

Радиолокационный комплекс мониторинга положения буровой головки в устройстве наклонно-направленного бурения

А. В. Вагин[✉], А. С. Воротынцева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] av.vagin@bk.ru

Аннотация

Введение. Наклонно-направленное бурение к настоящему времени можно считать традиционным способом бестраншейной прокладки подземных коммуникаций, разведки твердых полезных ископаемых, проведения геологоразведочных работ в обеспечение инженерно-геологических задач промышленности. Для этих целей используется устройство наклонно-направленного бурения с высокоточным комплексом определения координат буровой головки для соответствия текущей трассы бурения заданной проектной. Проблема получения точных координат (глубина, зенит, азимут) буровой головки является одной из приоритетных задач при бестраншейном бурении. Авторами ранее рассмотрен акустический способ мониторинга положения буровой головки в устройстве наклонно-направленного бурения. В настоящей статье рассматривается радиолокационный комплекс мониторинга положения буровой головки с поверхности земли с неподвижными маяками-ответчиками. Применение радиолокационного метода получения информации позволит усовершенствовать процесс бурения – высокая точность позиционирования, постоянный автоматический мониторинг положения, снижение временных и финансовых затрат.

Цель работы. Показать возможность построения радиолокационного комплекса получения информации о позиционировании буровой головки устройства наклонно-направленного бурения на основе маяков-ответчиков, распределенных на поверхности земли.

Материалы и методы. Исследование возможности построения радиолокационного комплекса мониторинга положения буровой головки устройства наклонно-направленного бурения с поверхности земли с неподвижными маяками-ответчиками основано на физических принципах, используемых в мобильных системах, т. е. определение местоположения зонда и его параметров по радиосигналам, излучаемым зондом в диапазоне частот, составляющем десятки килогерц, для максимального снижения влияния неоднородностей в грунте.

Результаты. Исследована возможность применения радиолокационного метода получения координат буровой головки при мониторинге ее положения в процессе проведения буровых работ. Рассмотрен принцип работы радиолокационного комплекса, определены схемы расположения маяков-ответчиков на поверхности земли и относительно буровой головки, описана технология обеспечения буровых работ при таком методе, а также отличительные особенности.

Заключение. В статье предложен вариант определения координат буровой головки и автоматического мониторинга ее положения в реальном времени. Предлагаемый вариант построения высокоточного радиолокационного комплекса передачи информации может быть использован при проектировании и модернизации техники наклонно-направленного бурения.

Ключевые слова: радиолокация, позиционирование, буровая головка, маяк-ответчик

Для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Радиолокационный комплекс мониторинга положения буровой головки в устройстве наклонно-направленного бурения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 90–101. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-90-101

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; принята к публикации после рецензирования 13.11.2023; опубликована онлайн 29.02.2024

Radar Method for Obtaining Information from a Horizontal Directional Drilling Device

Anton V. Vagin[✉], Alena S. Vorotyntseva

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉] av.vagin@bk.ru

Abstract

Introduction. Directional drilling is a conventional method for trenchless installation of underground communications, exploration of solid minerals, and geological exploration. These tasks can be implemented using a directional drilling installation equipped with a high-precision unit for determining the drilling head coordinates to match the current and specified drilling routes. The problem of obtaining precise coordinates (depth, zenith, azimuth) of the drilling head is a priority task in trenchless drilling. We previously considered an acoustic method for monitoring the drilling head position in a directional drilling device. In this work, we consider a radar complex for monitoring the drilling head position from the surface of the earth with fixed transponder beacons. The radar method for obtaining such information allows the drilling process to be optimized by increasing the positioning accuracy, providing for constant automatic position monitoring, as well as reducing the time and financial costs.

Aim. To demonstrate the possibility of constructing a radar complex for obtaining information about positioning of the drilling head of a directional drilling installation based on transponder beacons distributed on the surface of the earth.

Materials and methods. The study was based on the physical principles used in mobile systems, i.e., determining the location of the probe and its parameters using radio signals emitted by the probe in the frequency range of tens of kHz, to minimize the influence of soil inhomogeneities.

Results. The possibility of using the radar method for obtaining the drilling head coordinates when monitoring its position during drilling operations was studied. The operational principle of such a radar complex was considered; the schemes of positioning transponder beacons on the surface of the earth and relative to the drilling head were developed; a technology for supporting drilling operations using this method was described.

Conclusion. We propose an approach to determining the drilling head coordinates and their automatic monitoring in real time. The proposed approach to constructing a high-precision radar information transmission complex can be used in the design and modernization of directional drilling equipment.

Keywords: radiolocation, positioning, drilling head, transponder beacon

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Radar Method for Obtaining Information from a Horizontal Directional Drilling Device. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 90–101. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-90-101

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 28.09.2023; accepted 13.11.2023; published online 29.02.2024

Введение. Интенсивное освоение новых нефтяных и газовых месторождений, необходимость прокладки труб и кабельных трасс под водными, рельсовыми, мостовыми, дорожными преградами, проведения инженерно-геологических работ, а также активное расширение жилых территорий городов диктуют необходимость бестраншейной прокладки подземных коммуникаций и дноуглубительных работ.

Распространенным способом бестраншейной прокладки подземных коммуникаций является наклонно-направленное бурение [1, 2].

Наклонно-направленное бурение – способ сооружения скважин с отклонением от вертикали по заранее заданному направлению (проектной трассе). Наклонно-направленное бурение применяется как при бурении скважин на нефть и газ, так и при разведке твердых полезных ископаемых [3].

Наиболее эффективная область использования наклонно-направленного бурения – разработка месторождений в акваториях, в болотистых или сильно пересеченных местностях и в случаях, когда строительство буровых скважин может нарушить условия охраны окружающей среды [4].

Наклонно-направленное бурение применяют также при бурении вспомогательных скважин для глушения открытых фонтанов, при многоствольном бурении или отклонении нижней части ствола вдоль продуктивного горизонта с целью увеличения дренажа.

Сущность процедуры бурения заключается в использовании специальных мобильных буровых установок, выполняющих предварительное (пилотное) бурение по заранее рассчитанной траектории (проектной трассе) [5]. С помощью оборудования постепенно расширяют скважину и, в зависимости от задачи, например, протаскивают в образовавшуюся полость газопровод либо кабельную трассу и т. д. Весь процесс бурения непрерывно мониторят и при необходимости корректируют маршрут прокладки трассы. Технология включает в себя несколько этапов. На первом этапе выполняют бурение пилотной скважины вращающейся буровой головкой с закрепленным на ней резцом. Внутренняя полость буровых штанг используется для подачи раствора [6] и стабилизации стенок канала. Затем буровую скважину калибруют вращающимся расширителем до нужного диаметра. Выбуренный грунт собирают в приемный котлован с последующей утилизацией. В финале работ реализуют конкретную цель: забор грунта либо протаскивание газопровода по буровому каналу и испытание на герметичность и т. д.

Применение наклонно-направленного бурения позволяет исключить выполнение подводных, водолазных и берегоукрепительных работ, требующих дополнительных затрат, сберечь естественно-экологическое состояние водных ресурсов, дает возможность сохранить железнодорожные пути или автомобильные дороги в хорошем состоянии.

Наклонно-направленное бурение нефтяных и газовых скважин осуществляется по специальным профилям. Профили скважин могут варьироваться, но при этом верхний интервал ствола наклонной скважины должен быть вертикальным, с последующим отклонением в запроектированном азимуте. При геологической разведке твердых полезных ископаемых наклонно-направленное бурение осуществляется шпиндельными буровыми станками с земной поверхности или из подземных горных выработок [7]. Буре-

ние таких скважин отличается тем, что вначале они имеют прямолинейное направление, заданное шпинделем бурового станка, а затем в силу анизотропии разбуриваемых пород отклоняются от прямолинейного направления.

Подобная технология наклонно-направленного бурения для добычи нефти и газа самым активным образом развивается с 1990-х гг. и на сегодняшний день позволяет создавать скважины с отклоненными участками длиной в несколько километров.

Рост объемов наклонно-направленного бурения скважин с углами отклонения ствола скважин от вертикали более 50° обусловил ограничения по применению традиционных методов исследований с помощью аппаратуры, спускаемой в скважину на кабеле, и вызвал необходимость разработки специальных технологий доставки скважинных приборов в интервал исследований. Решение этой проблемы возможно с помощью бескабельных измерительных систем, доставляемых на забой с помощью бурового инструмента – буровой головки.

На российском рынке наиболее распространенной локационной системой для горизонтального направленного бурения является система DigiTrak Eclipse, выпускаемая компанией Digital Control Incorporated (США) [8].

Применение такого локационного оборудования основано на использовании электромагнитных волн для контроля положения буровой головки через установленный в нее приемоизлучающий зонд. Использование электромагнитных волн для определения координат при методе горизонтального направленного бурения накладывает ряд ограничений на технологию бурения, а именно [9]:

1) на месте калибровки в радиусе до 3 м должны отсутствовать такие металлические конструкции, как стальной трубопровод, цепные ограждения, рельсы, строительное оборудование или автомобили;

2) приемник не должен располагаться над железобетонными или подземными коммуникациями;

3) приемник не должен располагаться рядом с сильнодействующими источниками электромагнитного излучения.

Наличие указанных недостатков при выполнении бурения влияет на определение те-

кущих координат буровой головки – приводит к ухудшению помехосигнальной обстановки и, соответственно, к искажению планируемой траектории пилотного бурения.

Получение точных координат о положении буровой головки для определения соответствия текущей трассы бурения заданной проектной трассе – важнейший аспект процедуры наклонно-направленного бурения. Определяемыми координатами буровой головки являются угол наклона (зенит), угол поворота (азимут), глубина залегания.

В [10] рассмотрен и промоделирован акустический способ передачи информации о пространственном положении буровой головки. Акустический способ основан на передаче закодированных ультразвуковых импульсов по основанию буровой колонны от излучающего датчика к приемному и соответствующей обработке принятого сигнала.

Не вступая в дискуссию о конкретной выполняемой задаче и выборе конкретных технических характеристик составных частей комплекса, авторы предлагают рассмотреть радиолокационный метод получения координат бу-

ровой головки для корректного выполнения процедуры бурения.

Радиолокация с поверхности земли с неподвижными маяками-ответчиками. Радиолокационный комплекс с поверхности земли с неподвижными маяками-ответчиками (МО) построен на физических принципах, используемых в мобильных системах, т. е. определение местоположения зонда и его параметров по радиосигналам, излучаемым зондом в диапазоне частот, составляющем десятки килогерц, для максимального снижения влияния неоднородностей в грунте.

Комплекс, предлагаемый в данной статье, предусматривает традиционное размещение в буровой головке системы наклонно-направленного бурения электронного зонда с автономным электропитанием, вырабатывающего данные о текущем положении буровой головки, температуре корпуса, разряде автономного источника питания, а также имеющего акустический микрофон для передачи аудиоинформации о процессе бурения.

Типовая и наиболее распространенная конструкция буровой головки представлена на рис. 1 [10, 11].

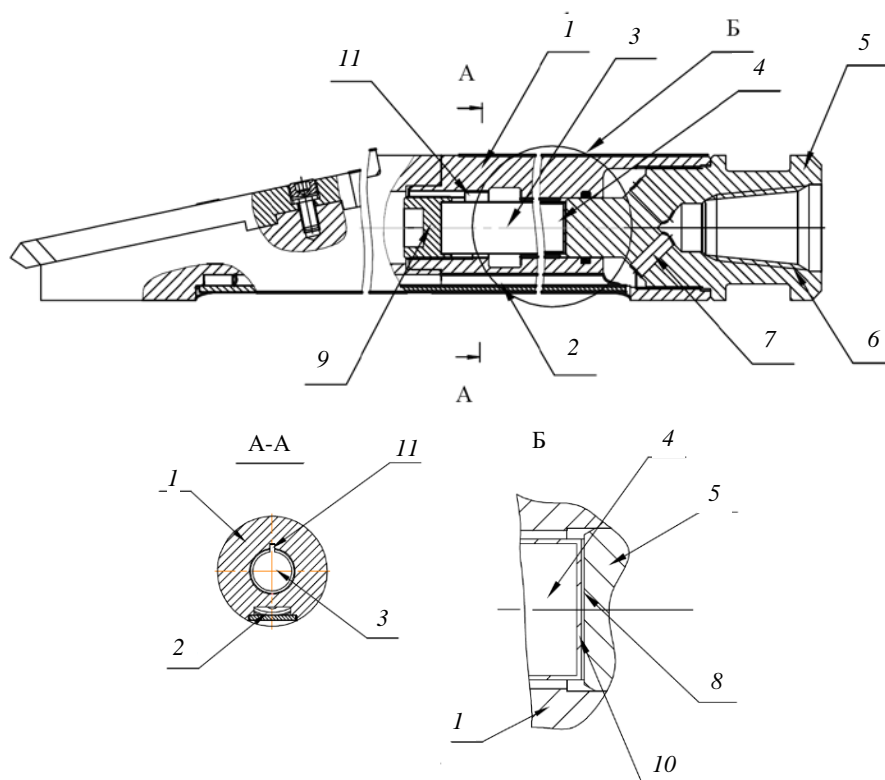


Рис. 1. Буровая головка с размещенным внутри зондом

Fig. 1. Drilling head with a probe inside

Конструкция содержит корпус 1 с каналами 2 для пропуска промывочной жидкости; защитный контейнер 3; размещенный в защитном контейнере радиолокационный зонд 4 и датчики (не показаны); переводник 5 с замковым соединением 6 и отверстиями 7 для пропуска промывочного агента в каналы 2 корпуса 1 и стыковочный узел 8.

На противоположной концевой части корпуса 1 размещено устройство 9 поджима защитного контейнера 3. Радиолокационный зонд 4 установлен с возможностью взаимодействия с внутренней торцевой поверхностью стенки 10 защитного контейнера 3.

Корпус 1, устройство поджима контейнера 9 и торцевая часть переводника 5 образуют герметичную камеру, в которой размещен защитный контейнер 3. Стыковочный узел выполнен в виде размещенного между наружной торцевой поверхностью стенки 10 защитного контейнера и торцевой частью переводника 5 слоя кремнийорганической пасты.

Для ориентирования защитного контейнера 3 относительно корпуса 1 предусмотрено шлицевое соединение 11.

В качестве датчиков, вырабатывающих ин-

формацию о текущем положении буровой головки, применяются интегральные акселерометр и компас, определяющие пространственное положение буровой головки.

Информация о текущем положении буровой головки передается по радиоканалу в систему неподвижных МО, располагаемых на поверхности земли, и используется для управления процессом буровых работ. Радиолокационный комплекс аппаратно состоит из двух частей: системы маяков-ответчиков из трех устройств, располагаемых на поверхности земли над буровой головкой, в которой один МО – основной (базовый МО № 3), другие два (МО № 1, № 2) – дополнительные (упрощенной конструкции), связанные с основным кабелями связи, и системы управления, обработки, отображения и регистрации информации (защищенного ноутбука), располагаемой на рабочем месте оператора буровой установки.

Схема расположения МО на поверхности земли представлена на рис. 2. Здесь МО № 1, № 2 – маяки-ответчики; базовый МО № 3 – базовый маяк-ответчик; R_1, R_2, R_3 – значения наклонной дальности от зонда до МО № 1, № 2, № 3 соответственно; $Z_{1-2}, Z_{1-3}, Z_{2-3}$ – рас-

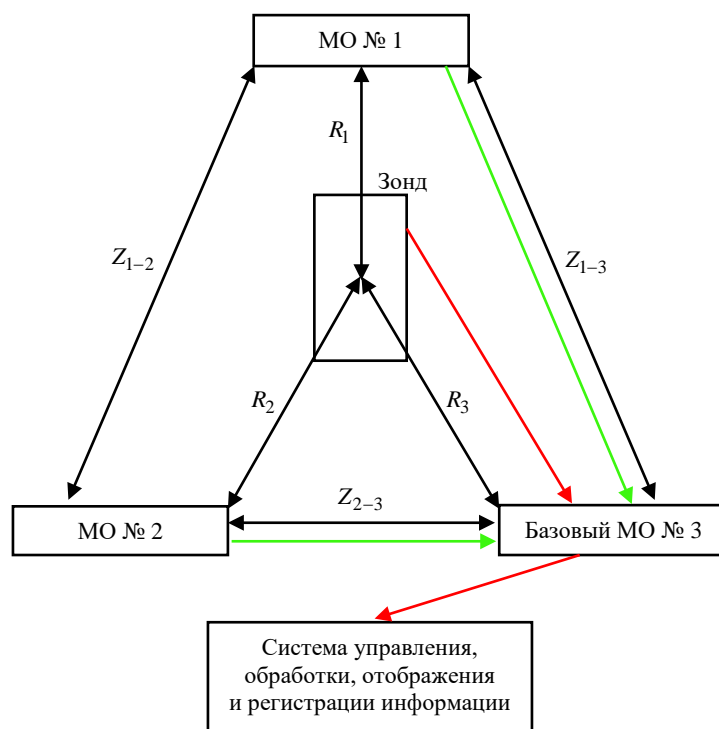


Рис. 2. Схема расположения маяков-ответчиков на поверхности земли

Fig. 2. Layout of transponder-beacons on the surface of the earth

стояния между соответствующими маяками-ответчиками. Зеленой стрелкой на рис. 2 показано соединение кабелем связи МО № 1, № 2 с МО № 3; красной стрелкой – радиоканал передачи информации от зонда к базовому МО № 3 и от МО № 3 к системе управления, обработки, отображения и регистрации информации.

Базовый МО № 3 обеспечивает:

- определение наклонной дальности от его антенны до зонда R_3 по радиоканалу;
- электропитание и прием значений наклонной дальности до зонда R_1, R_2 маяков-ответчиков МО № 1, № 2;
- прием информации от зонда о его параметрах: положении, температуре, наклоне его оси, аудиоинформации от микрофона, об уровне разряда источника питания.

Система управления, обработки, отображения и регистрации информации обеспечивает в режиме подготовительных операций:

- ввод данных $Z_{1-2}, Z_{1-3}, Z_{2-3}$ оператором;
- ввод в электронном виде топографического плана рабочего участка;
- ввод изображения топографического плана рабочего участка с привязкой к системе прямоугольных координат;
- нанесение положений маяков-ответчиков на топографический план в графическом режиме.

Система управления, обработки, отображения и регистрации информации обеспечивает в реальном масштабе времени:

- обмен командами управления с базовым МО № 3 по радиоканалу;
- прием информации от маяков-ответчиков и зонда (через базовый МО № 3) по радиоканалу;

– расчет координат зонда (буровой головки) относительно МО № 1, № 2, № 3;

– отображение на экране монитора текущего положения зонда и МО в графическом трехмерном виде на топографическом плане рабочего участка с возможностью выбора проекции наблюдения;

– отображение на экране монитора в графическом трехмерном виде траектории движения зонда относительно МО на топографическом плане рабочего участка с возможностью выбора проекции наблюдения;

– отображение на экране монитора цифровых данных – положение, температура, наклон оси зонда, уровень разряда источников питания зонда и базового МО № 3;

– воспроизведение в наушниках аудиоинформации от микрофона зонда;

– сигнализацию при выходе зонда (буровой головки) из зоны оптимального определения координат с помощью МО и необходимости переноса МО (либо одного МО) на соседний участок;

– регистрацию всей поступающей и расчетной информации в течение миссии.

В режиме постобработки система управления обеспечивает воспроизведение зарегистрированной графической и цифровой информации в ускоренном режиме.

МО № 1, № 2 обеспечивают определение значений наклонной дальности до зонда R_1, R_2 по его сигналам и выдают данные в базовый МО № 3.

Структурная схема базового МО № 3 представлена на рис. 3.

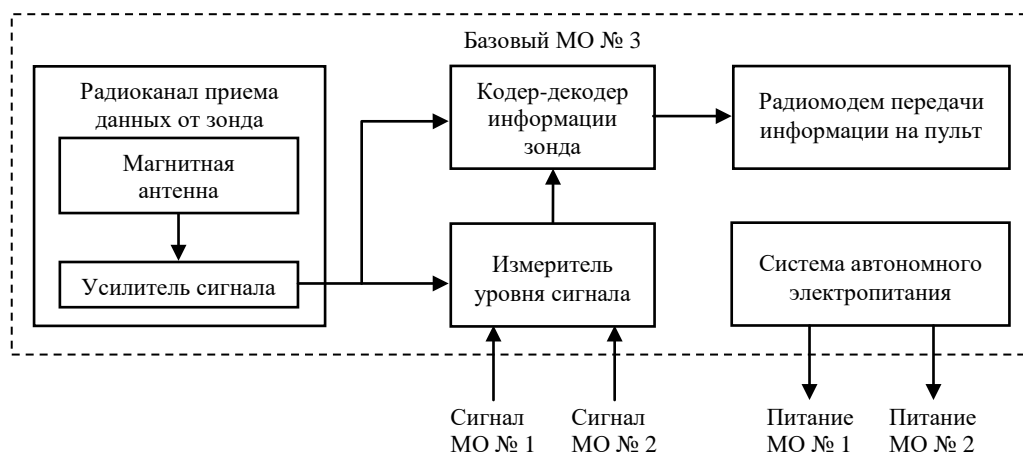


Рис. 3. Структурная схема базового маяка-ответчика № 3

Fig. 3. Block diagram of the basic transponder-beacon No. 3

Радиоканал приема данных от зонда обеспечивает связь с источником данных, расположенным в зонде, и передачу данных в кодер-декодер информации и измеритель уровня. Кодер-декодер и радиомодем обеспечивают определение положения зонда (наклонной дальности) и восстановление данных о параметрах зонда, кодирование всей информации и передачу в систему управления, обработки, отображения и регистрации информации.

В таком комплексе излучаются непрерывные сигналы со ступенчатой частотной модуляцией. Это обеспечивает простую структуру составных частей и, следовательно, меньшую стоимость. Время запаздывания сигнала в таких системах определяется с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (в основном при больших базах). Благодаря объединению большого количества сигналов от зонда достигаются лучшее отношение сигнал/помеха и качественные показатели работы комплекса.

Радиомодем может строиться по разным схемам в зависимости от выбранного диапазона частот радиосвязи и стандарта, но предпочтительным является наиболее перспективная схема с использованием стандарта "Bluetooth", обеспечивающая надежную прямую передачу данных в систему управления (ноутбук) в диапазоне расстояний до 200 м.

Базовый модуль также является приемником данных и источником питания дополнительных МО (№ 1, № 2).

Система автономного электропитания предназначена для обеспечения электропитанием базового и дополнительных МО на срок выполнения миссии бурения (8...14 ч) и должна реализовываться с использованием перезаряжаемых литиевых (полимерно-литиевых) аккумуляторных батарей со стандартным рабочим напряжением 3.6 В.

Дополнительные МО (№ 1, № 2) содержат только радиоканал приема данных от зонда, представленный на рис. 3.

Оптимальное распределение задач между МО и системой управления направлено на максимальное упрощение (схемное и конструктивное) МО и перенос большинства задач в систему управления, имеющую для этого необходимые ресурсы. Это

предиктовано в том числе условиями эксплуатации, которые являются жесткими для МО (функционирование на открытой местности в любую погоду) и менее жесткими для системы управления, которая используется в обитаемом помещении на рабочем месте оператора буровой головки.

В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3, все МО содержат магнитную антенну, которая и определяет массогабаритные характеристики. Электронные узлы МО должны строиться на элементах современной микросхемотехники с малыми размерами печатных плат. Ориентировочный объем МО (базового и дополнительных) не превысит 1 дм³, но может быть искусственно увеличен (утяжелен) для противовеетровой устойчивости и герметичного исполнения корпуса. Следует учесть необходимость использования герметичных разъемов для соединительных кабелей.

Уровень радиосигнала, воспринимаемый МО, линейно связан с расстоянием между зондом и МО, что позволяет при условии точной калибровки комплекса определить по уровню радиосигнала (амплитудный метод) наклонную дальность от зонда до МО [12, 13].

Таким образом, используя амплитудный метод и имея систему МО с известными межцентровыми расстояниями, можно обеспечить надежную радиолокацию источника радиосигналов (зонда).

Выбор диапазона рабочих частот осуществляется поиском компромисса между желаемыми разрешением и требуемой глубиной зондирования. Сигналы на более низких частотах глубже проникают в грунт, но при этом снижается разрешающая способность. Кроме того, следует учитывать, что радиолокационный сигнал по-разному затухает в различных грунтах. Так, плотные влажные глины являются наиболее трудным для проникновения электромагнитных волн материалом, тогда как чистый сухой песок – наиболее легким. Минимальный размер объекта, видимого радиолокатором, увеличивается с уменьшением частоты антенны. На частоте 1 МГц МО может обнаруживать положение зонда на глубине до 30 ... 40 м.

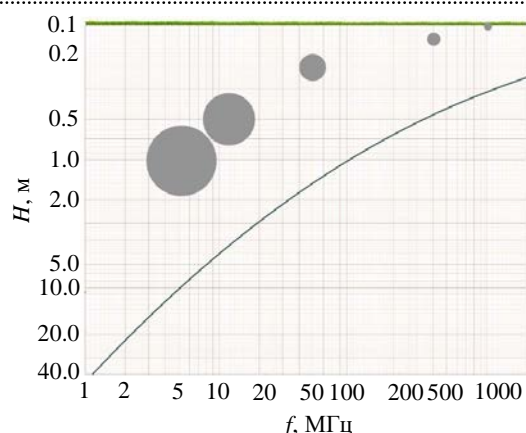


Рис. 4. Зависимость глубины проникновения и размера объекта зондирования от значения рабочей частоты
Fig. 4. Dependence of penetration depth and size of the probing object on the operating frequency value

На рис. 4 представлена (в логарифмическом масштабе) зависимость глубины проникновения от поверхности земли H и размера объекта (серые круги) зондирования от значения рабочей частоты зонда f .

На рис. 5 показано взаимное расположение МО и буровой головки (зонда), позволяющее определить положение и глубину буровой головки, а также положение точки координаты буровой головки относительно МО по известным формулам [13].

Аналитические выражения для напряженностей электрического E_θ и магнитного H_α полей элемента переменного тока dl , характеризующие процесс излучения электромагнитной энергии [14], показывают, что для дальней

зоны, главным образом используемой в радиотехнических системах, их мгновенные значения обратно пропорциональны расстоянию до источника излучения:

$$H_\alpha = \frac{I_m dl \sin \theta}{2R\lambda} \cos\left(\omega t - \frac{\omega R}{c}\right);$$

$$E_\theta = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_m dl \sin \theta}{2R\lambda} \cos\left(\omega t - \frac{\omega R}{c}\right), \quad (1)$$

где I_m – ток излучателя; θ – меридиональный угол; R – расстояние до источника излучения; λ – длина волны; ω – циклическая частота; c – скорость распространения электромагнитных волн; μ_0 – магнитная постоянная; ϵ_0 – электрическая постоянная.

На рис. 5 позицией 1 показано истинное положение буровой головки в толще грунта; позицией 2 – положение точки координаты буровой головки относительно МО; h – глубина буровой головки.

Обозначим амплитуду сигнала от зонда, принятую каждым из маяков-ответчиков № 1, № 2, № 3, через A , B , C соответственно.

Как следует из (1), A , B , C обратно пропорциональны R_1 , R_2 , R_3 . Последующая процедура определения R_1 , R_2 , R_3 сводится к трансляции результатов измерения МО № 2 и МО № 1 на базовый МО № 3 и вычислению отношения амплитуд принятых сигналов для каждой пары МО, образующих базис.

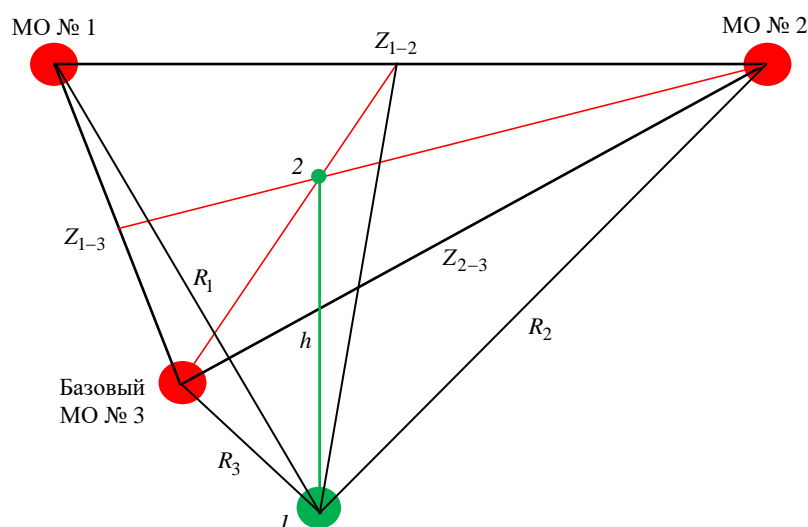


Рис. 5. Схема расположения маяков-ответчиков и буровой головки
Fig. 5. Layout of transponder-beacons and drilling head

Обозначим: $A/B = m$; $A/C = n$; $B/C = k$, тогда $m = R_3/R_1$; $n = R_2/R_1$; $k = R_2/R_3$.

Для представленного на рис. 5 варианта расположения МО и зонда (позиция 1) введем обозначения: S – площадь треугольника, образованного МО № 1, МО № 2 и базовым МО № 3, местоположение которых известно; S_1 – площадь треугольника, образованного МО № 1, буровой головкой, базовым МО № 3; S_2 – площадь треугольника, образованного базовым МО № 3, буровой головкой, МО № 2; S_3 – площадь треугольника, образованного МО № 1, буровой головкой, МО № 2.

Площадь треугольника можно вычислить по трем его сторонам. Алгоритм решения этой задачи предложил Герон (приблизительно I в. до н. э.) [15].

Для треугольника, образующего базу: $S = \sqrt{p(p - Z_{1-3})(p - Z_{1-2})(p - Z_{2-3})}$, где $p = \frac{Z_{1-3} + Z_{1-2} + Z_{2-3}}{2}$.

Аналогично определяются площади S_1 , S_2 , S_3 :

$$S_1 = \sqrt{p_1(p_1 - R_1)(p_1 - R_3)(p_1 - Z_{1-3})};$$

$$p_1 = \frac{R_1 + R_3 + Z_{1-3}}{2}.$$

Так как $R_3 = mR_1$, то получаем следующее:

$$S_1 = \sqrt{p_1(p_1 - R_1)(p_1 - mR_1)(p_1 - Z_{1-3})},$$

$$p_1 = \frac{R_1 + mR_1 + Z_{1-3}}{2};$$

$$S_2 = \sqrt{p_2(p_2 - mR_1)(p_2 - mkR_1)(p_2 - Z_{2-3})},$$

$$p_2 = \frac{mR_1 + mkR_1 + Z_{2-3}}{2};$$

$$S_3 = \sqrt{p_3(p_3 - R_1)(p_3 - mkR_1)(p_3 - Z_{1-2})},$$

$$p_3 = \frac{R_1 + mkR_1 + Z_{1-2}}{2}.$$

Алгоритм вычисления R_1 получаем из геометрии взаимного расположения объекта буровой головки и МО, которая обычно априорно известна: $S_3 = S + S_1 + S_2$. Левая часть этого уравнения известна, в правой части все составляющие представлены через R_1 и аппаратно вычисленные m , n , k , что дает возможность однозначно определить расстояния R_1 , R_2 , R_3 от буровой головки до МО, местоположение которых известно.

Технология обеспечения буровых работ. На этапе подготовительных работ в положении буровой головки на поверхности земли выполняется калибровка МО с целью обеспечения наилучшей точности определения значений наклонной дальности от МО до зонда (буровой головки).

На этом же этапе в программу системы управления вносится топографический план рабочего участка либо в электронном виде, либо в виде изображения с привязкой к системе прямоугольных координат.

После начального забуривания на достаточную глубину с помощью базового МО № 3 определяется точка ориентировочного положения буровой головки (с поверхности земли).

Далее в соответствии с рис. 6 МО перемещается по поверхности рабочего участка с условием ограничений на максимальные значения R_1 , R_2 , R_3 и Z_{1-2} , Z_{1-3} , Z_{2-3} .

На рис. 6 штриховыми линиями показано направление перемещения МО в процессе выполнения бурения. Расстояния Z_{1-2} , Z_{1-3} , Z_{2-3} измеряются с помощью лазерного дальномера и вносятся в программу системы управления. При наличии топографического плана рабочего участка точки размещения МО по известным ориентирам на рабочем участке наносятся прямо на топографический план рабочего участка системы управления. Последний способ даст наиболее точное и наглядное освещение процесса бурения.

При выходе буровой головки за пределы зоны текущего размещения МО следует остановить работы для переноса МО на соседний участок. При этом предпочтителен перенос только одного МО в соответствии с рис. 6 для упрощения ввода данных о положении МО и повышения точности позиционирования буровой головки.

Отличительные особенности метода радиолокации с поверхности земли с неподвижными маяками-ответчиками. При использовании неподвижных МО комплекс радиолокации приобретает совершенно новое качество – возможность автоматического контроля местоположения зонда (буровой головки) в процессе проведения буровых работ в режиме реального времени. Другими словами, траекто-

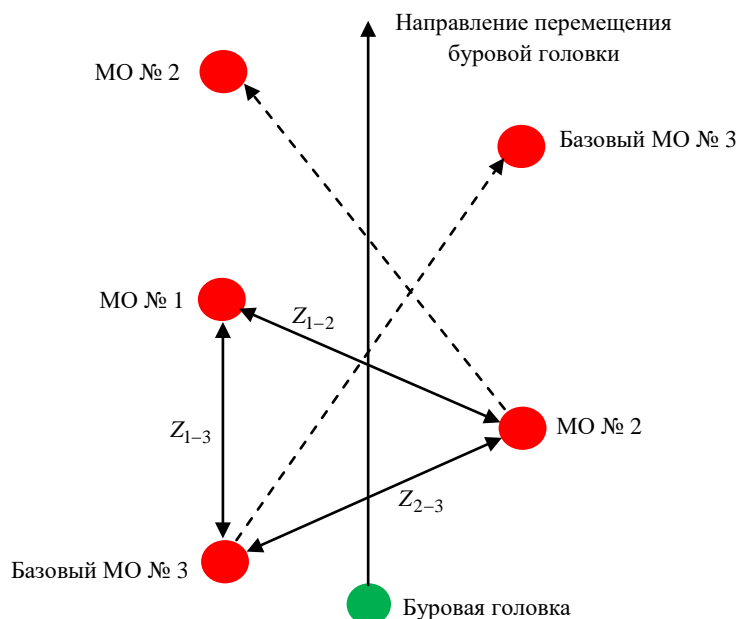


Рис. 6. Перемещение маяков-ответчиков на поверхности рабочего участка

Fig. 6. Placement of transponder beacons on the surface of the work area

рия буровой головки строится не по точкам, получаемым в сеансах локации с помощью мобильного наземного прибора (как, например, у систем зарубежного производства), а осуществляется непрерывное ее отслеживание, что повышает производительность буровых работ.

Вторым важным преимуществом является отсутствие самих сеансов локации, которые требуют времени, навыков и будучи разнесенными во времени являются источником дополнительных ошибок. Сеансы локации заменяются тривиальной процедурой перемещения по мере необходимости одного из трех МО на новое место при выходе буровой головки из зоны оптимальной локации и ввода в компьютер нового положения МО. При этом момент переноса достоверно известен оператору (вплоть до автоматической сигнализации о нем). Перемещение МО не требует высокой квалификации и временных затрат.

Третьим преимуществом является возможность контроля положения буровой головки под наземными препятствиями (ограниченных размеров), что принципиально невозможно для мобильных систем. Это обеспечивается принципом действия радиолокации с использованием МО, требующим для наилучшей точности локации разнесения мест положения МО от точки вертикали к буровой головке на 5...10 м.

Заключение. Таким образом, получение координат буровой головки с высокой точно-

стью в процессе проведения процедуры наклонно-направленного бурения с одновременным снижением временных и финансовых затрат, повышением качества проведения работы (постоянный мониторинг положения буровой головки) обеспечивается при использовании радиолокационного комплекса. Радиолокационный метод, предложенный в статье, не имеет аналогов в России и других странах.

В настоящее время имеется опыт применения акустической системы мониторинга положения буровой головки, внедренной в действующий образец устройства горизонтально-направленного бурения, подтверждающий указанные преимущества.

Вместе с тем, несмотря на обоснованность физической возможности реализации радиолокационного метода, требуется целый ряд экспериментальных проверок на макетных образцах для решения следующих задач:

- определения достижимых точностных показателей позиционирования;
- определения эксплуатационных параметров.

В частности, может оказаться неприемлемой кабельная связка базового и дополнительных МО, и ее также придется реализовывать по радиоканалу передачи данных. Это повлечет за собой, с одной стороны, унификацию МО, но при этом усложнит схемотехнические решения и порядок эксплуатации.

Таким образом, устройство наклонно-направленного бурения имеет дальнейшую перспективу модернизации, а радиолокацион-

ный комплекс мониторинга положения – развития и внедрения.

Список литературы

1. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Анализ тенденций развития современных технологий сооружения скважин в породном массиве // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2014. Т. 1, № 2. С. 104–113.
2. Костылев А. Д., Маслаков П. А., Смоляницкий Б. Н. Проблемы создания управляемого пневмопробойника для проходки скважин по заданной траектории // *Изв. вузов. Строительство*. 1999. № 11. С. 86–90.
3. Осложнения при сооружении переходов трубопроводов методом горизонтально направленного бурения / Е. С. Торопов, В. С. Торопов, Ю. Д. Земенков, И. В. Сероштанов // *Территория "НЕФТЕГАЗ"*. 2015. № 5. С. 32–37.
4. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan: McGraw Hill, 2005. 489 p.
5. Балаховский М. С. На Российском рынке – американская фирма "Vermeer" // *Механизация строительства*. 2000. № 10. С. 2–7.
6. Агарков А. М., Межуев Д. С., Тихонов А. А. Технология прокладки коммуникаций методом горизонтально-направленного бурения // *Инновационная наука*. 2017. № 5. С. 43–44.
7. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // *Turkish J. of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2017. Vol. 25, iss. 4. P. 3421–3434. doi: 10.3906/elk-1606-200
8. Cai L., Polak M. A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling

installations // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 83. P. 313–323. doi: 10.1016/j.tust.2018.09.014

9. Биктимирова К. А. Инженерно-геологическое обеспечение горизонтально-направленного бурения при строительстве различных подземных коммуникаций в условиях мегаполисов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 12. С. 342–348.

10. Вагин А. В. Акустический способ передачи информации в устройстве горизонтального направленного бурения // *Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2023. Т. 16, № 7. С. 15–25.

11. Основные технологии бурения / А. А. Макаров, А. С. Давышин, А. А. Федяев, А. М. Шечков, Г. Г. Петросян, К. А. Гулиян // *Проблемы науки*. 2018. № 2. С. 19–24.

12. Meier Hoyela C., Terzuoli A. J., Wasky R. P. Determining possible receiver locations for passive radar // *IEEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation*. 2005. № 3. P. 206–214. doi: 10.1049/ip-rsn:20045023

13. Хехнев Р. Г., Хехнева В. Ф. Амплитудный способ радиодальнометрии // *Докл. БГУИР*. 2013. № 1 (71). С. 73–77.

14. Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. О пространственной корреляции радиосигналов, отраженных от морской поверхности // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1977. Т. 20, № 8. С. 59–64.

15. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа. М.: Высш. шк., 1981. Т. 2. 351 с.

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 35 научных работ. Сфера научных интересов – распространение упругих волн в стратифицированных средах; ультразвуковые измерения; специальное приборостроение.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: avvagin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Воротынцева Алена Сергеевна – магистрант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов – гидроакустика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

References

1. Danilov B. B., Smolyanitsky B. N. Analysis of Modern Trends in the Subsoil Hole-Making Technologies. Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences. 2014, vol. 1, no. 2, pp. 104–113. (In Russ.)

2. Kostylev A. D., Maslakov P. A., Smolyanitsky B. N. Problems of Creating a Controlled Pneumatic Punch for Drilling Wells Along a Given Trajectory.

News of Higher Educational Institutions. Construction. 1999, no. 11, pp. 86–90. (In Russ.)

3. Toropov E. S., Toropov V. S., Zemenkov Yu. D., Seroshtanov I. V. Complications in Construction of Pipe Crossings Applying Horizontal Directional Drilling. Territory "OIL-GAS". 2015, no. 5, pp. 32–37. (In Russ.)

4. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan, McGraw Hill, 2005, 489 p.

5. Balakhovsky M. S. On the Russian Market - the American company "Vermeer". Mechanization of Construction. 2000, no. 10, pp. 2–7. (In Russ.)

6. Agarkov A. M., Mezhuiev D. S., Tikhonov A. A. Technology of Laying Communications Using Horizontal Directional Drilling. Innovative Science. 2017, no. 5, pp. 43. (In Russ.)

7. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal Directional Drilling Pilot Bore Simulation. Turkish J. of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2017, vol. 25, iss. 4, pp. 3421–3434. doi: 10.3906/elk-1606-200

8. Cai L., Polak M.A. A Theoretical Solution to Predict Pulling Forces in Horizontal Directional Drilling Installations. Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 83, pp. 313–323. doi: 10.1016/j.tust.2018.09.014

9. Biktimirova K. A. Engineering-Geological Provision of the Horizontal Directional Drilling with the Con-

struction of the Different Underground Communications under the Condition of the Megapolice. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no. 12, pp. 342–348. (In Russ.)

10. Vagin A. V. Acoustic Method of Transmitting Information in a Horizontal Directional Drilling Device. *Izv. SPbSETU "LETI"*. 2023, vol. 16, no. 7, pp. 15–25. (In Russ.)

11. Makarov A. A., Davyshin A. S., Fedyaev A. A., Shechikov A. M., Petrosyan G. G., Guliyev K. A. Basic Drilling Technologies. Problems of Science. 2018, no. 2, pp. 19–24. (In Russ.)

12. Meier Hoyela C., Terzuoli A. J., Wasky R. P. Determining Possible Receiver Locations for Passive Radar. IEEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 2005, no. 3, pp. 206–214. doi: 10.1049/ip-rsn:20045023

13. Khekhnyov R. G., Khekhnyova V. F. The Amplitude Way of the Radiometrics for the Long Distance. Reports of BSUIR. 2013, no. 1 (71), pp. 73–77. (In Russ.)

14. Garnakeryan A. A., Sosunov A. S. On the Spatial Correlation of Radio Signals Reflected from the Sea Surface. *Izv. Universities Radioelectronics*. 1977, no. 8, vol. 20, pp. 59–64. (In Russ.)

15. Kudryavtsev L. D. Course of Mathematical Analysis. Moscow, Higher school, 1981, vol. 2, 351 p. (In Russ.)

Information about the authors

Anton V. Vagin, Master in Instrument Engineering (2020), Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: propagation of elastic waves in stratified media, ultrasonic measurements, special instrumentation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: avvagin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1875-544X>

Alena S. Vorotyntseva, Master's student of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: hydroacoustics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: avorotynceva@yandex.ru