



УДК 550.837.76

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ ПРИ ПОИСКЕ ПУСТОТ В ГРУНТЕ ПОД БЕТОННЫМИ ПЛИТАМИ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СТАНЦИЯМИ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Г.В.РУДИАНОВ¹, Е.И.КРАПИВСКИЙ², С.М.ДАНИЛЬЕВ²

¹ Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрен и обоснован способ локализации скрытых полостей на основе исследования отраженных электромагнитных волн. Вопрос своевременной локализации скрытых полостей в технических объектах является крайне актуальным ввиду существенного влияния на дальнейшую эксплуатационную надежность объектов в целом. Исследованы проблемы локализации скрытых под железобетонными плитами полостей грунтовых массивов гидротехнических сооружений, приведены результаты георадиолокационных исследований полостей, физическое моделирование полости, а также математическое моделирование отраженного сигнала.

В современной подповерхностной радиолокации разработаны способы, позволяющие уверенно локализовать скрытые полости в грунте. Однако это возможно только в том случае, если между смежными слоями имеется четкая граница, обуславливающая скачок диэлектрической проницаемости. В результате резкого изменения диэлектрической проницаемости возникает отраженная волна, по которой судят о наличии подповерхностной неоднородности. Причем, чем больше разность величин диэлектрической проницаемости в соседних слоях, тем больше амплитуда отраженной волны. Если же полость находится в стадии образования, т.е. наполнена грунтом с уменьшенной плотностью, то на границах слоев отсутствует четкая граница, что обуславливает плавное изменение диэлектрической проницаемости с глубиной. При этом амплитуда отраженной волны минимальна и полезный сигнал маскируется помеховыми сигналами, отраженными от различных неоднородностей. Уверенно обнаружить в этом случае полость в стадии образования не представляется возможным. Для обнаружения слабых сигналов можно использовать анализ фазы отраженного сигнала, которая изменяется в соответствии с законом изменения коэффициента отражения. В статье проанализированы сигналы, отраженные от неоднородностей, и сделан вывод о возможности обнаружения пустот в грунте на основе применения метода когерентной обработки сигналов.

Ключевые слова: георадиолокатор, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, диаграмма направленности антенны, тангенс диэлектрических потерь, фазовый детектор, когерентная обработка

Как цитировать эту статью: Рудианов Г.В. Оценка характеристик сигналов при поиске пустот в грунте под бетонными плитами радиолокационными станциями подповерхностного зондирования / Г.В.Рудианов, Е.И.Крапивский, С.М.Данильев // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 245-253. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.245

Введение. В процессе длительной эксплуатационной нагрузки гидротехнических сооружений возможно формирование пустот, скрытых под бетонными плитами. Наличие таких полостей способствует возникновению деформаций железобетонных плит и даже их разрушению, поэтому своевременное выявление скрытых пустот в грунтовом основании гидротехнического сооружения является актуальной задачей.

Для обнаружения пустот в грунте в настоящее время широко используется радиолокационный метод, сущность которого заключается в следующем [9]. С помощью генератора формируются короткие электромагнитные импульсы, которые подаются на антенну, преобразуются в радиоволну и излучаются в подземное пространство.

Бетонная плита лежит на грунте с известными электрическими характеристиками. В грунте возможно образование полости, наполненной водой, воздухом или смесью грунта с водой или воздухом. Требуется установить факт наличия или отсутствия полости. Для этого используют радиолокатор, который с помощью антенного блока излучает электромагнитные импульсы в направлении, перпендикулярном плоскости плиты. При поиске полостей антенный блок перемещают по плите.

Антенна размещается таким образом, чтобы диаграмма направленности антенны (ДНА) была ориентирована перпендикулярно земной поверхности. Волна, распространяясь в грунте, отражается от неоднородностей, представляющих собой контакт железобетонной плиты и воздушной полости, и принимается антенной, где преобразуется в электрический сигнал, который далее поступает в приемный блок. Наличие отраженного импульса указывает на существование полости.

Зондируемое пространство может быть представлено в виде двухслойной модели, где первый слой является бетонной плитой с известными электрическими характеристиками, второй слой – скрытой под плитой полостью, характеристики которой не известны. Состав наполнения полости

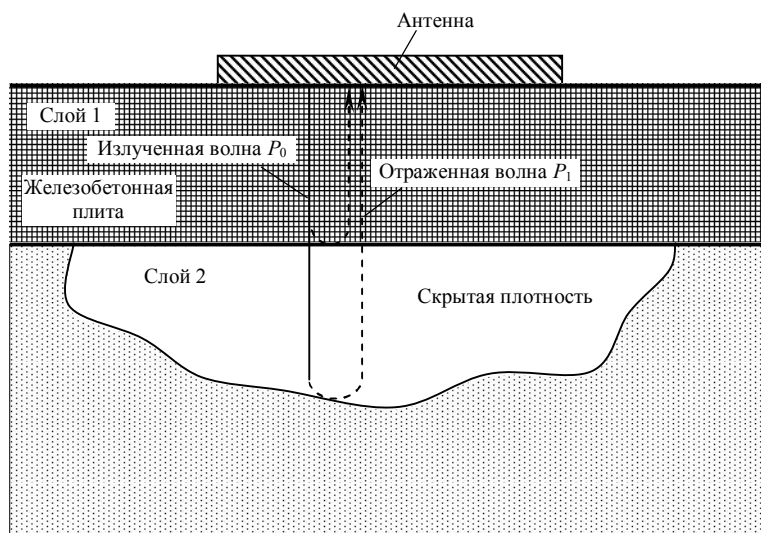


Рис.1. Схема отражения электромагнитных волн от слоев

(грунт, вода, воздух) определяется по его электрическим характеристикам. В качестве электрических характеристик используются значения диэлектрической проницаемости грунта при различных частотах излучения.

Исследуемым полупространством является трехслойная модель полупространства: железобетонная плита – скрытая полость – грунт (рис.1).

Радиоволна, излучаемая перпендикулярно исследуемому слою, отражается от границы «плита-полость» и «полость-грунт», и суммарный сигнал принимается антенной. Если полость отсутствует, то отражение также будет отсутствовать, так как значения ди-

электрической проницаемости бетона и грунта близки. Так, для песчаного грунта $\epsilon = 4-6$, а для бетона – $\epsilon = 4-10$ [6]. Следовательно, полость отсутствует. Однако в любом случае будет наблюдаться мощное отражение, обусловленное наличием металлической арматуры. Данный отраженный сигнал вырезается путем стробирования.

Мощность отраженного сигнала определяется коэффициентом отражения, который, в свою очередь, зависит от соотношения величин диэлектрической проницаемости слоев [11]:

$$\dot{R}_{1-2} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} - \sqrt{\dot{\epsilon}_2}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} + \sqrt{\dot{\epsilon}_2}}, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ – комплексные диэлектрические проницаемости первого и второго слоев.

Чем больше соотношение величин диэлектрической проницаемости слоев, тем больше мощность отраженного сигнала от границы слоев. Структура отраженного сигнала зависит от границы перехода между слоями: чем более резко выражена граница перехода, тем точнее можно определить глубину этой границы [5, 7].

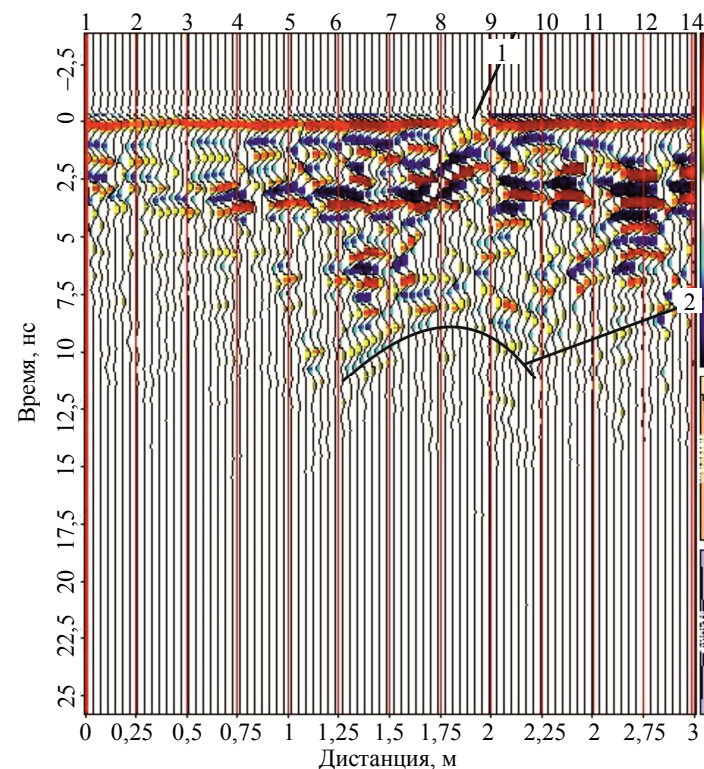


Рис.2. Диаграмма сигнала, отраженного от искусственной полости
1 – отверстие; 2 – отражение от плотности

Постановка задачи. Полость под плитой, находящаяся в процессе образования, представляет собой грунт с низкой плотностью, который может быть заполнен воздухом или водой. Диэлектрическая проницаемость такой полости плавно изменяется от ϵ_1 до ϵ_2 . В этом случае выражение (1) невозможно использовать. Величины диэлектрической проницаемости в элементарных слоях незначительно отличаются друг от друга и от окружающего грунта, что обуславливает малую величину отраженного сигнала, соизмеримую с шумовыми сигналами. Данный факт не позволяет с достаточной надежностью обнаружить такую полость.

Ранее проводились экспериментальные георадиолокационные исследования по локализации полостей под бетонными плитами плотины ГЭС [7]. В качестве ра-

диолокационного оборудования использовался георадиолокатор ZOND-12E с центральной частотой зондирующих импульсов 1000 МГц. Изучаемая модель разреза представляет собой железобетонные плиты мощностью 30 см, лежащие на песчаном грунтовом основании. Плита армирована сеткой с диаметром прута 30 мм и размером ячейки 30 см.

Для физического моделирования скрытых полостей на стыке плит была изготовлена искусственная полость протяженностью 1 м и мощностью 30 см. Георадиолокатор перемещался по поверхности плиты, при этом производилась запись сигнала.

Диаграмма сигнала в графическом виде на участке протяженностью 3 м в районе полости показана на рис.2. В районе 2 м наблюдается отверстие на стыке плит. При временной задержке 10-12 нс наблюдается отражение от полости.

Поскольку относительная диэлектрическая проницаемость песка $\epsilon = 10$ для частот 0,4-1 ГГц [13], то в соответствии с

$$h = \frac{c\tau}{2\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения радиоволн в воздухе, временная задержка $\tau = 10$ нс соответствует глубине 1,5 м.

На рис.3 показана георадарограмма сигналов, отраженных от естественной полости, находящейся в процессе формирования, т.е. в исследуемой области произошло разуплотнение грунта. Данная полость обнаружена путем прямых измерений в скважине и отверстиях между плитами, ее протяженность составляет более 100 см и мощность 60 см.

Полость находится в интервале 9-11 м. Как видно из рисунка, совокупность отраженных сигналов не позволяет надежно установить факт существования полости.

Таким образом, недостатком классических георадарных исследований является малая вероятность обнаружения подземных пустот, особенно находящихся в процессе формирования.

В связи с этим актуальной задачей является разработка способов повышения достоверности обнаружения полостей под железобетонными плитами гидротехнических сооружений.

Обоснование способа. Для решения данной задачи может быть использован способ радиолокационного зондирования, с помощью которого исследуется фаза отраженного сигнала, которая зависит от диэлектрической проницаемости грунта и, соответственно, от коэффициента отражения радиоволны от системы слоев [1, 4].

Для формирования зондирующего и отраженных сигналов использовался метод математического моделирования.

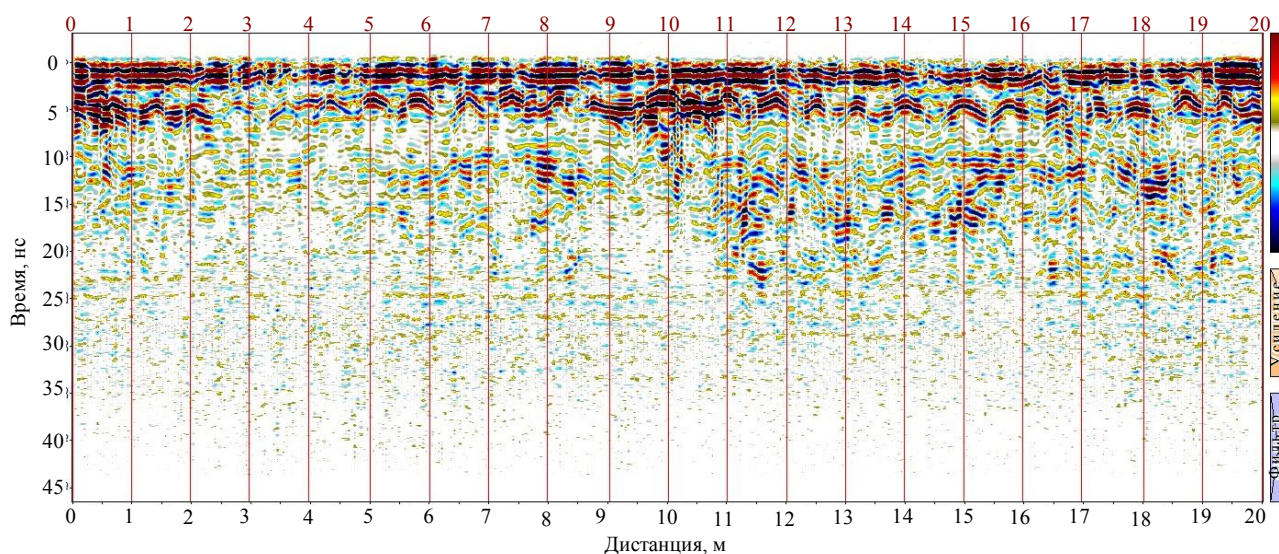


Рис. 3. Диаграмма сигнала, отраженного от естественной полости

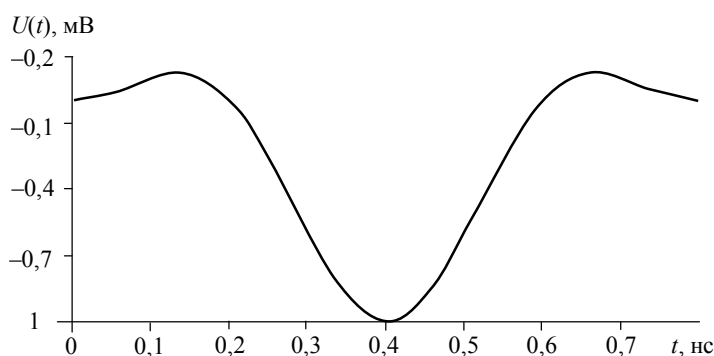


Рис.4. Модель зондирующего сигнала

В качестве прототипа зондирующего сигнала при моделировании использовался сигнал, формируемый георадаром ZOND-12E. Данный сигнал представляет собой одну полуволну гармонического колебания отрицательного значения на несущей частоте, определяемой сменным антенным блоком.

В качестве математической модели зондирующего сигнала использовалось выражение [5]:

$$s(t) = \cos(2\pi ft) \sin^2(2\pi ft), \quad (3)$$

где f – центральная частота излучения георадара, $f = 2$ ГГц.

В отличие от первоисточника во втором сомножителе в аргументе добавлена переменная времени t .

Формируемый сигнал показан на рис.4.

Отраженный сигнал во временной форме описывается выражением [5]:

$$s(t) = \sum_{j=0}^{\infty} r_{j,j+1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt e^{-2\pi i f \left[t + \frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(z) dz \right]} df, \quad (4)$$

где $r_{j,j+1}$ – коэффициент отражения от границы j -го слоя; f – частота; z – глубина; $n(z) = \sqrt{\epsilon(z)}$ – показатель преломления; $\epsilon(z)$ – функция диэлектрической проницаемости от глубины плотности.

Коэффициент отражения r определяется выражением

$$r_{j,j+1} = \frac{n(z_j) - n(z_{j+1})}{n(z_j) + n(z_{j+1})}. \quad (5)$$

Рассмотрим сначала, как будет выглядеть отраженный сигнал в случае сформировавшейся полости, которая может быть заполнена воздухом или водой.

Если под плитой находится сформировавшаяся полость, то значения диэлектрических проницаемостей ϵ для различных слоев (воздух, вода, бетон, грунт) можно считать постоянными величинами (не зависящими от глубины z). Тогда интеграл в показателе экспоненты выражения (4) будет иметь вид [2]

$$\frac{2}{c} \int_0^{z_j} n(z) dz = \frac{2nz_j}{c}, \quad (6)$$

где z_j – толщина слоя.

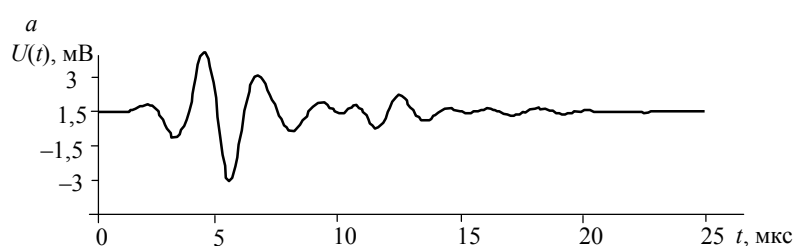
Данный интеграл имеет смысл временного интервала, в течение которого зондирующий импульс распространяется в слое туда и обратно. Коэффициент n , называемый показателем преломления и зависящий от диэлектрической проницаемости ϵ , определяет увеличение времени распространения импульса в зависимости от типа среды. С учетом данного допущения отраженный сигнал (4) запишем в виде

$$s(t) = \sum_{j=0}^{\infty} r_{j,j+1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2\pi i f t} dt e^{-2\pi i f \left[t + \frac{2nz_j}{c} \right]} df. \quad (7)$$

Комплексная величина в показателе экспоненты определяет периодический характер коэффициента отражения в зависимости от глубины [6, 8].

Моделирование отраженного сигнала проводилось для значений диэлектрических проницаемостей бетона, воздуха и песка, равных соответственно $\epsilon_b = 6$, $\epsilon_v = 1$, $\epsilon_n = 30$ (для влагонасыщенного песка). Таким образом, коэффициенты отражения от границ слоев, определенные по (5), составляют: для слоя «бетон-воздух» $r_{1,2} = 0,42$, для слоя «воздух-песок» $r_{2,3} = -0,69$.

Вид смоделированного отраженного сигнала при этих исходных данных для полости протяженностью 1 м и глубиной 40 см при толщине бетонной плиты 25 см показан на рис.5, а.



На данной радарограмме первый импульс представляет собой отражение от нижней поверхности бетонной плиты (граница «бетон-воздух»), второй импульс – отражение от дна полости (граница «воздух-песок»). Переход от одного слоя к другому явно выражен (диэлектрическая проницаемость меняется скачком), поэтому импульс, отраженный от дна полости хорошо наблюдается. Величина временного интервала между первым и вторым импульсом определяется расстоянием между нижней поверхностью бетонной плиты и дном полости.

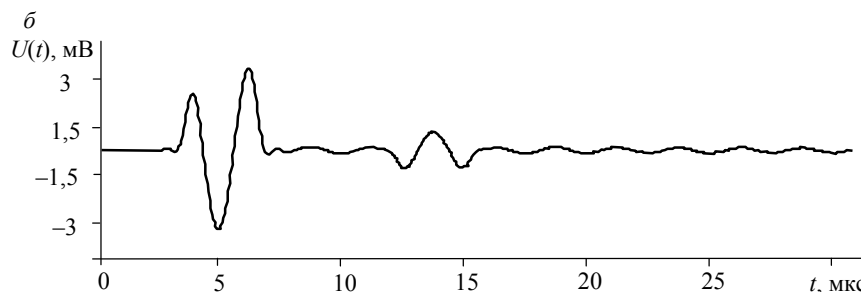


Рис. 5. Вид отраженного сигнала: а – смоделированный отраженный сигнал; б – реальный отраженный сигнал ($\epsilon_6 = 6$, $\epsilon_в = 1$, $\epsilon_п = 30$)

На рис.5, б показан реальный сигнал, полученный при зондировании георадаром ZOND-12E полости протяженностью 1 м и глубиной 30 см. Толщина бетонной плиты составляла 30 см.

Сравнивая данные рисунки, можно видеть хорошее сходжение модели с реальным сигналом.

Диэлектрическая проницаемость песка существенно зависит от водонасыщенности, причем при уменьшении объема воды диэлектрическая проницаемость песка снижается. При влажности песка 16 % его диэлектрическая проницаемость составляет $\epsilon_п = 14$ [11]. В этом случае коэффициент отражения от границы слоев «воздух-песок» $r_{2,3} = -0,58$.

Поскольку величина диэлектрической проницаемости песка уменьшилась и, соответственно, уменьшился коэффициент отражения, амплитуда отраженного импульса также уменьшилась. Однако наличие наблюдаемого отраженного сигнала позволяет обнаруживать скрытую полость, причем временное положение отраженного сигнала указывает на мощность исследуемой полости.

Теперь рассмотрим, как изменится отраженный сигнал, если полость будет наполнена водой. Диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon_{вод} = 81$. Следовательно, коэффициент отражения от границы «бетон-вода» составит $r_{1,2} = -0,57$, а коэффициент отражения от границы «вода-песок» (если для песка $\epsilon_п = 30$) – $r_{2,3} = 0,24$.

Как видно из рис.5, фазы сигналов поменялись на 180° , что объясняется сменой знаков величин коэффициентов отражения в формуле (5).

Таким образом, если диэлектрическая проницаемость (и, соответственно, показатель преломления) меняется скачком, то существует принципиальная возможность по наличию отраженного сигнала определить скрытую полость. Причем, чем больше коэффициент отражения, тем больше амплитуда отраженного сигнала.

Рассмотрим, как изменится вид сигнала, отраженного от полости, находящейся в процессе образования, т.е. с низкой плотностью грунта.

Диэлектрическую проницаемость такой полости можно представить в виде модели, выполняющей функцию диэлектрической проницаемости, плавно изменяющейся от начальной величины ϵ_1 до конечной ϵ_2 . В качестве такой модели использовано выражение [5]

$$\epsilon(z) = \epsilon_1 + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1) \exp\left(\frac{z-d}{\text{tg}\delta}\right)}{1 + \exp\left(\frac{z-d}{\text{tg}\delta}\right)}, \quad (8)$$

где ε_1 , ε_2 – начальная и конечная величина диэлектрической проницаемости слоя; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс диэлектрических потерь; z – текущее значение глубины; d – мощность полости.

Согласно выражению (8) диэлектрическая проницаемость полости монотонно возрастает с глубиной, что имитирует полость, в которой грунт в верхней части имеет минимальную плотность (заполнен воздухом), а в нижней части – максимальную.

При моделировании тангенс диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ для песчаного грунта принимался равным 0,01. Функция диэлектрической проницаемости, соответствующая выражению (8), имеет вид монотонно возрастающей функции.

Форма отраженного сигнала определяется функцией коэффициента отражения. Однако плавное изменение диэлектрической проницаемости обуславливает плавное изменение коэффициента отражения с глубиной. Поэтому вывод выражения в аналитическом виде для функции коэффициента отражения от глубины для неоднородного слоя достаточно сложен и может быть получен только для некоторых видов простых функций (экспоненциальное, линейное, показательное распределение). В связи с этим, согласно рекомендации [11], для определения вида сигнала, отраженного от различных элементов полости с произвольной формой функции диэлектрической проницаемости, весь объем полости заменялся N элементарными слоями с постоянной диэлектрической проницаемостью. В этом случае коэффициент отражения в зависимости от глубины [5]

$$R(z) = r_{1,2} + \sum_{j=2}^{N+2} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^z n(z) dz}, \quad (9)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в вакууме; λ – длина волны излучения; N – количество элементарных слоев.

Коэффициенты отражения от границ между элементарными слоями $r_{j,j+1}$ определяются выражением (5).

Функция коэффициента отражения, рассчитанная при количестве слоев $N = 16$ по формуле (9), представлена на рис.6.

Как видно, в случае плавного изменения диэлектрической проницаемости максимальное значение коэффициента отражения составляет около 0,06, что значительно меньше, чем для случая ступенчатого изменения диэлектрической проницаемости (для границы «бетон-вода» $r = -0,57$).

Искусственное разбиение неоднородного слоя на дискретные слои с постоянной диэлектрической проницаемостью искажает форму функции коэффициента отражения, однако при количестве слоев $N = 16$ эмпирическая форма функции коэффициента отражения достаточно точно отображает теоретическую форму. Анализируя график рис.6, можно предположить, что для функции диэлектрической проницаемости вида (8) функция коэффициента отражения является производной от функции диэлектрической проницаемости (рис.7).

Сравнивая данные графики, можно сделать вывод, что при количестве слоев $N = 16$ эмпирическая форма функции коэффициента отражения достаточно точно отображает теоретическую форму.

Как видно из графика (рис.7), отраженный сигнал растянулся по длительно-

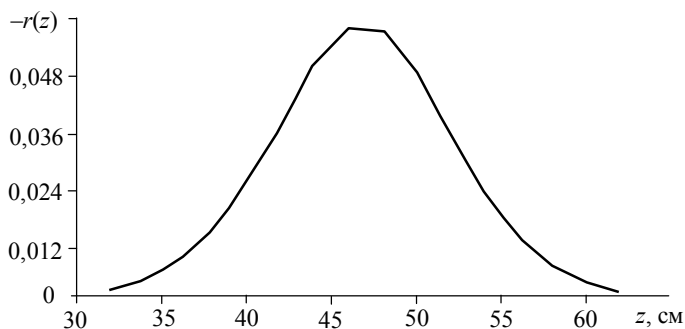


Рис.6. Эмпирическая функция коэффициента отражения, рассчитанная по 16 слоям

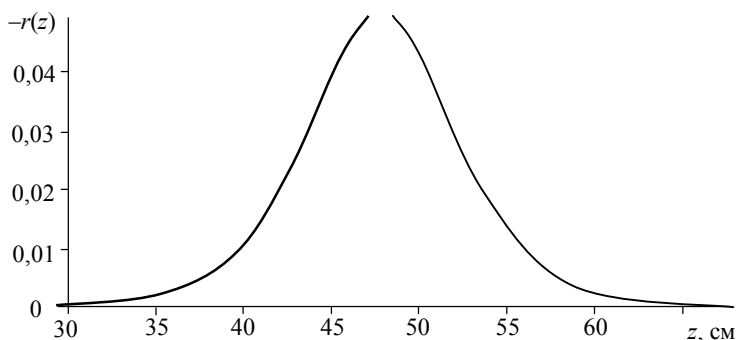


Рис.7. Теоретическая функция коэффициента отражения

сти (от 7 до 15 мкс) и уменьшился по амплитуде (из-за уменьшения коэффициента отражения), что ухудшает условия обнаружения скрытой полости.

Рассмотрим, как изменятся условия отражения сигнала от полости с неоднородным заполнением при увеличении тангенса диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ до 0,015.

Подставляя в выражение диэлектрической проницаемости (8) значение $\operatorname{tg}\delta = 0,015$, получаем функцию, график которой представлен на рис.8.

Сравнение графиков рис.7 и 8, показало, что в последнем случае наклон уменьшился, т.е. произошло сглаживание границ диэлектрических проницаемостей слоев.

Расчеты показывают, что максимальное значение коэффициента отражения уменьшилось с 0,06 до 0,04. Кроме того, функция стала более пологой. При достаточно пологой функции коэффициента отражения сигнал, отраженный от полости, практически не различим, что не позволяет обнаружить скрытую полость.

Таким образом, можно сделать вывод, что наилучшим условием наблюдения отраженного сигнала является скачкообразное изменение диэлектрической проницаемости на границе раздела двух сред. При этом коэффициент отражения от границы раздела наибольший. Причем, чем больше разность значений диэлектрической проницаемости смежных слоев, тем больше коэффициент отражения [3]. В случае плавного изменения диэлектрической проницаемости (например, полость, частично заполненная грунтом) отраженный сигнал может не наблюдаться на фоне мешающих отражений, что исключает обнаружение скрытой полости.

Для исследования возможности обнаружения скрытых полостей с плавным изменением диэлектрической проницаемости рассмотрим выражение для отраженного сигнала [9]:

$$E = (1 - r_{1,2}^2) r_{2,3} \exp(-2\alpha z) \exp(-i\omega 2z / v_\phi), \quad (10)$$

где $r_{1,2}$, $r_{2,3}$ – коэффициенты отражения от верхней и нижней границ полости; α – коэффициент затухания; z – глубина (текущая координата); ω – средняя частота антенного блока. v_ϕ – фазовая скорость распространения радиоволны в слое,

$$v_\phi = c / \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon}. \quad (11)$$

Подставляя выражение для коэффициента отражения (9) в (10), получим

$$E(z) = (1 - r_{1,2}^2) \left(r_{1,2} + \sum_{j=2}^{N+2} r_{j,j+1} e^{2ik \int_0^z n(z) dz} \right) \exp(-2\alpha z) \exp(-i\omega 2z / v_\phi), \quad (12)$$

где N – количество элементарных слоев.

Отсюда видно, что фазы сигналов, отраженных от элементарных слоев, изменяются по закону:

$$\varphi(z) = \operatorname{Re}(2k \int_0^z n(z) dz), \quad (13)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Если полость отсутствует (под плитой находится однородный грунт), то диэлектрическая проницаемость постоянна [14]. В этом случае фаза сигнала, отраженного от неоднородностей, меняется с глубиной с постоянной скоростью. Если же под плитой присутствует полость в процессе образования, т.е. частично заполненная грунтом с низкой плотностью, то диэлектрическая проницаемость будет изменяться по некоторому (в общем случае нелинейному) закону. Соответственно, фаза сигнала будет изменяться по закону, соответствующему свойствам грунта, но данный

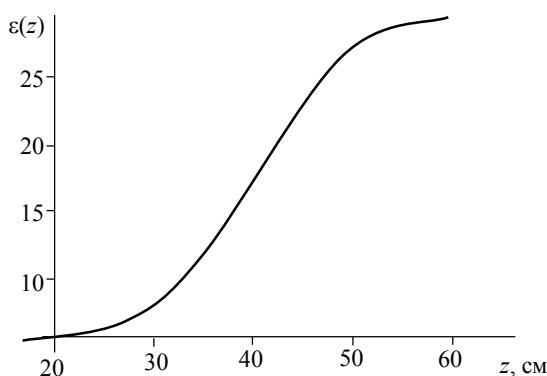
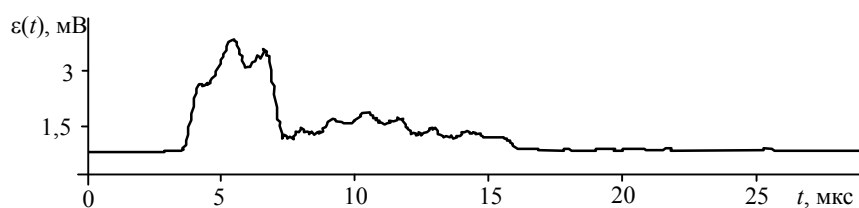


Рис.8. Функция диэлектрической проницаемости для $\operatorname{tg}\delta = 0,015$

Рис. 9. Вид сигнала после когерентной обработки для $\operatorname{tg} \delta = 0,01$

закон не будет линейным. Если же полость отсутствует, т.е. под плитой находится однородный грунт, то фаза отраженного сигнала определяется выражением (6) и изменяется по линейному закону, т.е. фазовый набег обусловлен только изменением глубины.

Таким образом, анализируя закон изменения фазы, можно выявить скрытую полость. Для определения закона изменения фазы можно использовать синхронный (фазовый) детектор [10], на который подается отраженный и опорный сигналы. В качестве опорного сигнала используется гармоническое напряжение с частотой, равной центральной частоте излучения радара. Эквивалентную схему фазового детектора можно представить в виде умножителя, производящего перемножение отраженного и опорного сигналов, и интегратора, сглаживающего колебания выходного сигнала.

В соответствии с данной эквивалентной схемой на выходе синхронного детектора образуется напряжение

$$u_{\text{ф.д.}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) u_{\text{оп}}(t) \cos(\Delta\varphi(t)) dt, \quad (14)$$

где u_c , $u_{\text{оп}}$ – напряжение сигнала и опорное напряжение; T – интервал усреднения; $\Delta\varphi$ – фаза отраженного сигнала.

Интервал усреднения выбирается таким, чтобы не искажалась форма выходного сигнала. При проведении исследований $T = 1/f_0$, где f_0 – средняя частота излучения георадара.

Для определения возможности обнаружения скрытых полостей в процессе образования (с плавным изменением диэлектрической проницаемости) производилась когерентная обработка отраженного сигнала в соответствии с выражением (14). Для сигнала, изображенного на рис.5, выходной сигнал после когерентной обработки показан на рис.9.

Как видно из рис.5 и 9, на отраженном сигнале просматривается отражение от полости в виде увеличения амплитуды сигнала на выходе фазового детектора в пределах 7-15 мкс, определяемых глубиной полости. Увеличения амплитуды сигнала обусловлено изменением фазы отраженного сигнала по закону (8).

При отсутствии полости изменение фазы сигнала обусловлено только изменением глубины, так как диэлектрическая проницаемость постоянна. Поэтому на радарограмме наблюдается только отражение от границы «бетон-песок», затем следуют шумовые выбросы, отраженные от мелких неоднородностей грунта. Данная радарограмма показывает, что полость под плитой отсутствует.

Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследована зависимость коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости в случае неоднородного грунта (когда диэлектрическая проницаемость плавно изменяется с глубиной от ε_1 до ε_2). Установлено, что при плавном изменении диэлектрической проницаемости (интегральный характер) функция коэффициента отражения имеет колоколообразную форму, причем ширина данной функция определяется скоростью изменения диэлектрической проницаемости.

2. Проанализированы модели радиолокационных сигналов, отраженных от скрытых полостей. Обоснована принципиальная возможность обнаружения пустот в грунте, находящихся в процессе образования, под бетонными плитами с помощью георадиолокатора на основе когерентной обработки отраженных сигналов.

3. Предлагаемый способ на основе когерентной обработки позволяет повысить вероятность обнаружений пустот за счет привлечения дополнительной информации – фазы отраженных сигналов.



4. Предлагаемый способ позволяет установить характер материала заполнения скрытой под железобетонной плитой полости: полость, наполненная водой, или воздушная полость. Предлагаемый способ относится к группе методов неразрушающего контроля и не требует разрушения железобетонных плит и позволит повысить достоверность обнаружения пустот (в том числе в стадии формирования), образующихся под бетонными плитами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Г.А. Радиоволновые системы подповерхностного зондирования / Г.А.Андреев, Л.В.Заенцев, В.В.Яковлев // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 2. С. 3-22.
2. Андрианов В.В. Подповерхностная радиолокация слоисто-неоднородного грунта планеты // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 11. С. 1937-1948.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
4. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л.Владов, А.В.Старовойтов. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
5. Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А.Ю.Гринёва. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
6. Изюмов С.В. Теория и методы георадиолокации / С.В.Изюмов, С.В.Дручинин, А.С.Вознесенский. М.: Изд-во «Горная книга». 2008. 196 с.
7. Крапивский Е.И. Основы технической диагностики и надежности трубопроводов / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014. 337 с.
8. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. М.: Недра, 1971. 224 с.
9. Подповерхностная радиолокация / М.И.Финкельштейн, В.И.Карпукhin, В.А.Кутев, В.Н.Метелкин; Под ред. М.И.Финкельштейна. М.: Радио и связь. 1994. 215 с.
10. Теоретические основы радиолокации / А.А.Коростелев, Н.Ф.Клюев, Ю.А.Мельник и др.; Под ред. В.Е.Дулевича. М.: Советское радио. 1978. 608 с.
11. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И.Финкельштейн, В.Л.Мендельсон, В.А. Кутев; Под ред. М.И. Финкельштейна. М.: Советское радио. 1977. 173 с.
12. Финкельштейн М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И.Финкельштейн, В.А.Кутев, В.П.Золотарев. М.: Недра, 1986. 128 с.
13. Якубовский Ю.В. Электроразведка. М.: Недра, 1980. 384 с.
14. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost / S.A.Arcone, D.E.Lawson, A.J.Delaney, J.C.Strasser, J.D.Strasser // Geophysics. 1998. Vol. 63. № 5. P. 1573-1585.

Авторы: **Г.В.Рудянов**, канд. техн. наук, доцент, gen.r@mail.ru (Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия), **Е.И.Крапивский**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, eikrapivsky@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия) **С.М.Данильев**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, daniliev@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 30.01.2018

Статья принята к публикации 04.05.2018.