприемлемыми.

Значение диэлектрической проницаемости горных пород косвенно можно определить непосредственно из георадиолокационных измерений. С этой целью проводят последовательное увеличение расстояния между передающей и приемной антеннами в диапазоне от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Такой способ позволяет получить зависимость времени прихода сигналов, отраженных от границ слоев, от расстояния между антеннами, и, на основании полученных результатов определить скорости распространения волн в средах, из которых можно рассчитать значение диэлектрической проницаемости. Однако ввиду значительной трудоемкости таких работ данный метод не нашел широкого применения [10].

Таким образом, задача по определению электрофизических параметров горных пород является актуальной в связи с имеющейся потребностью таких данных при георадиолокационном исследовании массивов горных пород, поэтому выбор соответствующей методики позволит получить наиболее достоверные и полные результаты.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005 (сер. «Радиолокация»). – 416 с.
2. Изюмов С.В. Теория и методы георадиолокации : учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М.: Горная книга. Изд-во Моск. гос. горного ун-та. – 2008. – 196 с.
3. Финкельштейн М.И. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпужин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; под ред. М.И. Финкельштейна. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
4. Эпов М.И. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц / М.И. Эпов, В.Л. Миронов, П.П. Бобров, И.В. Савин, А.В. Репин // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 5. – С. 613–618.
5. Backer-Javis J. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method J. Backer-Javis, E.J. Vanzura, W.A. Kissick // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – Vol. 38, No. 8. – P. 1096–1103.
6. Редозубов А.А. Специальный курс электроразведки: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 416 с.
7. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. – Казань, Казан. гос. ун-т, 2008. – 112 с. – URL: https://kpfu.ru/docs/F312491640/gusev_diel_spectrosc.pdf (дата обращения: 05.09.2020).
8. Родионова О.В. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Омск. гос. пед. ун-т. – Омск, 2016. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000536515> (дата обращения: 05.09.2020).
9. Молостов И.П. Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости / И.П. Молостов, В.В. Щербинин. Текст : непосредственный // Изв. Алт. гос. ун-та. – 2015. – № 1-2. – С. 56–60.
10. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.

Иноземцев Максим Александрович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Эл. почта: ma87@sibmail.com