

Научная статья
УДК 621.3.092.24
DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-08>

Бесконтактный способ измерения длины электропроводящих свай

А.А. Аверин¹, Д.С. Горкин², В.В. Варенков³, В.И. Сахтеров⁴

¹⁻⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
(г. Троицк, Россия)

¹ averin@izmiran.ru; ² gorkin@izmiran.ru; ³ varenkov@mail.ru; ⁴ sakhterov@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В настоящее время для определения длины свай в грунте используют устройства, функционирующие которых основано на измерении времени распространения акустического сигнала, возникающего в момент удара по объекту. Однако такие устройства работают только в момент забивания свай. Также измерить длину арматуры в железобетонной свае можно неразрушающим контактным способом при помощи георадара, но для этого требуется обязательное электрическое подключение к арматуре, что не всегда возможно. Следовательно, в случаях обязательного неразрушающего контроля данный подход неприменим.

Цель. Предложить новый способ измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических линий.

Результаты. Разработан новый способ измерения длины электропроводящих свай с использованием импульсных георадаров, в котором длина свай вычисляется на основе полученной диэлектрической проницаемости с учетом времени распространения отраженного сигнала от конца свай. Рассмотрено измерение длины электропроводящей свай для случаев, когда: 1) генератор располагается в начале свай, а приемник передвигается вдоль свай; 2) генератор и приемник передвигаются вместе, зафиксированные рамкой.

Практическая значимость. Представленный способ измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических линий позволяет проводить неразрушающее бесконтактное измерение с использованием существующих георадаров. Дальнейшими направлениями будут создание специализированного прибора и отработка методик измерения различных типов электропроводящих свай.

Ключевые слова

Георадар, электропроводящие сваи, неразрушающий контроль, бесконтактное измерение, рефлектометр

Для цитирования

Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Бесконтактный способ измерения длины электропроводящих свай // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-08>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В 2010 г. совместно группой специалистов нескольких организаций был разработан метод измерения длины арматуры в электропроводящей свае георадаром контактным способом, требующим обязательного электрического подключения провода к арматуре. Суть этого метода состоит в том, что с помощью георадара измеряется известная калибровочная длина изолированного провода, разложенного на поверхности и подключенного к арматуре электропроводящей свай. [1]. Однако не всегда существует возможность непосредственного подключения к арматуре электропроводящей свай. Кроме того, процесс измерения затрудняет необходимость расположения длинного провода, что в сложных промышленных условиях при недостатке требуемого пространства накладывает ограничение на применение данного метода. Использование в данном методе глубинного георадара «Лоза», имеющего кабель между приемником и регистратором, требует соблюдения определенных условий по проведению измерений [2]. Помимо этого, возникают сложности в интерпретации измеренных данных – необходимо выбрать предположительную диэлектрическую проницаемость, складывающуюся из проницаемостей провода и арматуры.

Другие способы определения длины электропроводящих свай (такие как акустический способ и контактная электроразведка), измеряющие удельные электрические сопротивления среды или электри-

ческого потенциала на поверхности среды от сваи (металлический стержневой электрод) и заземляющего электрода, в данной работе не рассматриваются [3].

Ц е л ь р а б о т ы – предложить новый способ измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических линий.

Эксперименты и полученные результаты

При разработке нового бесконтактного способа измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических объектов применялся модернизированный георадар «Grot-12h» [4]. Для проведения измерений была доработана передающая антенна. В процессе экспериментов было выяснено, что полностью приложенная к исследуемому объекту резистивно-нагруженная антенна передатчика [5] слабо возбуждает электромагнитный импульс в арматуре, т.е. происходит замыкание наводимого от излучающей антенны электромагнитного импульса в арматуре без дальнейшего его распространения в остальной части электропроводящей сваи. При использовании только половины диполя ток в арматуре наводится, но максимальный принимаемый сигнал получается при использовании второй половины диполя в качестве воздушного излучателя сигнала. Так как нужно было расположить антенну как можно ближе к краю исследуемого объекта, которым может быть свая под зданием, то оптимальным решением стала Г-образная антенна. При возбуждении таким образом наводимых в свае токов измеряемый объект становится продолжением антенны (т.е. половиной диполя), которая без резистивной нагрузки имеет склонность к паразитным колебаниям. Данный способ позволяет выполнять работу при минимальных перемещениях приемника, а в некоторых случаях при решении однотипных задач возможно проведение измерений без перемещений.

Схема измерений длины электропроводящей сваи бесконтактным способом приведена на рис. 1, где показаны расположение приборов и пути распространения электромагнитных импульсов по измеряемому объекту. Сигнал, излучаемый передатчиком ПРД, имеет два пути распространения к приемнику ПРМ: воздушной волной (путь l_1) и по электропроводящей свае (путь l_2). При этом в зависимости от конструкции измеряемого объекта для организации синхронизации приемника используются сигналы воздушной и прямой волн от электропроводящей сваи. Временную разность между сигналами, принятыми через пути l_1 и l_2 , можно использовать для определения диэлектрической проницаемости измеряемого объекта. Расстояние от приемника до конца арматуры l_3 при расчетах необходимо удваивать, так как этот сигнал является отраженным от конца арматуры.

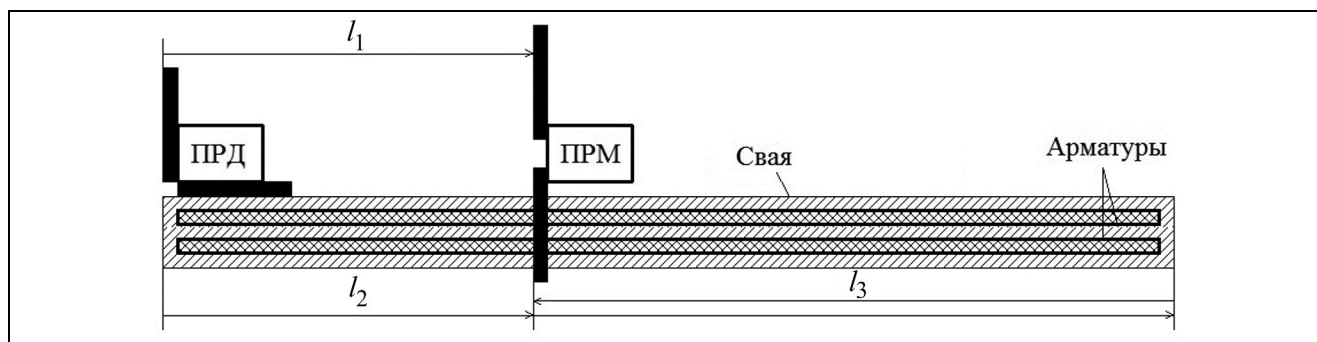


Рис. 1. Схема измерений длины электропроводящей сваи бесконтактным способом

Fig. 1. Diagram of measurements of the length of an electrically conductive pile by contactless method

Диэлектрическая проницаемость ε материала сваи вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \left(\frac{t \cdot c}{L} + 1 \right)^2, \quad (1)$$

где t – временная разность между сигналами, принятыми через пути l_1 и l_2 , нс; $c = 30$ см/нс – скорость света; L – расстояние между передатчиком и приемником, см.

Зная время прохождения и диэлектрическую проницаемость, можно вычислить длину электропроводящей сваи, выразив ее из формулы (1).

Предложенный способ измерения основан на фиксации приемником прямого и отраженного сигналов с последующей обработкой в программе, позволяющей выделить характерные сигналы, возникающие в арматуре. Вид прямого и отраженного сигналов совпадает по форме с *S*-образными сигналами, получаемыми рефлектометрами кабельных линий [6, 7]. Рефлектометры, работающие только по двухпроводным

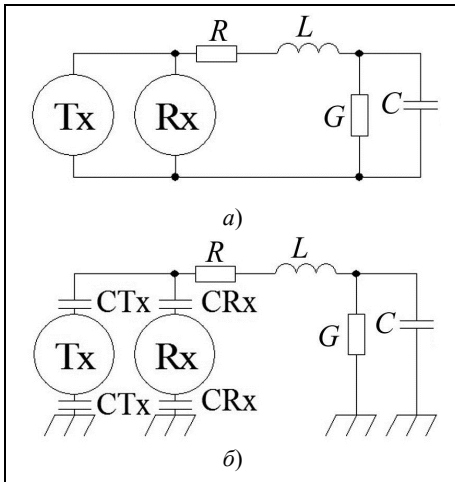


Рис. 2. Схемы измерений рефлектометром двухпроводных линий (а) и расположенного в некоей среде уединенного изолированного провода без электрического контакта (б): *R* – омическое сопротивление жил кабеля; *L* – индуктивность жил кабеля
Fig. 2. Measurement schemes with a reflectometer of two-wire lines (a) and a solitary insulated wire located in a certain medium in a non-contact way (b): *R* – ohmic resistance of cable cores; *L* – inductance of cable cores

линиям, получают отраженные от концов проводов такие же *S*-образные сигналы, которые в зависимости от соединения этих линий могут быть разной фазы. Также фиксируют отражения *S*-образных сигналов от мест соединений проводников и неоднородностей линий. Принцип измерений заимствован из теории и практики рефлектометрии, где рефлектометры используют гальваническую связь с линией. В предлагаемом способе измерений используется емкостная связь с передачей радиоволны по проводнику.

На рис. 2 представлены схемы измерений рефлектометром двухпроводных линий (рис. 2,а) и расположенного в некоей среде уединенного изолированного провода без электрического контакта (рис. 2,б). Как видно из рисунка, отличия возникают в проводимости материала изоляции между проводом и средой *G*, емкости между проводом и средой *C* и возникновении емкостных связей у генератора импульсов *Tx* и приемника сигналов *Rx* с уединенным изолированным проводом и средой, обозначенных как *CTx* и *CRx*.

При проведении экспериментов использовался георадар в модификации «Grot-12h», так как у него полоса пропускания усилителей шире чем у «Grot-12» [8]. Возможно, что более высокочастотные георадары покажут лучшие результаты при условии достаточной мощности генераторов и размеров антенн [9,10].

На начальном этапе экспериментов использовались металлические проводники разного диаметра и способа изготовления: от медного провода толщиной 1 мм в изоляции или металлического

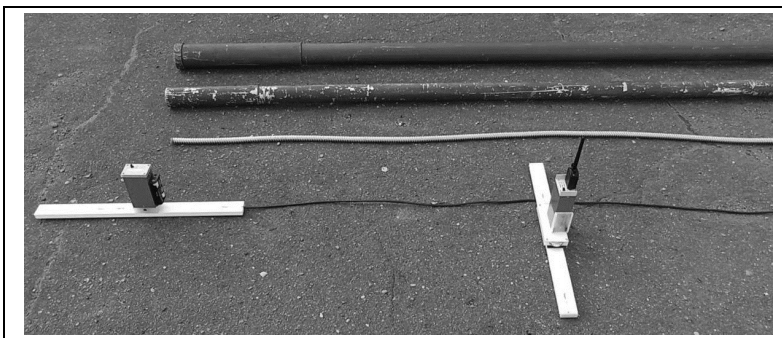


Рис. 3. Измерение длины 14-метрового изолированного провода
Fig. 3. Measuring the length of a 14-meter insulated wire

рукава диаметром 20 мм до металлических труб диаметром 80 мм (рис. 3). Исследовались различные расположение проводников и изгиб измеряемой линии до 90°. Обработка данных производилась в программе MATRIX [11].

Первоначально для статистики проводились измерения на одном месте (рис. 4, слева). Передатчик располагался в начале измеряемого проводника, приемник пересекал проводник половиной диполя на расстоянии 1 м от передатчика, а на расстоянии 14 м наблюдался от-

раженный от конца провода сигнал. Волновая форма принятого сигнала с классическими *S*-образными импульсами, возникающими в двухпроводных рефлектометрах для измерения кабельных линий, показана на рис. 4 справа.

При перемещении приемника к концу провода без прерывания измерений наблюдалось сближение прямого сигнала от передатчика и отраженного сигнала от конца провода. К концу измеряемого провода сигналы, естественно, сливались в одну точку. Отметим, что в зависимости от измеряемого объекта необходимо подбирать схему фильтрации и обработки измеряемого объекта, но дальнейшие измерения подобных объектов различной длины будут обрабатываться уже по ранее подобранным параметрам.

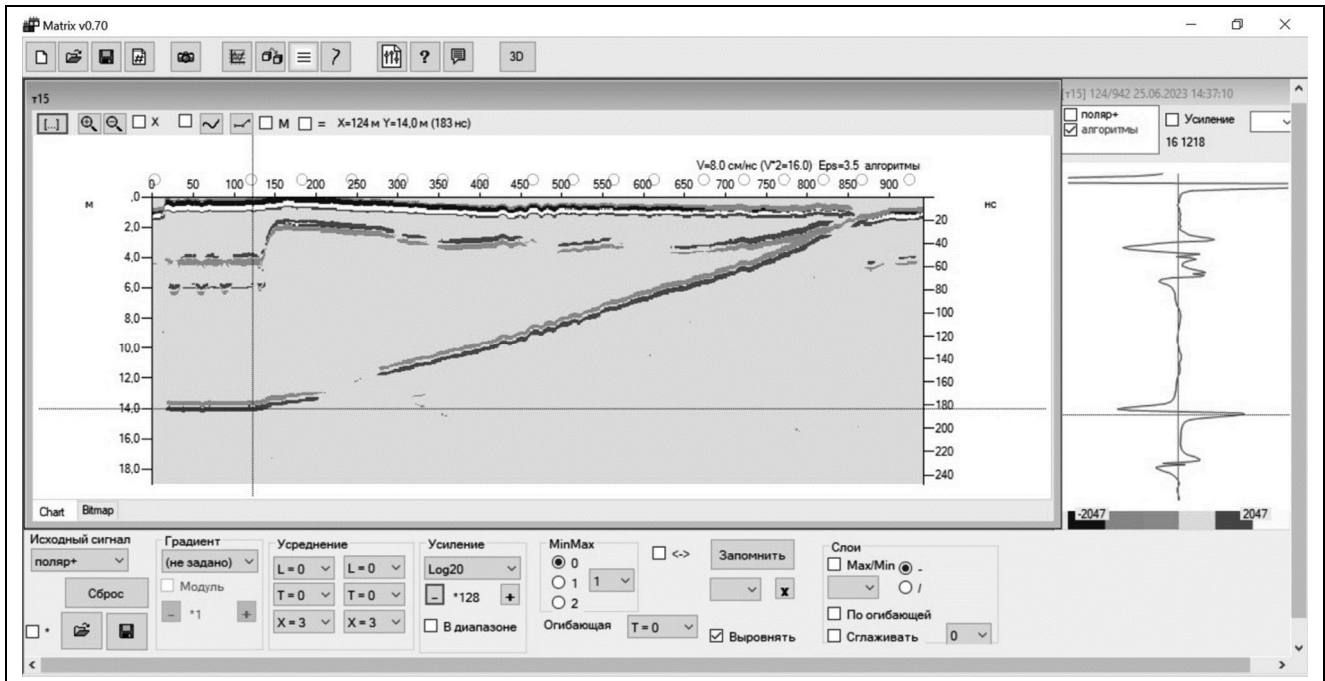


Рис. 4. Окно программы Matrix с обработанными данными измерения 14-метрового изолированного провода
 Fig. 4. Window of the program Matrix with processed measurement data of a 14-meter insulated wire

Другая картина наблюдалась при измерении более массивных металлических изделий. В этом случае сигнал от передатчика при однократном прохождении полностью не затухал, и возникали переотражения, наблюдаемые как фантомные сигналы. На рис. 5 приведены обработанные данные для объекта длиной 8 м. После того, как приемник начали передвигать от передатчика к концу металлического рукава, отраженный от его конца сигнал начал приближаться по форме к прямому сигналу, но при этом остался и кратный (фантомный) сигнал. Особенно это хорошо проявляется при измерении труб диаметром 60–80 мм, когда регистрируются классические сигналы многократных переотражений, возникающих в длинных линиях.

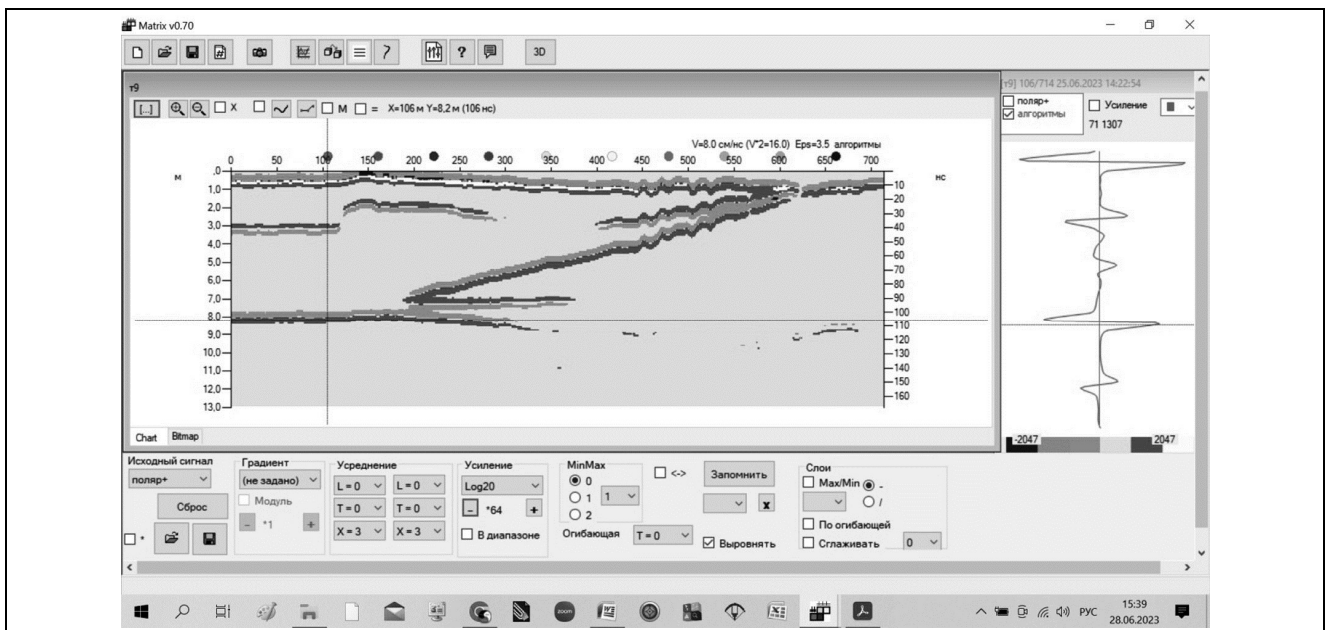


Рис. 5. Обработанные данные измерения металлического рукава длиной 8 м
 Fig. 5. Processed measurement data of a metal sleeve with a length of 8 m

На рис. 6 показаны обработанные данные для случая многократного переотражения при измерении трубы диаметром 80 мм с толщиной стенки 8 мм и длиной 12 м. Из рисунка видно, что многократные сигналы по мере переотражений ослабевают, и происходит уменьшение кажущейся длины трубы.

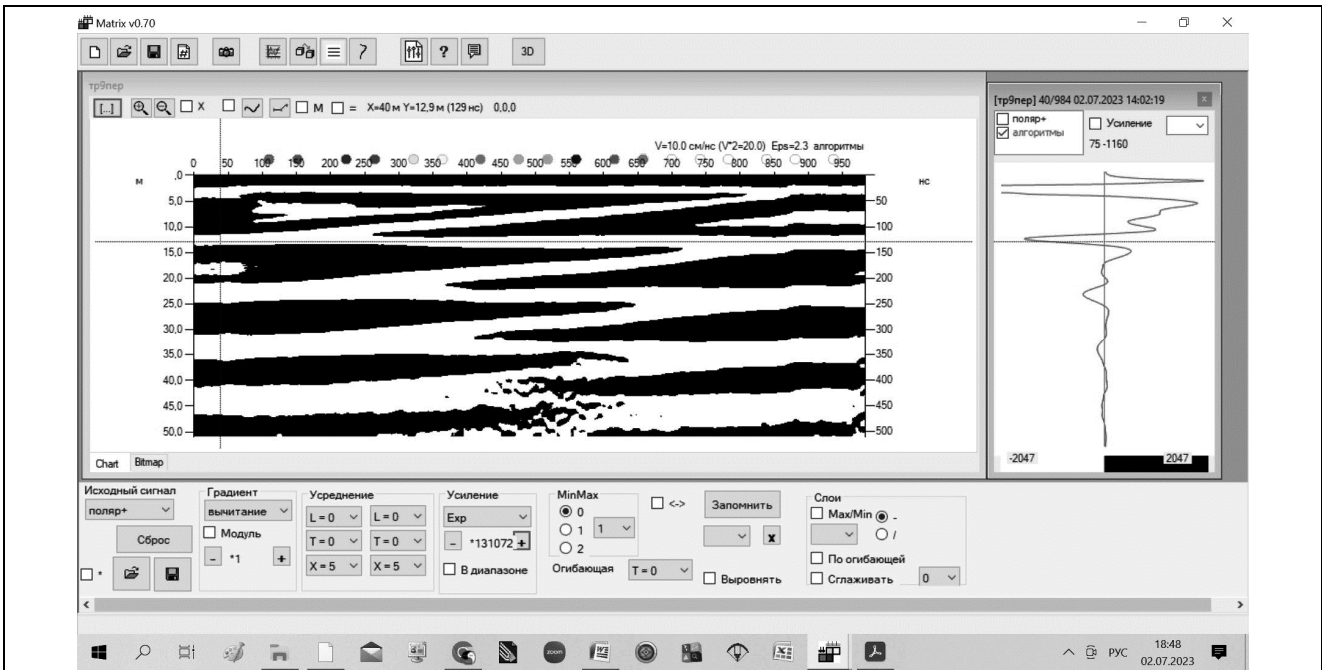


Рис. 6. Окно программы с обработанными данными для трубы диаметром 80 мм и длиной 12 м
 Fig. 6. View of the processed data for a pipe with a diameter of 80 mm and a length of 12 m

При перемещении зафиксированных на рамке передатчика и приемника наблюдается другая картина. На рис. 7 представлен результат перемещения георадара по измеряемому объекту: прямой и отраженный сигналы пересекаются, при этом возникают кратные переотражения и фантомный слой, равный длине объекта.

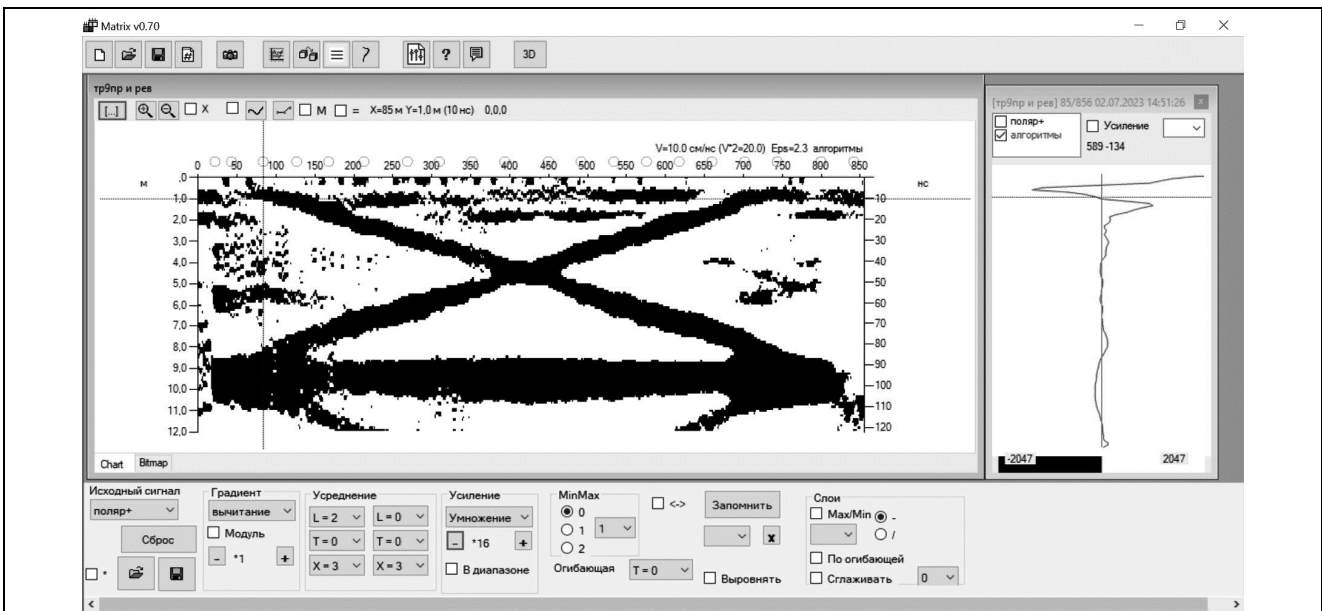


Рис. 7. Окно программы с обработанными данными измерения длины объекта перемещением георадара
 Fig. 7. Window of the program with processed data measuring the length of an object by moving a georadar

В ходе эксперимента было произведено измерение длины осветительного столба, лежащего на земле (рис. 8). Как и в предыдущем случае, вначале проводилась регистрация сигналов на одном месте, а затем – перемещение приемника к концу столба. Предположительно, из-за присутствия в столбе нескольких параллельных соединенных между собой арматур и влияния влажного грунта полученные данные немного отличаются от металлических протяженных линий (рис. 9). При использовании для расчетов стандартной диэлектрической проницаемости $\epsilon = 9$, установленной для бетона, вычисленная длина столба совпадает с длиной, измеренной рулеткой.



Рис. 8. Измерение длины железобетонного осветительного столба

Fig. 8. Measuring the length of a reinforced concrete lighting pole

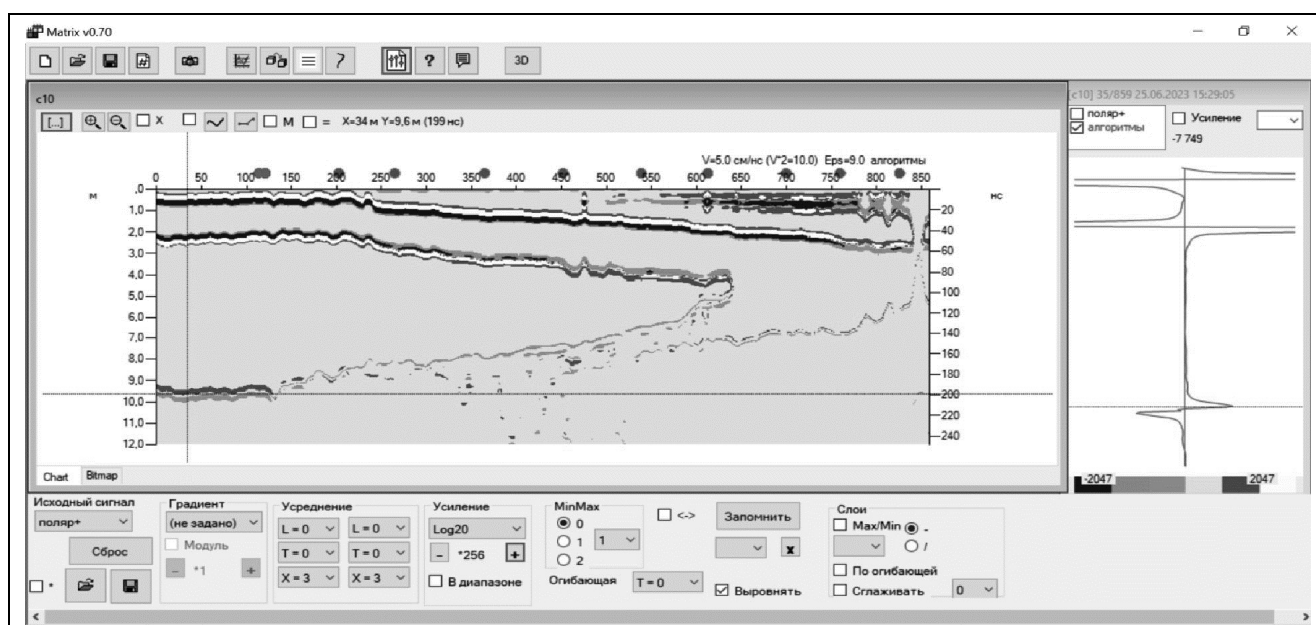


Рис. 9. Вид обработанных данных измерения длины железобетонного осветительного столба

Fig. 9. View of the processed data measuring the length of the lighting pole

При обработке радарограмм для вычисления длины измеряемого объекта необходимо знать диэлектрическую проницаемость материала. При измерении изолированных проводов нужно учитывать коэффициент укорочения. Для создания промышленной методики измерения длины потребуется проведение экспериментов с реальными железобетонными и металлическими сваями различных типов.

Заключение

В предлагаемом бесконтактном способе измерения длины электропроводящих свай и других протяженных металлических линий фиксируются прямые сигналы от передатчика по воздуху и объекту, а также отраженный сигнал от конца измеряемого объекта, на основе которых затем вычисляется длина объекта.

Наблюдаемые в проведенном эксперименте сигналы имеют характерную форму и повторяемость. При фильтрации и усилении сигналы имеют достаточную амплитуду, что позволяет выделить их на фоне посторонних сигналов.

В результате исследования была установлена взаимосвязь диэлектрической проницаемости материала электропроводящих свай, скорости распространения сигналов в объекте и коэффициента укорочения.

Список источников

1. Будько В.Б., Бутырин А.Ю., Грунин И.Ю., Морозов П.А., Копейкин В.В., Макеев А.В., Горкин Д.С. Георадиолокационный метод неразрушающего контроля при решении экспертных вопросов, связанных с установлением длины железобетонной сваи в фундаменте здания // Теория и практика судебной экспертизы. 2010. №1 (17). С. 200–224.
2. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И., Меркулов С.В. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
3. Матвеев Б.К. Электроразведка, М.: Недра. 1990. С. 31–32.
4. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
5. Wu T.T., King R.W.P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Trans. Antennas Propag. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373.
6. Шилин А.Н., Шилин А.А., Артюшенко Н.С. Расчет погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередачи // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 52–59.
7. Дьяконов В. Рефлектометрия и импульсные рефлектометры // Компоненты и технологии. 2012. № 1. С. 164–172.
8. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Пушкарев В.А., Резников А.Е., Сахтеров В.И., Шерстнев А.В. Исследование воронки на полуострове Ямал 10 ноября 2014 г. георадарами ГРОТ 12 и ГРОТ 12н // Материалы конф. «Освоение Арктики – новый виток в развитии отечественной науки и инноваций». Науч. вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2015. № 2(87). С. 81–89.
9. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-3» // Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. ООО «Логические системы». Россия, Московская область. 2018 г. <https://www.geotech.ru/>
10. <http://www.geoscanners.com>
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663673 от 27.06.2023 г. Название: MATRIX. / Горкин Д.С., Варенков В.В.

Информация об авторах

Александр Анатольевич Аверин – инженер
SPIN-код: 1995-8814

Дмитрий Сергеевич Горкин – вед. инженер
SPIN-код: 5641-7300

Владимир Викторович Варенков – науч. сотрудник
SPIN-код: 6186-9270

Владимир Иванович Сахтеров – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник
SPIN-код: 7559-8325

Статья поступила в редакцию 01.08.2023

Одобрена после рецензирования 07.08.2023

Принята к публикации 28.08.2023

Original article

Contactless method of measuring the length of electrically conductive piles

A.A. Averin¹, D.S. Gorkin², V.V. Varenkov³, V.I. Sahterov⁴

¹⁻⁴ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (Troitsk, Russia)

¹ averin@izmiran.ru; ² gorkin@izmiran.ru; ³ varenkov@mail.ru; ⁴ sakhterov@mail.ru

Abstract

To determine the length of a pile in the ground, devices are used based on measuring the propagation time of an acoustic signal that occurs during impact on an object. The disadvantage of the method: such devices work only at the time of driving the pile. Also known is a method for measuring the length of reinforcement using a georadar in a reinforced concrete pile as a non-destructive contact method. It requires a mandatory electrical connection to the fittings, which is not always possible. Therefore, in cases of mandatory non-destructive testing, this method is not applicable. A new method for controlling the length of electrically conductive piles using pulsed georadar has been created. This method measures the length of an electrically conductive pile by fixing the difference in the time of passage of the direct signal of the emitted pulse through the air and in the pile. Then, the dielectric constant of the electrically conductive pile is calculated. The pile length is calculated based on the obtained dielectric constant and the propagation time of the reflected signal from the end of the pile. The experiments carried out showed the possibility of measuring in different ways. The generator is located at the beginning of the pile, and the receiver moves along the pile. It is also possible to measure by moving the generator and receiver fixed by the frame. Each method has its own characteristic representation of the received data. The choice of method depends on the conditions of the measurements. For specific measurements, it may be necessary to change the design of georadar antennas. The developed method makes it possible to carry out non-destructive non-contact measurement using existing georadars. Further work is required on the development of a specialized device and the development of methods for measuring various types of electrically conductive piles.

Keywords

Georadar, electrically conductive piles, non-destructive testing, non-contact measurement, reflectometer

For citation

Averin A.A., Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sahterov V.I. Contactless method of measuring the length of electrically conductive piles. *Radiotekhnika*. 2023. V. 87. № 9. P. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-08> (In Russian)

References

1. Bud'ko V.B., Butyrin A.Ju., Grunin I.Ju., Morozov P.A., Kopejkin V.V., Makeev A.V., Gorkin D.S. Georadiolokacionnyj metod nerazrushajushhego kontrolja pri reshenii jekspertnyh voprosov, svjazannyh s ustanovleniem dliny zhelezobetonnoj svai v fundamente zdanija. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2010. №1 (17). S. 200–224 (in Russian).
2. Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemskij D.E., Morozov P.A., Berkut A.I., Merkulov S.V. Glubinnij georadar: principy i primenenie. *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*. 2018. T. 23. № 4. S. 28–36 (in Russian).
3. Matveev B.K. *Jelektrozazvedka*, M.: Nedra. 1990. S. 31–32 (in Russian).
4. Volkomirskaja L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Sahterov V.I. Sovremennye georadary serii «GROT» dlja jekologicheskogo monitoringa. *Jekologicheskie sistemy i pribory*. 2012. № 5. S. 3–5 (in Russian).
5. Wu T.T., King R.W.P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1965. V. 13. № 3. P. 369–373.
6. Shilin A.N., Shilin A.A., Artjushenko N.S. Raschet pogreshnostej reflektometrov dlja monitoringa linij jelektroperedachi. *Kontrol'. Diagnostika*. 2015. № 9. S. 52–59.
7. D'jakonov V. Reflektometrija i impul'snye reflektometry. *Komponenty i tehnologii*. 2012. № 1. S. 164–172 (in Russian).
8. Volkomirskaja L.B., Varenkov V.V., Gulevich O.A., Pushkarev V.A., Reznikov A.E., Sahterov V.I., Sherstnev A.V. Issledovanie voronki na poluostrove Jamal 10 nojabrja 2014 g. georadarami GROT 12 i GROT 12n. *Materialy konf. «Osvoenie Arktiki – novyj vitok v razvitii otechestvennoj nauki i innovacij»*. *Nauch. vestnik Jamalo-Neneckogo avtonomnogo okruga*. 2015. № 2(87). S. 81–89 (in Russian).
9. Radiotekhnicheskij pribor podpoverhnostnogo zondirovanija (georadar) «Oko-3». *Universal'nyj bazovyj komplekt. Tehnicheskoe opisanie. Instrukcija po jekspluatacii*. OOO «Logicheskie sistemy». Rossija, Moskovskaja oblast'. 2018 g. <https://www.geotech.ru/> (in Russian).
10. <http://www.geoscanners.com>
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2023663673 ot 27.06.2023 g. Nazvanie: MATRIX. Gorkin D.S., Varenkov V.V. (in Russian).

Information about the authors

Alexander A. Averin – Engineer

Dmitij S. Gorkin – Leading Engineer

Vladimir V. Varenkov – Research Scientist

Vladimir I. Sakhterov – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 01.08.2023

Approved after reviewing 07.08.2023

Accepted for publication 28.08.2023