

Определение свойств грунта георадиолокационным методом

Хакиев З.Б., РГУПС, zhakiev@yandex.ru

Рассмотрены некоторые возможности количественной интерпретации результатов георадиолокационных обследований. Обоснован выбор количественной характеристики георадиолокационных трасс, несущей информацию о электрических свойствах исследуемого грунтового слоя. Исследована ее зависимость от влажности грунтовой среды компьютерными и экспериментальными методами. Предложена методика определения влажности и засоренности слоев грунтов проводящими включениями в режиме реального времени.

В современной практике все чаще используется диагностика состояния объектов инженерной инфраструктуры неразрушающими геофизическими методами. Данной проблеме посвящен ряд научных конференций, например [1, 2].

Среди таких геофизических методов можно выделить георадиолокацию [3] как экспресс-метод, позволяющий получать непрерывную информацию в форме, удобной для обработки в режиме реального времени [4]. Георадиолокация сегодня применяется для решения широкого спектра задач: от оконтуривания месторождений [5] – до диагностики состояния элементов инфраструктуры инженерных и транспортных объектов [6].

Применение метода георадиолокации может осуществляться при непосредственном контакте антенных блоков с исследуемой средой [7]. Вместе с этим, для повышения скорости проведения георадиолокационных обследований георадары устанавливаются на автомобили [8], вагоны [9-10] и летательные аппараты [11]. Актуальность таких исследований в интересах железнодорожного транспорта определяется в последнее время высокими требованиями к качеству железнодорожного пути, что связано с ростом скорости движения и массы поездов. Достижение поставленной цели базируется на создании георадиолокационной аппаратуры, способной эффективно противодействовать помехам от железобетонных шпал и элементов инфраструктуры современного железнодорожного пути [12,13]. Вместе с этим методики обработки георадарограмм, позволяющие получить информацию о состоянии обследуемого объекта (влажность, плотность, загрязнение балластного слоя и др.) требуют дальнейшего развития.

Данная работа посвящена созданию методик количественной интерпретации результатов георадиолокационных обследований, позволяющей определять такие характеристики грунтов, как влажность и засоренность проводящими включениями.

1. Количественная оценка георадиолокационной информации. Распространяясь в среде, импульс электромагнитного излучения затухает. Рассеянное излучение может частично достигать приемной антенны, в результате чего на ее входных цепях наводится напряжение

$U = U(t)$, несущее информацию о рассеивающей среде [3]. После его программно-аппаратной обработки формируется георадиолокационная трасса, представляющая собой экспериментальный сигнал, пропорциональный алгебраическому значению напряжения на активном сопротивлении входных цепей от времени (рис. 1, сплошная линия).

Назовем отражательной способностью слоя грунта (Σ_m) интегральную характеристику, определенную суммированием значений георадиолокационной трассы ($F(t)$) за время t_m , которое требуется импульсу электромагнитного излучения для того, чтобы

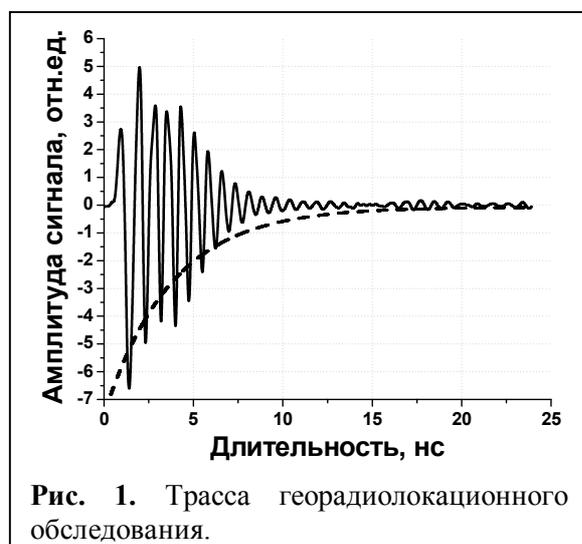


Рис. 1. Трасса георадиолокационного обследования.

пройти сквозь слой грунта:

$$\Sigma_m = \int_0^{t_m} F(t) dt .$$

Введем относительную отражательную способность выделенного слоя грунта соотношением:

$$\tilde{\Sigma}_m = \frac{\Sigma_m}{\Sigma_\infty} = \frac{\int_0^{t_m} F(t) dt}{\int_0^\infty F(t) dt} , \quad (1)$$

где $\tilde{\Sigma}_m$ - относительная отражательная способность, за начало отсчета времени выбран момент пересечения фронтом импульса электромагнитного излучения верхней границы исследуемого грунтового слоя.

Для квазиоднородного грунта, например щебеночных или песчаных слоев, формирующих железнодорожный путь, трасса (рис. 1) может быть представлена в виде:

$$F(t) = f(t)e^{-\alpha t} , \quad (2)$$

где $f(t)$ – сигнал в отсутствие затухания, α – коэффициент, характеризующий затухание в данной среде. Модулирующая экспонента из (2) при $\alpha = 0,3$ приведена на рис. 1 штриховой линией.

Применяя к функции $f(t)$ обратное синус-преобразование Фурье, получим:

$$f(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty f(\omega) \sin(\omega t + \varphi_0) d\omega , \text{ где } \varphi_0 - \text{ начальная фаза.}$$

Тогда трасса $F(t)$ примет вид

$$F(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty f(\omega) e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi_0) d\omega . \quad (3)$$

Таким образом, для определения относительной отражательной способности необходимо вычислить выражение:

$$\tilde{\Sigma}_m = \frac{\int_0^{t_m} \int_0^\infty e^{-\alpha t} f(\omega) \sin(\omega t + \varphi_0) dt d\omega}{\int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\alpha t} f(\omega) \sin(\omega t + \varphi_0) dt d\omega} , \quad (4)$$

где $f(\omega)$ и $f^\circ(\omega)$ соответственно спектральные функции сигнала от среды и сигнала от исследуемого слоя.

Рассмотрим случай, когда функция $f(t)$ из (2) близка по форме к синусоиде с частотой ω_0 . В этом случае спектральное распределение в (3) можно представить в виде $f(\omega) = f_{\omega_0} \delta(\omega - \omega_0)$, где δ - обобщенная дельта-функция Дирака. Одновременно с этим, сигнал от исследуемого слоя ограничен во времени и будет характеризоваться другим спектральным распределением. Предположим, что для этого слоя также справедливо представление: $f^\circ(\omega) = f_{\omega_0}^\circ \delta(\omega - \omega_0)$.

Тогда (4) принимает вид:

$$\tilde{\Sigma}_m = C \frac{\int_0^{t_m} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) dt}{\int_0^\infty e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) dt} , \quad (5)$$

$$C = \frac{f_{\omega_0}^{\circ}}{f_{\omega_0}}.$$

Проводя вычисления в (5) имеем:

$$\tilde{\Sigma}_m = C(1 - e^{-\alpha t_m} \left\{ \frac{\alpha - \omega_0 t g(\varphi_0)}{\omega_0 + \alpha t g(\varphi_0)} \sin(\omega_0 t_m) + \cos(\omega_0 t_m) \right\}) \quad (6)$$

Выражение (6) при параметрах $C = 1$, $\alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_0 = 2\pi\nu$, где $\nu = 1700 \text{ МГц}$, полученных для георадиолокационной трассы, изображенной на рис. 1, приведено на рис. 2 сплошной линией. Начальная фаза φ_0 выбрана из условия $\omega_0 t + \varphi_0 = 0$ в момент времени, когда трасса (рис. 1) начинает регистрироваться приемной аппаратурой. На этом же рисунке штриховой линией приведены результаты расчета по формуле (4) для случая, когда спектральные функции $f(\omega)$ и $f^{\circ}(\omega)$ аппроксимированы функциями Гаусса с шириной на половине высоты, равной $\sigma = 600 \text{ МГц}$. Это значение получено для сигнала, представленного на рис. 1.

Видно, что поведение относительной отражательной способности носит осциллирующий характер. Это затрудняет использование выражений (4) и (6) в инженерных методиках.

Переопределим отражательную способность Σ_m слоя грунта интегрированием абсолютных значений точек трассы $F(t)$. Тогда выражения (1) и (4) примут вид:

$$\tilde{\Sigma}_m = \frac{\Sigma_m}{\Sigma_{\infty}} = \frac{\int_0^{t_m} |F(t)| dt}{\int_0^{\infty} |F(t)| dt},$$

$$\tilde{\Sigma}_m = \frac{\int_0^{t_m} e^{-\alpha t} \left| \int_0^{\infty} f(\omega)^{\circ} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) d\omega \right| dt}{\int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \left| \int_0^{\infty} f(\omega)^{\circ} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) d\omega \right| dt}.$$

В случае, когда функция $f(t)$ близка по форме к синусоиде с частотой ω_0 имеем представления:

$$f(\omega) = f_{\omega_0} \delta(\omega - \omega_0), \quad f^{\circ}(\omega) = f_{\omega_0}^{\circ} \delta(\omega - \omega_0).$$

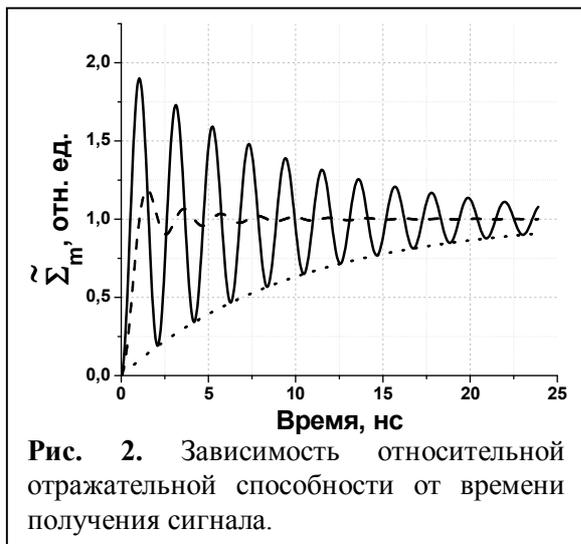
Тогда для (7) получаем:

$$\tilde{\Sigma}_m = C \frac{\int_0^{t_m} e^{-\alpha t} |\sin(\omega_0 t + \varphi_0)| dt}{\int_0^{\infty} e^{-\alpha t} |\sin(\omega_0 t + \varphi_0)| dt},$$

$$C = \frac{f_{\omega_0}^{\circ}}{f_{\omega_0}}.$$

Предполагая интервал времени $[0, t_m]$ достаточно большим, усредним $|\sin(\omega_0 t + \varphi_0)|$ и, после выполнения вычислений, имеем:

$$\tilde{\Sigma}_m = C(1 - e^{-\alpha t_m}). \quad (7)$$



Выражение (7) при использованных выше значениях параметров C , α и ω_0 приведено на рис. 2 пунктирной линией. Видно, что в данном случае удастся избежать осциллирующего характера в определении относительной отражательной способности и обеспечить монотонную сходимость к асимптотическому значению.

2. Определение влажности сред.

В работе исследована связь относительной отражательной способности с влажностью среды (W). Для этого проведены теоретические расчеты и экспериментальные измерения указанных величин для речного песка с влажностью, равной 0%, 5%, 10% и 15%. Теоретические исследования выполнены методом компьютерного моделирования.

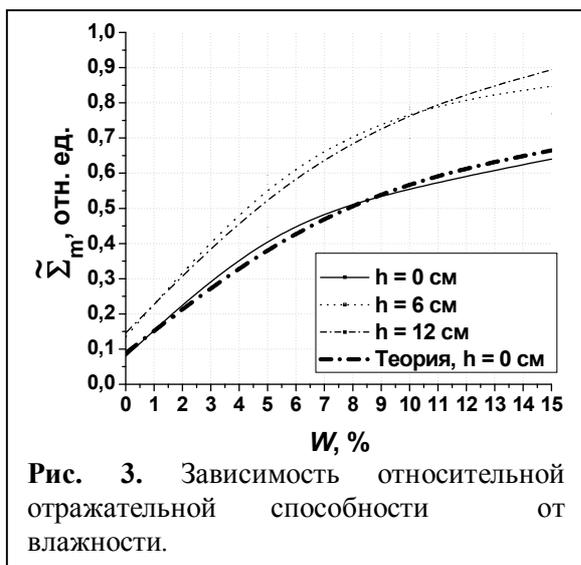
Компьютерная модель включает антенный блок георадара с частотой 1700 МГц (приемная и передающая антенны), расположенный вблизи грунта с заданными электрофизическими свойствами, соответствующими речному песку с указанными выше значениями влажности. При расчетах относительной отражательной способности использовано выражение (7).

В случае контакта антенного блока и грунта в процессе обработки теоретических и экспериментальных данных с помощью программного пакета «Georailway» [14] из трасс вычтен сигнал прямого прохождения, полученный заранее при регистрации сигнала, излучаемого антенным блоком в верхнюю полуплоскость. Соответствующие зависимости относительной отражательной способности грунта от его влажности приведены на рис. 3. Видно, что полученные теоретическая и экспериментальная кривые при $h = 0$ см находятся в хорошем согласии.

Анализ результатов аппроксимации полученных зависимостей относительной отражательной способности от влажности простыми функциями (прямая, парабола, гипербола и экспонента) показал, что максимальная точность достигается при использовании функции вида $\Sigma_{теор} = A - Be^{-\alpha W}$, соответствующей выражению (7). При этом отличие коэффициентов A и B составляет порядка 10%.

Рассмотрены также случаи, когда антенный блок располагался над поверхностью грунта на высотах 6 см и 12 см. В процессе обработки экспериментальных данных из регистрируемых сигналов $F(t)$, помимо вычитания сигнала прямого прохождения, вычитался сигнал, отраженный от верхней границы грунта. В работе форма этого сигнала принята совпадающей с формой сигнала прямого прохождения.

Полученные зависимости относительной отражательной способности также представлены на рис. 3 для $h=6$ см и $h=12$ см. Видно, что при подъеме антенн над поверхностью грунта относительная отражательная способность $\tilde{\Sigma}_m$ имеет экспоненциальный вид.



Анализ результатов, приведенных на рис. 3, позволяет сделать вывод о том, что после подъема антенн над поверхностью грунта на 6 см заметно изменение электрической связи

антенной системы с грунтом. Дальнейшее увеличение высоты подъема не оказывает заметного влияния на свойства антенной системы.

Модельные представления и полученное на их основе выражение (7) хорошо согласуются с экспериментом по определению относительной отражательной способности. В связи с этим, на основе выражения (7) для заданной высоты подъема антенного блока над поверхностью грунта можно строить систему градуировочных кривых, позволяющих по относительной отражательной способности оценивать коэффициент затухания электромагнитного излучения. Эта информация, в свою очередь, востребована при определении загрязнения балласта железных дорог в режиме реального времени при известной его влажности [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринев А.Ю., Андриянов А.В., Зайкин А.Е., Багно Д.В., Чебаков И.А. // Труды 1 меж. конф. «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике» – М. 2005. С. 86-89.
2. Хакиев З.Б., Бахарев А.А., Карпов А.Ю., Явна В.А. // Тез. докл. 4 меж-нар. науч-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика 2008» – М. 2008. С. 72-73.
3. Гринев А.Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография [Текст] / Под ред. А.Ю. Гринева // М.: Радиотехника. 2005. С. 34.
4. Архангельский С.В. Автоматизированный диагностический комплекс контроля состояния технических объектов железнодорожной инфраструктуры «ЭРА» / С.В. Архангельский // Железнодорожный транспорт - 2008. №1. С. 76-82.
5. Шевнин В.А. Геологическое обследование предприятий нефтяной промышленности [Текст] / Под ред. В.А. Шевнина и И.Н. Модина. // М.: РУССО. 1999. С. 511.
6. Виноградов Ю. Радиолокация земной среды и инженерных сооружений / Ю. Виноградов, В. Котенков, В. Лисицын, О. Пустырев // Электрон.: Наука, технол., бизнес. - 1998. N 2. - С.39-41.
7. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию [Текст] / М.Л. Владов, А.В.Старовойтов. – М.: Издательство МГУ. 1998. С. 214.
8. Кулижников А.М. Георадары в дорожном строительстве / А.М. Кулижников, М.А. Шабашева // М. 2000. С. 52. (Автомобильные дороги: Обзор. информ. / Информавтодор; Вып.2).
9. Явна В.А. Антенна для скоростного мониторинга железнодорожного пути [Текст] / В.А. Явна, З.Б. Хакиев, В.А. Попов, В.В. Ковдус // Вестник РГУПС – 2006. – №2. – С. 20-23.
10. Тарабрин В.Ф. Новой транспортной системе – эффективные диагностические средства / В.Ф. Тарабрин // Транспортная безопасность и технологии – М. 2008. №2.
11. Семейкин Н.П. Георадиолокационные исследования пресных речных льдов. Измерение толщины льда. [Текст] / Н.П. Семейкин, В.В. Монахов, Е.О. Зверев, А.В. Еременко // Георадар – 2004: Сб. науч. тр. меж-нар. науч-практ. конф. – М. 2004. С. 47-49.
12. Монахов В.В. Геофизическое обследование земляного полотна / В.В. Монахов, С.М. Клепикова, А.В. Урусова, В.И. Овчинников, В.В. Помозов // Путь и путевое хозяйство – 2008. №3.
13. Yavna V.A. Improving GPR monitoring of track ballast and railway structural integrity / V.A. Yavna, Z.B Khakiev, V.A Bilalov and A.V Morozov // First break Special topic – Volume 27, March 2009. P. 47-49.
14. Ковдус В.В., Долгий А.И., Явна В.А. // Тез. докл. 2 меж-нар. науч-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика 2006» – М. 2006. С. 72-73.
15. В.И. Колесников, В.Б. Воробьев, В.А. Явна // Тез. докл. 3 меж-нар. науч-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика 2008» – Геленджик: EAGE, 2008. – С. 2.