

УДК 624:621.396.96

**ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ УСТАНОВЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ
И РЕКОНСТРУКЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕТОДОМ
ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПОЛЯРИЗАЦИОННО-МОДУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ**

Е. Л. Шошин

*Сургутский государственный университет,
shoshin6@mail.ru*

Предложен метод подповерхностного радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигналами. Приведены результаты численного моделирования влияния влажности бетона на характеристики направленности излучателя Вивальди. Описана последовательность операций по цифровой обработке радиолокационных изображений свай, установленных в грунт. Приведены результаты экспериментального измерения длины свай и выделения металлических включений.

Ключевые слова: георадар, поляризационная модуляция, длина свай, металлические включения.

**LENGTH MEASURING OF INSTALLED REINFORCED CONCRETE PILES
AND RECONSTRUCTION OF METALLIC INCLUSIONS BY SUBSURFACE RADAR
SENSING WITH POLARIZATION-MODULATED SIGNALS**

E. L. Shoshin

*Surgut State University,
shoshin6@mail.ru*

The article proposes a method of subsurface radar sensing by polarization-modulated signals. The results of numerical simulation of the influence of concrete moisture on the directional characteristics of the Vivaldi antenna are presented. The sequence of operations for digital processing of radar images of piles installed in the ground is described. The results of experimental measurements of pile length and separation of metallic inclusions are given.

Keywords: GPR, ground-penetrating radar, polarization modulation, pile length, metallic inclusions.

Введение. В настоящее время для измерения длины свай преимущественно применяются волновые методы, использующие акустические или электромагнитные воздействия на систему «свая – грунт» [1–2]. Волновые методы позволяют определить длину свай по измеренному значению времени распространения сигнала в свае и известной скорости распространения сигнала в материале сваи. Радиолокационное обследование установленных в грунт свай может быть осуществлено путем зондирования их с торца и с боковых поверхностей, вскрытых для измерений. При этом значительное затухание сверхширокополосного сигнала при его распространении и маскирующие отражения от арматуры затрудняют выделение сигнала, отраженного от границы «конец сваи – грунт». Арматура свай благодаря своей высокой электропроводности оказывает заметное влияние на рассеяние сигналов. Установлено [1], что металлические стержни, образующие арматуру, хорошо отражают линейно-поляризованные электромагнитные волны, плоскость поляризации которых соответствует ориентации стержней арматуры, и слабо отражают линейно-поляризованные электромагнитные волны, плоскость поляризации которых образует перпендикуляр по отношению к направлению ориентации стержней арматуры. Отличие в уровне сигналов, рассеянных от металлических стержней, в зависимости

от поляризации излученного сигнала может составлять 5–10 дБ. Учет векторных свойств зондирующих и рассеянных сигналов позволяет предложить метод подповерхностного радиолокационного зондирования поляризационно-модулированными сигналами.

Формирование поляризационно-модулированных сигналов. Принцип работы георадара основан на использовании метода сверхширокополосного радиолокационного зондирования подповерхностных сред и объектов, при котором оцениваются характеристики нестационарного электромагнитного поля, формируемого при рассеянии от неоднородностей, включений и границ раздела сред [1, 3–4]. В режиме поляризационной модуляции зондирующих сигналов георадар реализует режим последовательного облучения подповерхностной среды электромагнитными волнами с ортогональными поляризациями, что позволяет выполнить векторную обработку рассеянных сигналов. Используемые на излучение и прием антенны, наряду с хорошим усилением и широкой полосой рабочих частот, должны обладать способностью формировать зондирующие сигналы ортогональных поляризаций и принимать обратно-рассеянные сигналы. Схема пространственного размещения антенн должна учитывать геометрию оголовка сваи, доступного для измерений. Перечисленным требованиям отвечают излучатели Вивальди, образующие антенную систему в виде «коробки» (рис. 1а). При этом образующие поляризационный базис пары излучателей 1, 3 и 2, 4 участвуют в формировании и приеме СВЧ радиосигналов линейной поляризации последовательно в первом и во втором полупериодах (T) модуляционного цикла ($C = 2T$). Излучатели 1, 3 характеризуются горизонтальной поляризацией, а излучатели 2, 4 – вертикальной поляризацией (в плоскости XOY относительно оси OZ).

При радиолокационном обследовании свай диэлектрическая проницаемость и поглощающие свойства заполняющего бетона определяются соотношением входящих в него материалов и в существенной степени зависят от влажности [5]. Рассмотрим влияние влажности бетона на энергетические характеристики антенны Вивальди в ближнем поле облучения радиолокационными сигналами установленной в грунт сваи. В качестве излучателя Вивальди выберем антенну антиподального типа, описанную в [6], полоса рабочих частот которой составляет 500–700 МГц. На рис. 1б приведена диаграмма направленности излучателя Вивальди. Результаты численного моделирования свидетельствуют, что при изменении влажности бетона от 1 до 4 % главный лепесток диаграммы направленности излучателя Вивальди сужается в 1,6 раза, при этом КНД антенны увеличивается на 24–42 %, достигая значения 4–11 (рис. 2а), а коэффициент Front-to-Back уменьшается на 72–77 %, достигая значения 2–3 (рис. 2б).

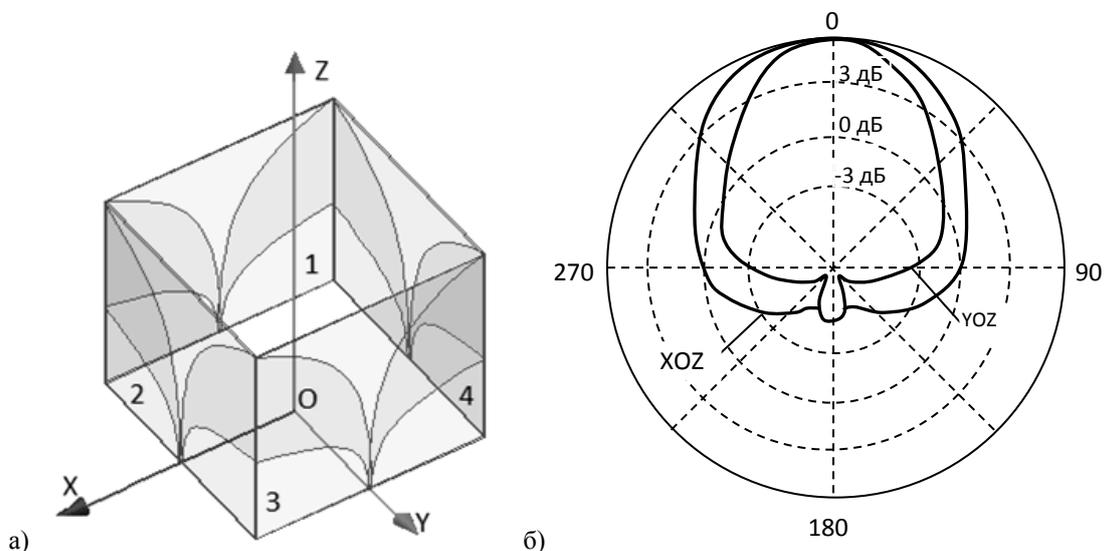


Рис. 1. Излучатели Вивальди:
а) антенная система; б) диаграмма направленности

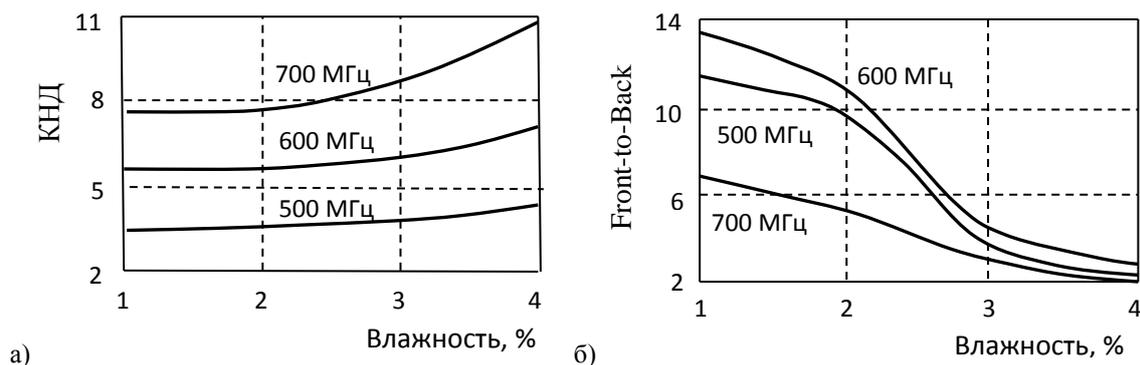


Рис. 2. Влияние влажности бетона на характеристики направленности излучателя Вивальди:
 а) зависимость КНД от влажности бетона;
 б) зависимость коэффициента Front-to-Back от влажности бетона

Коэффициент эллиптичности (Ludwig-3) излучаемых в направлении оси OZ электромагнитных волн достигает значения 15, что служит свидетельством формирования излучателем Вивальди сигналов с линейной поляризацией.

Выделение металлических включений и измерение длины сваи. При подповерхностном радиолокационном зондировании арматура сваи образует значительные отражения, маскирующие на радиолокационном изображении границу раздела «конец сваи – грунт» и затрудняющие процесс определения длины сваи по измеренному времени задержки сигнала, рассеиваемого концом сваи. Проблема подавления помех на изображениях рассматривается в работах [7–10]. Векторная обработка рассеянных сигналов позволяет эффективно выделять объекты с требуемыми поляризационными характеристиками, улучшая при этом радиолокационный контраст изображений и подавляя помехи [11].

В режиме поляризационной модуляции зондирующих сигналов появляется возможность идентифицировать рассеивающие объекты и выполнять их селекцию. Так, стержни арматуры могут быть классифицированы как поляризационно-анизотропные объекты, рассеивающие характеристики которых зависят от поляризации излученного сигнала. В противоположность этому граница раздела «конец сваи – грунт» может быть классифицирована как поляризационно-изотропный объект, поскольку не содержит металлических включений и при рассеянии формирует сигналы с уровнем без связи с поляризацией зондирующих радиоимпульсов.

С целью разработки методики выделения металлических включений и измерения длины сваи, установленной в грунт, было выполнено радиолокационное обследование с открытых поверхностей оголовка сваи, которое включало в себя формирование, прием и регистрацию поляризационно-модулированных сигналов. Зондирование осуществлялось парой излучателей 1 и 2 в составе антенной «коробки» (рис. 1а), управление которыми выполнялось импульсами запуска $ss_1((2n - 1)T)$ и $ss_2(2nT)$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, а T – период следования синхроимпульсов. Раскроем последовательность операций по обработке рассеянных сигналов:

- прием рассеянных сигналов горизонтальной поляризации $s_1(t, (2n - 1)T)$ ($t < T$) в нечетных полупериодах модуляционного цикла, прием рассеянных сигналов вертикальной поляризации $s_2(t, 2nT)$ ($t < T$) в четных полупериодах модуляционного цикла и формирование измерительного сигнала в соответствии:

$$s_0(t, nT) = s_1(t, (2n - 1)T) + s_2(t, 2nT); \quad (1)$$

- накопление измерительного сигнала на интервале времени не менее $y = nT = 1$ и сохранение данных измерений в форме матрицы цифрового радиолокационного изображения:

$$s(x, y) = s_0(t, nT) \quad (2)$$

$$x [м] = \frac{ct [с]}{2\sqrt{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве, ε – диэлектрическая проницаемость бетона;

- компенсация затухания сигнала в зависимости от глубины проникновения в почву и грунты. Эмпирическая формула, связывающая затухание g с глубиной слоя x на рабочей частоте, составила линейную аппроксимацию вида:

$$g(x), \text{ дБ} = 19,4 x [м]; \quad (4)$$

- формирование маски границы раздела поляризационно-изотропных сред. С учетом того, что излученный сигнал представляет собой моноимпульс, большая часть энергии которого сосредоточена в 2.5–3 полупериодах чередующейся положительной и отрицательной полярности, маску границы раздела поляризационно-изотропных сред можно представить в виде бинарного изображения чередующихся черной-белой-черной полос (рис. 3а). Ширина полос соответствует длительностям полупериодов в моноимпульсе;

- формирование маски рассеивающих стержней арматуры. Последовательное облучение металлического стержня СВЧ радиосигналами вертикальной и горизонтальной поляризациями приводит к изменению уровня обратно-рассеянного сигнала синхронно с частотой поляризационной модуляции (рис. 3б);



Рис. 3. Маска для корреляционной обработки:

а) граница раздела поляризационно-изотропных сред; б) рассеивающий стержень арматуры

- пространственная корреляционная обработка изображения сваи обеими масками – границы раздела сред и рассеивающих стержней арматуры. Алгоритм пространственного корреляционного анализа задается соотношением свертки исходного пространственного образа среды $s(\xi, \eta)$ с импульсной характеристикой маски $h(x, y)$ [1]:

$$s^*(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) s(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (5)$$

- формирование бинарного изображения. При формировании бинарного изображения пикселям, значения которых выше заданного порога, назначается значение белого цвета (единица), а пикселям со значениями ниже порога – значение черного цвета (ноль). Алгоритм отсечения порогом задается соотношением:

$$s^*(x, y) = \begin{cases} 1, & s(x, y) \geq Z_0 \\ 0, & s(x, y) < Z_0 \end{cases}, \quad (6)$$

где значение порога по результатам измерений составило $Z_0 = 0,8 - 0,9$. На рис. 4 приведен фрагмент бинарного изображения арматуры сваи после корреляционной обработки маской стержня арматуры. Стержни вертикальной стратификации (V), присутствующие в изображении сваи на различной глубине залегания вдоль оси OZ, формируют пики корреляционной функции синхронно с положительными полупериодами модулирующего сигнала МС, в течение которых антенная система из излучателей Вивальди формирует зондирующий сигнал и принимает рассеянный сигнал вертикальной поляризации. Стержни горизонтальной стра-

тификации (Н) формируют пики корреляционной функции при облучении сигналом горизонтальной поляризации, что соответствует по времени отрицательным полупериодам модулирующего сигнала;

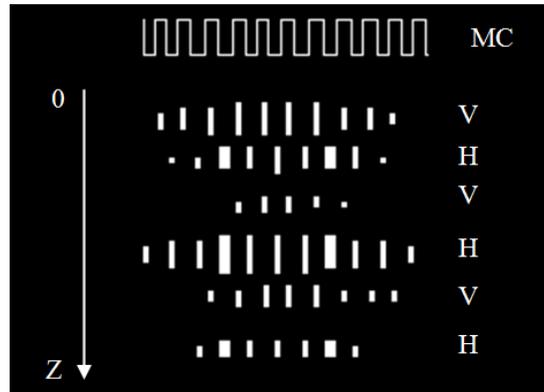


Рис. 4. Фрагмент бинарного изображения сваи после корреляционной обработки:
 МС – модулирующий сигнал; V – вертикальная стратификация стержня;
 H – горизонтальная стратификация стержня

- реконструкция металлических включений и границ раздела сред. Типовые операции по выделению протяженных объектов в бинарном изображении включают в себя дилатацию и удаление сегментированных участков, не превысивших порог. Результатом реконструкции является выделение металлических включений, оголовка и конца сваи, заглубленной в почвогрунты;

- измерение длины свай. Длина сваи по результатам реконструкции определяется как пространственный разнос от оголовка до конца сваи. На рис. 5а приведено радиолокационное изображение сваи, на рис. 5б, 5в приведены результаты корреляционной обработки, на рис. 5г приведены результаты реконструкции длины сваи и металлических включений.

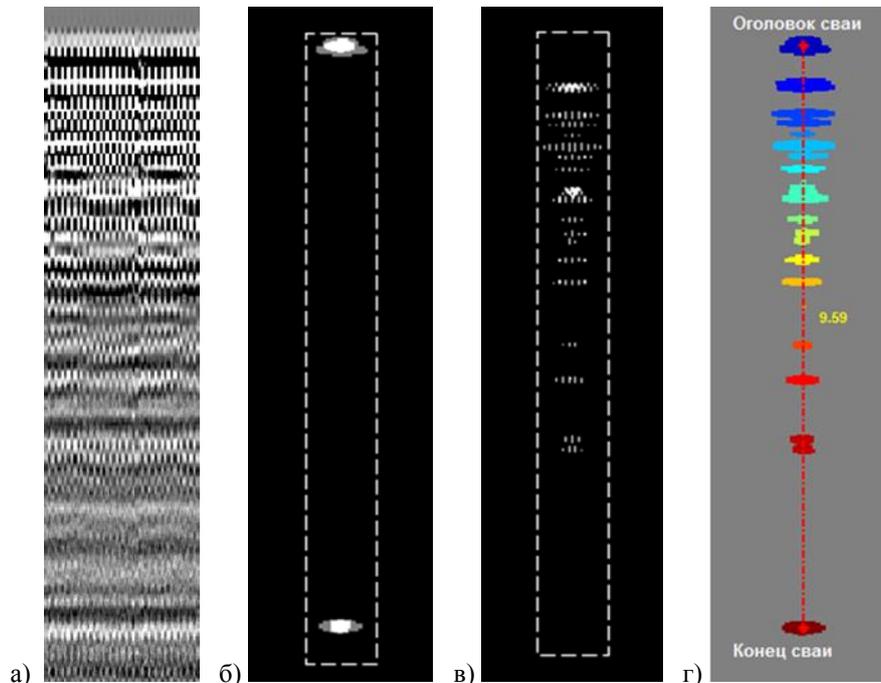


Рис. 5. Изображения железобетонной сваи:
 а) исходная радиорограмма; б) результат корреляционной обработки изотропных объектов;
 в) результат корреляционной обработки анизотропных объектов; г) результат измерения длины сваи
 и реконструкции металлических включений

Заключение. Метод радиолокационного подповерхностного зондирования поляризационно-модулированными сигналами позволяет выделять поляризационно-изотропные и поляризационно-анизотропные объекты. Излучатели Вивальди, благодаря своим энергетическим характеристикам могут быть использованы в подповерхностной радиолокации. При формировании зондирующих сигналов и радиолокационном обследовании установленных железобетонных свай целесообразно использовать антенную систему из четырех излучателей Вивальди, позволяющую реализовать обработку рассеянных сигналов в линейном поляризационном базисе. Использование корреляционной обработки радиолокационного изображения сваи, построенного с использованием поляризационно-модулированных сигналов, позволяет реализовать алгоритм измерения длины сваи и выделения металлических включений.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации : моногр. / под ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.
2. Капустин В. В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113–117.
3. Annan P., Arcone S. A. et al. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / ed. Harry M. Jol. Kidlington, 2009. 508 p.
4. Александров П. Н. Теоретические основы георадарного метода. М. : Физматлит, 2017. 120 с.
5. Шошин Е. Л., Лукьянов С. П., Ковалев Д. М. Георадарные методы инженерного обследования : моногр. / под ред. Е. Л. Шошина. Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2008. 152 с.
6. Лукьянов С. П., Степанов Р. А., Шошин Е. Л. Влияние почвогрунтов на диаграмму направленности антенны Вивальди при подповерхностном зондировании // Обмен опытом в области создания широкополосных радиоэлектронных систем (СВЧ2012) : материалы IV общерос. науч.-технич. конф. Омск : КАН, 2012. С. 235–241.
7. Harpreet K., Neelofar S. A Study for Applications of Histogram in Image Enhancement // The International Journal of Engineering and Science. 2017. Vol. 6 (6). P. 59–63. DOI 10.9790/1813-0606015963.
8. Бортников В. М., Абрамчук М. В. Разработка программного компонента модуля съемки протяженных объектов для сканера пиломатериалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 167–173. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-167-173.
9. Janicka J., Rapinski J. Filtering the Results of ZIGBEE Distance Measurements with RANSAC Algorithm // Journal of AGG. 2016. Vol. 13, No. 1 (181). P. 83–88. DOI 10.13168/AGG.2015.0043.
10. Васильченко А. А., Коптелов Г. А., Савкин Д. В. Выделение объектов по зашумленным и смазанным снимкам методом гистограммного анализа // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXV Междунар. науч.-технич. конф. Воронеж, 2019. Т. 2. С. 163–171.
11. Шошин Е. Л. Радиолокационные методы контроля навигационной судоходной обстановки // Вестник кибернетики. 2018. № 3 (31). С. 113–134.