

Акустический способ передачи информации в устройстве горизонтального направленного бурения

А. В. Вагин

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

av.vagin@bk.ru

Аннотация. Разработан акустический способ передачи информации о координатах буровой головки при работе устройства горизонтального направленного бурения в ходе проектной прокладки подземных коммуникаций. В статье рассмотрены традиционная технология горизонтального направленного бурения и электромагнитный способ передачи информации при бестраншейной прокладке коммуникаций. Исследован акустический канал передачи информации в части асинхронной передачи данных. Разработаны временная структура сигнала, а также структура байта, выдаваемого в акустический канал передачи информации. Выбрана оптимальная рабочая частота приемоизлучающей системы и проведена оценка пропускной способности акустического канала передачи информации. Определены требования к модулятору-демодулятору сигналов акустической системы передачи информации, проведено моделирование распространения информационного пакета с учетом резонансных свойств преобразователя с помощью пакета схемотехнического моделирования Multisim. Для моделирования разработана эквивалентная схема, формирующая информационный пакет в виде шахматного кода.

Ключевые слова: горизонтальное направленное бурение, передача информации, локационная система, акустический метод

Для цитирования: Вагин А. В. Акустический способ передачи информации в устройстве горизонтального направленного бурения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 15–25. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-15-25.

Original article

Acoustic Method of Information Transmission in a Horizontal Directional Drilling Device

A. V. Vagin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

av.vagin@bk.ru

Abstract. An acoustic method has been developed for transmitting information about the coordinates of the drill head during the operation of a horizontal directional drilling device during the project laying of communications. The paper considers the traditional technology of horizontal directional drilling, and the electromagnetic method of transmitting information in trenchless laying of communications. An acoustic channel for information transmission has been studied in terms of asynchronous data transmission. The temporal structure of the signal, as well as the structure of the byte issued in acoustic transmission of information, have been developed. The optimal operating frequency of the transceiver system was chosen and the capacity of the acoustic information transmission channel was evaluated. The requirements for the modulator-demodulator of signals of an acoustic information transmission system are determined, the simulation of the propagation of an information package is carried out, taking into account the resonant properties of the converter using the Multisim circuit simulation package. For modeling, an equivalent circuit has been developed that forms an information package in the form of a chess code.

Keywords: horizontal directional drilling, information transmission, location system, acoustic method

For citation: Vagin A. V. Acoustic Method of Information Transmission in a Horizontal Directional Drilling Device // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 15–25. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-15-25.

Введение. Интенсивное строительство в центральных, плотно застроенных частях городов, реконструкция и оснащение старых зданий современным санитарно-техническим оборудованием диктуют необходимость замены старых канализационных сетей на новые с увеличенной пропускной способностью. Помимо этого, возникает необходимость прокладки трубопроводов и коммуникационных сетей в условиях плотной городской застройки, преодоления водных и других природных преград, геологической разведки, добычи полезных ископаемых и т. д.

Традиционные траншейные способы ремонта и замены не только дорогостоящи, но и связаны с необходимостью выполнения большого объема земляных работ, что в условиях плотной застройки нередко оказывается невозможным. В таких случаях на помощь приходит технология бестраншейной замены трубопроводов с применением установок горизонтального направленного бурения (ГНБ). Такой метод позволяет быстро, эффективно, с минимальными затратами выполнить подземные изыскания и переходы.

Метод горизонтального направленного бурения вот уже более 40 лет активно применяется в строительном мире и стал неотъемлемой частью нефтегазовой промышленности. Бестраншейные технологии прокладки трубопроводов в настоящее время активно развиваются, поражая масштабами работ [1].

Анализ тенденций развития технологий бестраншейного ремонта показал, что к настоящему времени в мире накоплен большой опыт прокладки трубопроводов и коммуникаций как управляемыми, так и неуправляемыми установками [2]–[9].

Актуальность и перспективность способа бестраншейной прокладки трубопроводов определяет значительный научный интерес к данному направлению. Так, например, в Институте горного дела Сибирского отделения РАН разработана классификация способов сооружения скважин, учитывающая специфику прокладки подземных каналов в грунте и способствующая синтезу новых технологий и технических средств [10].

Одним из важных аспектов проведения процедуры горизонтального направленного бурения

является определение траектории пилотной скважины и текущих координат буровой головки с помощью специальной системы позиционирования буровой головки (локационной системы), располагающейся на поверхности [11].

На российском рынке наиболее распространена локационная система для горизонтального направленного бурения DigiTrak Eclipse, выпускаемая компанией «Digital Control Incorporated» (США) [12]. Комплект локационного оборудования показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид комплекта локационного оборудования DigiTrak Eclipse
Fig. 1. General view of the set of location equipment DigiTrak Eclipse

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 [13]:

1. На месте калибровки в радиусе до 3 м должны отсутствовать металлические конструкции стальной трубопровод, цепные ограждения, рельсы, строительное оборудование или автомобили и т. п.

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 оказывает влияние на определение текущих координат буровой головки – приводит к большим помехам для сигнала и, соответственно, к искажению планируемой траектории пилотного бурения.

Указанные недостатки авторы предлагают устранить использованием принципиально новой технологии определения и передачи координат буровой головки и траектории бурения. В публикации предлагается акустический способ передачи информации по буровой колонне на пульт оператора.

Технология горизонтального направленного бурения. Перед началом проведения горизонтального направленного бурения необходимо выполнить ряд детальных предызмерительных процедур для беспрепятственного проведения строительных работ и составить технологию процесса бурения.

Сущность метода ГНБ заключается в бурении пилотной скважины по трассе прокладываемого трубопровода с последующим ее расширением до необходимого диаметра, после чего трубопровод протаскивается к начальной точке бурения [10].

Для каждой процедуры горизонтального направленного бурения составляется собственная типовая технологическая карта (ТТК) [14], [15].

Типовая технология горизонтального направленного бурения состоит из четырех основных этапов:

- 1) подготовительный этап;
- 2) бурение пилотной скважины;
- 3) расширение скважины, затягивание трубопровода или футляра для кабеля в скважину;
- 4) завершающий этап.

На подготовительном этапе выполняют ряд работ, обеспечивающих надежное и качественное проведение дальнейшего процесса бурения, а именно [16]:

– оборудование площадки для буровой машины универсального размера 10×15 м;

– установка бурильного оборудования и пилотной штанги непосредственно в месте входа в почву бура;

– фиксация инструмента с помощью анкеров на ровной площадке во избежание смещения или подвижности при ГНБ;

– регулировка инструмента по углу наклона с помощью расширителя, выравнивание головки бура для ровного входа в почву;

– отладка радиосвязи между членами бригады;

– в котлованах оборудуется дополнительное отведение для бентонитовой жидкости и грунтовых вод, если их будет слишком много.

После проведения подготовительных работ, приступают к непосредственной процедуре ГНБ (рис. 2) [16]:

– прокладывается пилотная скважина с сечением 10 см;

– отладка оборудования, регулировка наклона головки бура на 10...20° относительно линии горизонта;

– прохождение бура с проверкой траектории через каждые 3 м и корректированием направленности инструмента;

– расширение скважины: первоначальный инструмент вынимается из прокола, заменяется на расширитель;

– полное проведение расширителя сквозь образовавшийся канал с постоянным корректированием движения.

Важнейшим фактором эффективного применения технологии горизонтального направленного бурения служит использование высококачественных буровых растворов, предназначенных:

– для формирования и стабилизации скважины, предотвращения обрушения грунта;



Рис. 2. Технология проведения горизонтального направленного бурения
Fig. 2. Horizontal directional drilling technology

- очищения скважины от выбуренной породы и транспорта (выноса) ее на поверхность;
- охлаждения, смазывания бурового инструмента;
- уменьшения трения бурового инструмента о грунт;
- предотвращения налипания грунта на буровой инструмент и прокладываемый трубопровод.

Буровой раствор представляет собой смесь четырех основных ингредиентов – воды, бентонита, полимеров и добавки для улучшения химического состава воды, соотношение и концентрация которых определяется в соответствии с типом грунта, условиями бурения и рекомендациями их производителя [17].

Буровой раствор, подаваемый под давлением к соплам буровой головки, выбивает куски грунта на пути бурения, дробит их на мелкие частицы, поднимает их во взвешенное состояние и выводит из скважины в рабочий котлован (при пилотном бурении) или в приемный котлован (при расширении и протаскивании трубопровода).

Необходимый для производства работ объем бурового раствора $V_{б.р}$, м³, рассчитывается по формуле [17], [18]

$$V_{б.р} = \frac{\pi d_p^2}{4} (L + \delta) K_p,$$

где d_p – наибольший диаметр расширения скважины (бурового канала), м; L – расчетная длина скважины по профилю перехода, м; δ – возможное увеличение фактической длины бурового канала, м; K_p – коэффициент расхода бурового раствора, выражающий отношение объема прокачиваемого бурового раствора к выбуренной породе.

Для обеспечения полной очистки скважины от выбуренной породы коэффициент расхода бурового раствора K_p определяется по таблице.

Коэффициент расхода раствора
Solution flow rate

Грунтовые условия	Коэффициент расхода бурового раствора K_p
Песок, гравий, скальная порода	2–3
Супесь, суглинок	3–4
Глина	3–4
Активная глина	6

Количество компонента бурового раствора m_k , кг (л), необходимого для производства работ, определяется по формуле

$$m_k = V_{б.р} C_k,$$

где C_k – концентрация компонента бурового раствора, кг/м³ (л/м³).

В процессе проведения направленного бурения необходимо проводить ряд контрольно-измерительных работ по определению координат буровой головки – глубины залегания в грунте, угла поворота, угла наклона буровой головки, а также температуры зонда.

Заглубление буровой головки обеспечивается ее конструктивным исполнением – цилиндрической формой с наклонным срезом передней части (бурильной лопатки).

Акустическая система передачи информации. На данный момент переполненность подземного пространства различными коммуникациями достигла огромных объемов и уже сложно себе представить метод ГНБ без локационных систем, однако вплоть до 80-х гг. прошлого столетия установки горизонтального бурения не были снабжены навигацией, что неприемлемо для проектного бурения.

Для беспрепятственного проведения строительных работ с использованием бестраншейных технологий (горизонтального направленного бурения) необходимо располагать данными о геологическом разрезе, гидрогеологических условиях (водоносных горизонтах и гидродинамических параметрах слагающих их пород с учетом сезонных колебаний), а также о физико-механических свойствах пород по трассе сооружаемых подземных коммуникаций.

Наряду с электромагнитным способом получения информации о координатах буровой головки предлагается акустический способ, обладающий не худшими, а в некоторых случаях даже лучшими характеристиками в части позиционирования буровой головки и стабильности функционирования в сложной помехосигнальной обстановке [19], [20].

Помехи – это одна из самых больших проблем при выполнении проектов ГНБ. Они могут привести к снижению точности измерения глубины. Способность локационной системы сохранять работоспособность под воздействием активных помех – критический фактор обеспечения производительности буровых работ и их завершения в проектные сроки.

В дальнейшем вместо общепринятого термина «локационная система» будет употребляться термин «акустическая система» для обращения внимания читателя на принципиально новый

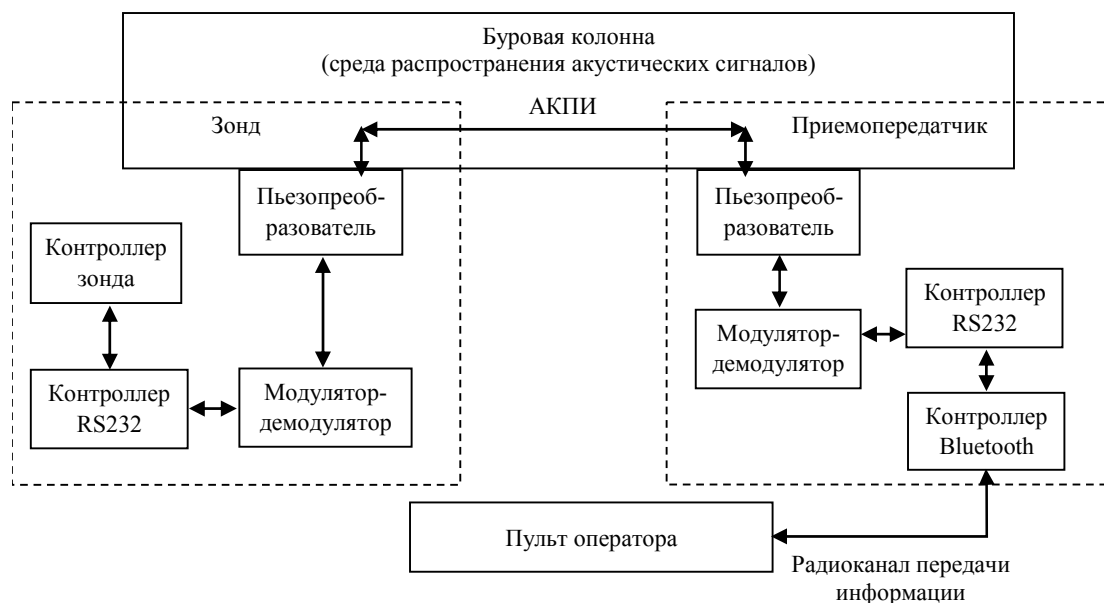


Рис. 3. Структурная схема акустической системы передачи информации
 Fig. 3. Structural diagram of an acoustic information transmission system

принцип получения информации о координатах буровой головки.

Система передачи информации по буровой колонне состоит из двух устройств – зонда и приемопередатчика, физически присоединенных к буровой колонне (связке буровых штанг), обеспечивающих дуплексную передачу информации методом возбуждения акустических импульсов в теле буровой колонны и образующих акустический канал передачи информации (АКПИ), как показано на рис. 3.

Канал передачи информации, представленный на рисунке, состоит из двух абонентов, один из которых организован в зонде, второй – это дополнительное устройство, присоединенное к началу буровой колонны или к ее механическому приводу и обеспечивающее бесконтактную передачу информации на пульт по радиоканалу Bluetooth.

Радиоканал передачи информации Bluetooth, имеющий широкую программно-аппаратную поддержку на уровне промышленного стандарта, высокую помехоустойчивость в условиях промышленных помех, перспективен в мировой практике и вполне удовлетворяет жестким требованиям эксплуатации систем ГНБ.

Акустические методы передачи информации востребованы и реализованы в виде серийно освоенных систем в морской гидроакустике для связи с подводными объектами в диапазоне расстояний 2...100 км и в звуковом диапазоне частот 3...11 кГц [21].

Скорость звука в буровой колонне (материал – сталь) превышает скорость звука в воде в 3–4 раза, а физическая длина канала связи между абонентами исчисляется метрами, что ставит совершенно новые требования к акустическому каналу и требует иных подходов к его реализации.

По опыту морской гидроакустики основной проблемой решения задачи обеспечения достоверности передаваемой информации является многолучевой характер распространения акустических волн в водной среде, обусловленный специфическими гидрологическими условиями и переотражениями от корабельных конструкций, вызывающий наложение пакетов информационных сообщений и существенно усложняющий их распознавание.

Распространение акустических волн в конструкциях буровой колонны и ее механическом приводе как в замкнутой акустической системе неизбежно приведет к многократным переотражениям акустических импульсов и к проблемам, изложенным ранее.

Основным методом борьбы с переотраженными акустическими импульсами – это временное стробирование, т. е. временная селекция прямой акустической волны от отраженной.

В условиях распространения упомянутых ранее акустических импульсов в металле требуется существенное повышение рабочей частоты канала передачи информации для укорочения длительности информационных пакетов.

Для определения рабочей частоты акустического канала необходимо определиться с методом кодирования информации.

Асинхронная передача информации в акустической системе. При асинхронной передаче данных каждому байту предшествует старт-бит, сигнализирующий приемнику о начале очередной посылки, за которым следуют биты данных и, возможно, бит паритета (контроля четности). Завершает посылку стоп-бит, гарантирующий определенную выдержку между соседними посылками (рис. 4). Старт-бит следующего посланного байта может посылатся в любой момент после окончания стоп-бита, т. е. в передаче возможны паузы произвольной длительности. Старт-бит, имеющий всегда строго определенное значение (логический 0), обеспечивает простой механизм синхронизации приемника по сигналу от передатчика [22].

Подразумевается, что приемник и передатчик работают на одной скорости обмена, измеряемой количеством передаваемых бит в секунду. Внутренний генератор синхронизации приемника использует счетчик-делитель опорной частоты, обнуляемый в момент приема начала старт-бита. В идеале эти стробы располагаются в середине битовых интервалов, что обеспечивает возможность приема данных и при некотором рассогласовании скоростей приемника и передатчика. Нетрудно заметить, что при передаче 8 бит данных, одного контрольного и одного стоп-бита предельно допустимое рассогласование скоростей, при котором данные будут распознаны верно, не превысит 5 %.

С учетом фазовых искажений (затянутых фронтов сигнала) и дискретности работы внутреннего счетчика синхронизации реально допустимо меньшее отклонение частот. Чем меньше коэффициент деления опорной частоты внутреннего генератора (т. е. чем выше частота передачи), тем больше погрешность привязки стробов к середине битового интервала и, следовательно, требования к согласованности частот более строги. Также, чем выше частота передачи, тем больше влияние искажений фронтов на фазу принимаемого сигнала. Такое действие этих двух фронтов приводит к повышению требований согласованности частот приемника и передатчика с ростом частоты обмена.

Формат асинхронной посылки позволяет выявлять возможные ошибки передачи. Если принят перепад, сигнализирующий о начале посылки, а

по стробу старт-бита зафиксирован уровень логической единицы, старт-бит считается ложным и приемник снова переходит в состояние ожидания. Об этой ошибке формата приемник может и не сообщать. Если во время, отведенное под стоп-бит(ы), обнаружен уровень логической единицы, фиксируется ошибка стоп-бита (тоже ошибка формата). Если применяется контроль четности (паритета), то после посылки битов данных (перед стоп-битом) передается контрольный бит. Этот бит дополняет количество единичных битов данных до четного или нечетного в зависимости от принятого соглашения. Прием байта с неверным значением контрольного бита при включенном контроле паритета приводит к фиксации ошибки принятых данных.

Контроль формата позволяет обнаруживать обрыв линии, при этом обычно принимается логический нуль, который сначала трактуется как старт-бит и нулевые биты данных, но потом срабатывает контроль стоп-бита. Для асинхронного режима принят ряд стандартных скоростей обмена: 50, 75, 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19 200, 38 400, 57 600 и 115 200 бит/с. Иногда вместо единицы измерения «бит/с» используют «бод» (baud), но в данном случае, при рассмотрении двоичных передаваемых сигналов, это некорректно. В бодах принято измерять частоту изменения состояния линии, а при не двоичном способе кодирования (широко применяемом в современных модемах) в одном и том же канале связи скорости передачи битов (бит/с) и изменения сигнала (бод) могут отличаться в несколько раз. Количество битов данных может составлять 5, 6, 7 или 8 (5- и 6-битные форматы мало распространены). Количество стоп-битов может быть 1, 1.5 и 2 («полтора бита» подразумевает, естественно, только длительность стопового интервала) [23].

Таким образом, максимальная длительность пакета составляет 11 бит.

Для обеспечения автоматического обнаружения, в состав формируемого сигнала вводится специальный сигнал эталонной частоты – пилот-сигнал $F_{п.-с}$.

Параметром кода, несущим информацию, является частота заполнения излучаемых импульсов. Каждому передаваемому символу соответствует своя частота заполнения. Последовательность информационных символов представляет собой комбинацию, отличающуюся значением частот заполнения элементарных кодовых импульсов, следующих непрерывно, друг за другом. Временная структура сигнала приведена на рис. 4.

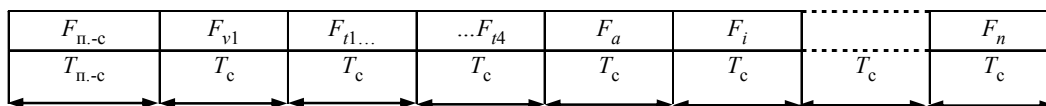


Рис. 4. Временная структура сигнала
Fig. 4. The signal's time structure

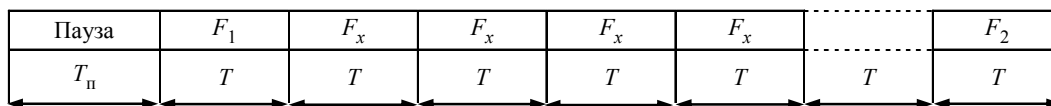


Рис. 5. Структура байта, выдаваемого в АКПИ
Fig. 5. The structure of the byte issued in ACPI

На рис. 4 $F_{п.-с}$ – пилот-сигнал стандартной частоты и длительности, $T_{п.-с}$ – длительность пилот-сигнала, F_{v1} – частота, определяющая длительность информационного символа; T_c – длительность одного информационного символа (скорость передачи информации), $F_{t1}–F_{t4}$ – четыре частоты, соответствующие времени начала излучения первого из символов F_t , F_a – частота адресного кода, $F_i–F_n$ – последовательность частот информационных символов.

Частота пилот-сигнала и информационные частоты выделяются программным способом аппаратурой частотно-временной обработки.

Декодирование информации заключается в сопоставлении номера (частоты) информационного сигнала с соответствующим значением символа.

Декодированная информация выдается на экран комплексного пульта оператора.

Выбор оптимальной рабочей частоты и оценка пропускной способности акустического канала передачи информации. Реальные акустические свойства устройства ГНБ можно оценить непосредственно при проведении процедуры ГНБ, причем эти свойства могут изменяться в зависимости от конкретных рабочих условий. Тем не менее, задав расстояние от местоположения приемопередатчика (рис. 3) до ближайшего акустического перехода – потенциального акустического отражателя (механического привода) – 1 м, на основании вышеизложенного и учитывая необходимость наличия не менее 10 периодов несущей частоты для каждого символа, получаем предельное значение рабочей частоты ≈ 1 МГц.

Для кодирования информации, выдаваемой в бинарном виде, необходимо иметь 2 частоты заполнения передаваемых импульсов F_1 и F_2 , соответствующих логическому «0» и «1».

Структура байта, выдаваемого в АКПИ, будет иметь вид, представленный на рис. 5, где F_1 –

частота, соответствующая логическому «0» на стартовом бите; F_x – частоты, соответствующие логическим «0» или «1» в соответствии с передаваемой информацией (F_1 или F_2); F_2 – частота, соответствующая логическому «1» на стоповом бите; $T_{п}$ – длительность паузы; T – длительность передачи одного бита.

Несущие частоты F_1 и F_2 близки к частоте 1 МГц. Длительность передачи одного информационного пакета составит $11T$, где T соответствует 10 периодам несущей частоты, т. е. $11T = 110$ мкс.

Длительность паузы $T_{п}$ должна обеспечивать достаточное затухание сигнала для исключения сбоев при декодировании следующего пакета и оценивается в $4T$.

Для обеспечения высокой достоверности передаваемой информации абонент на приеме должен формировать ответ «квитанцию» на каждый принятый пакет.

В результате предварительная оценка минимальной пропускной способности АКПИ – 9600 бит/с.

Результаты и обсуждение. Для создания АКПИ требуется проработка построения его составных частей. В соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 3, в состав АКПИ входят электронные и акустические компоненты, а также среда распространения акустических импульсов – буровая колонна.

Электронные компоненты – модуляторы-демодуляторы сигналов – могут быть построены по традиционным схемам приемо-усилительной аппаратуры.

Пьезокерамические излучатели и приемники в диапазоне частот, близком к 1 МГц, существуют в заделе отечественной гидроакустики в области систем измерения скорости звука в воде. Это компактные пьезоэлементы, которые могут быть размещены в составе как зонда, так и приемопередатчика, размещаемого на буровой колонне.

Для определения требований к модулятору-демодулятору сигналов АКПИ проведем моделирование распространения информационного пакета с учетом резонансных свойств преобразователя с помощью пакета схемотехнического моделирования Multisim. Для моделирования разработана эквивалентная схема, формирующая информационный пакет в виде шахматного кода. Несущие частоты для логической «1» – 1 МГц, для логического «0» – 1.1 МГц. Также схема со-

держит модели приемного пьезопреобразователя и узкополосных фильтров демодулятора.

На рис. 6 показаны результаты моделирования: *a* – графические зависимости напряжения U от частоты f для исходного информационного пакета в виде шахматного кода; *b* – подаваемый на излучающий пьезоэлемент частотно-манипулированный сигнал, состоящий из чередующихся фрагментов с частотами заполнения 1 и 1.1 МГц; *в* – сигнал на выходе резонансного приемного

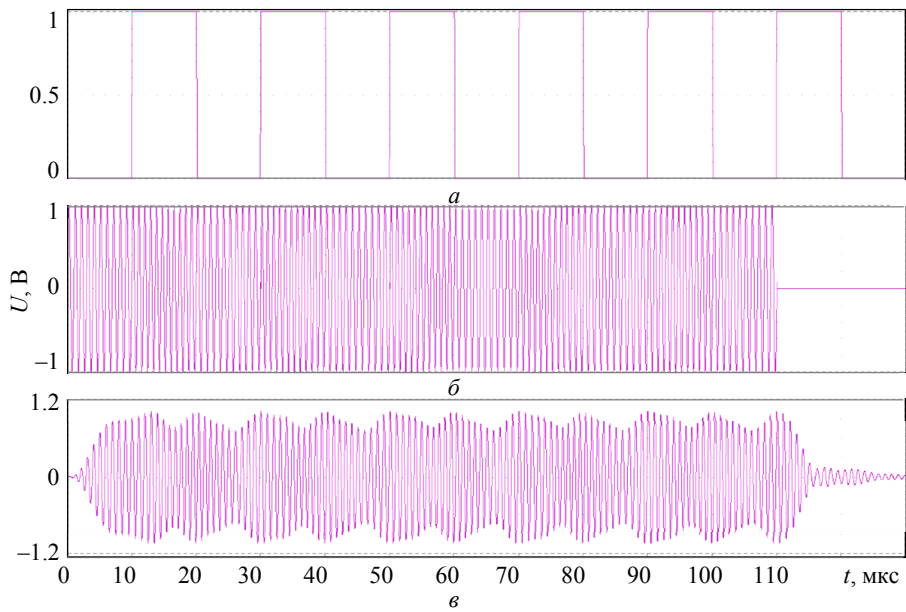


Рис. 6. Графические зависимости амплитуды от частоты для сигналов: *a* – исходного, *b* – частотно-манипулированного, *в* – на выходе резонансного приемного пьезоэлемента
Fig. 6. Graphical dependences of the amplitude on frequency for signals: *a* – original, *b* – frequency-shift keyed, *в* – at the output of the resonant receiving piezoelectric element

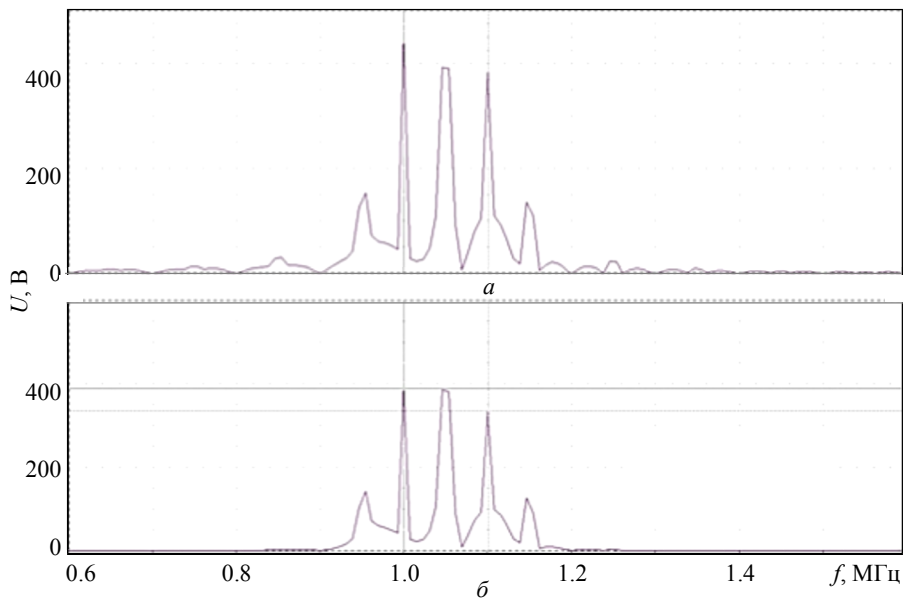


Рис. 7. Спектры сигналов: *a* – исходного, *b* – принятого
Fig. 7. Spectra of the original (*a*) and received signal (*b*)

пьезоэлемента, который после усиления поступает на вход демодулятора, при этом видимое запаздывание и затягивание фронтов сигнала не превышает $1/3$ длительности передачи одного бита, что позволит его выделить в демодуляторе.

На рис. 7 представлены спектры исходного (а) и принятого (б) сигналов. Курсоры установлены на основные несущие частоты 1 и 1.1 МГц. На спектре видно, что между основными частотными составляющими присутствует комбинационная частота 1.05 МГц, которая служит помехой, и в демодуляторе должны приниматься меры для ее подавления.

Анализ полученных результатов моделирования, а также опыт создания акустических систем передачи информации и вышеприведенное описание подтверждают возможность физической реализации АКПИ; тем не менее, предстоит ряд этапов по отработке компонентов АКПИ всей задачи в целом.

Заключение. Таким образом, в статье представлен и исследован акустический способ передачи информации о координатах буровой головки в устройстве горизонтального направленного бурения при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций.

Предложенная акустическая система передачи информации обеспечивает стабильную работу в сложных помехосигнальных условиях – при наличии ближе 3 м металлических конструкций, стальных трубопроводов, строительного оборудования, автомобилей и т. д., а также вблизи сильнодействующих источников электромагнитного излучения.

Разработана временная структура сигнала, а также структура байта, выдаваемого в акустический канал передачи информации. Выбрана оптимальная рабочая частота приемоизлучающей системы и проведена оценка пропускной способности акустического канала передачи информации. Определены требования к модулятору-демодулятору сигналов акустической системы передачи информации, смоделировано распространение информационного пакета с учетом резонансных свойств преобразователя при помощи пакета схемотехнического моделирования Multisim.

Также стоит отметить, что если часть акустического канала передачи информации, размещаемая в зонде, монтируется изготовителем с обеспечением необходимых требований для передачи акустических импульсов по буровой колонне, то наземный приемопередатчик необходимо крепить к буровой колонне (штанге) вблизи буровой установки непосредственно во время проведения буровых работ – т. е. при подсоединении следующего звена колонны приемопередатчик необходимо переустанавливать. Для прохождения акустических импульсов к приемопередатчику (пьезопреобразователю) требуется обеспечить акустический контакт между телом штанги и пьезопреобразователем, для чего поверхность колонны должна иметь минимальную шероховатость и быть смазана глицерином, чтобы исключить попадание микроскопических пузырьков воздуха в зазор между штангой и поверхностью пьезопреобразователя.

Список литературы

1. Меньлюк А. И., Петровский А. Ф., Борисов А. А. Новые области применения технологии горизонтально-направленного бурения // Молодой ученый. 2015. № 8-1(23). С. 28–32.
2. Данилов Б. Б. Пути совершенствования технологий и технических средств для бестраншейной прокладки коммуникаций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 2. С. 69–75.
3. 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.
4. Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads / M. A. Kamel, M. Eishafei, A. W. A. Saif, A. A. Al-Majed // Proc. of 15th Intern. Multi Conf. on Systems, Signals and Devices. Tunisia Hammamet, 2018. P. 1172–1177.
5. Analysis and design of pipes installed via direct PIPE technology / M. Rabiei, K. Ping, S. Chang, M. Gelinas // Proc. of Conf.: NASTT No-Dig Show. Palm Springs, CA, 2018. 11 s.
6. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // Turkish J. of Electrical Engin. and Comp. Sci. 2017. Vol. 25, № 4. P. 3421–3434.
7. Willoughby D. Horizontal Directional Drilling (HDD): Utility and Pipeline Applications (Civil Engineering). 1st ed. New York: McGraw Hill Professional, 2005. 400 s.
8. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan: McGraw Hill, 2005. 489 s.

9. Балаховский М. С. На Российском рынке – американская фирма «Vermeer» // Механизация строительства. 2000. № 10. С. 2–7.
10. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). М.: ПрессБюро № 1, 2005. 304 с.
11. Казанцев А. А., Саруев Л. А. Повышение эффективности вращательно-ударного бурения скважин малых диаметров. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. 113 с.
12. Локация ГНБ. Система DigiTrak Falcon F5. URL: <https://gtmachine.ru/catalog/Lokatsionnye-sistemy/lokat-siya-gnb-digitrak-falcon-f5/> (дата обращения 15.04.2023).
13. Биктимирова К. А. Инженерно-геологическое обеспечение горизонтально-направленного бурения при строительстве различных подземных коммуникаций в условиях мегаполисов // Горный информ.-аналит. бюл. 2016. № 12. С. 342–348.
14. СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011. Прокладка подземных инженерных коммуникаций методом горизонтального направленного бурения. М.: Изд-во «БСТ», 2012. 145 с.
15. Типовая технологическая карта (ТТК) прокладки трубопровода бестраншейным способом с использованием комплекта оборудования МНБ-50. М.: Изд-во ЗАО «Кодекс», 2011.
16. Гилета В. П., Смоляницкий Б. Н. Проходка скважин с частичной экскавацией грунта // Строительные и дорожные машины. 2001. № 4. С. 7–9.
17. Ангелопуло О. К., Подгорнов В. М., Авахов В. Э. Буровые растворы для осложненных условий. М.: Недра, 2001. 343 с.
18. Разработка и исследование рецептур буровых растворов для бурения боковых стволов // О. А. Лушпеева, Г. Б. Проводников, Н. Т. Кесева, Л. В. Корикова // Вопр. геологии, бурения и разработки нефтяных и газонефтяных месторождений Сургутского региона: сб. науч. тр. Екатеринбург. 2001. Вып. 3. 47 с.
19. Research of aerodynamics of recirculation systems with forced aspirated air / R. R. Sharapov, Yu. G. Ovsyanikov, I. P. Boychuk, A. M. Agarkov, V. S. Prokopenko // Intern. J. of Appl. Engin. Research. 2015. Т. 10, № 21. P. 42707–42713.
20. Агарков А. М., Шарапов Р. Р. Влияние ширины камеры рабочей зоны инерционного концентратора на гидравлическое сопротивление // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 9. С. 19–21.
21. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов построения гидролокаторов обзора донной обстановки // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 5/6. С. 5–14.
22. Интегральная акустическая анемометрия. Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России» / С. З. Шкундин, В. Ш. Берикашвили, А. В. Воронцов, В. В. Стучилин М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 125 с.
23. Шкундин С. З., Кремлева О. А., Румянцева В. А. Теория акустической анемометрии. М.: изд-во Академии горных наук, 2001. 456 с.

Информация об авторе

Вагин Антон Владимирович – аспирант, ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: av.vagin@bk.ru

References

1. Menejlljuk A. I., Petrovskij A. F., Borisov A. A. Novye oblasti primenenija tehnologij gorizonta'no-napravlenogo burenija // Molodij vchenij. 2015. № 8–1(23). S. 28–32. (In Russ.).
2. Danilov B. B. Puti sovershenstvovanija tehnologij i tehničkih sredstv dlja bestranshejnoy prokladki komunikacij // Fiziko-tehničke probleme razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2007. № 2. S. 69–75. (In Russ.).
3. 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.
4. Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads / M. A. Kamel, M. Eishafei, A. W. A. Saif, A. A. Al-Majed // Proc. of 15th Intern. Multi Conf. on Systems, Signals and Devices. Tunisia Hammamet, 2018. P. 1172–1177.
5. Analysis and design of pipes installed via direct PIPE technology / M. Rabiei, K. Ping, S. Chang, M. Gelinis // Proc. of Conf.: NASTT No-Dig Show. Palm Springs, CA, 2018. 11 s.
6. Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // Turkish J. of Electrical Engin. and Comp. Sci. 2017. Vol. 25, № 4. P. 3421–3434.
7. Willoughby D. Horizontal Directional Drilling (HDD): Utility and Pipeline Applications (Civil Engineering). 1st ed. New York: McGraw Hill Professional, 2005. 400 s.
8. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan: McGraw Hill, 2005. 489 s.
9. Balahovskij M. S. Na Rossijskom rynke – amerikanskaja firma «Vermeer» // Mehanizacija stroitel'stva. 2000. № 10. С. 2–7. (In Russ.).
10. Rybakov A. P. Osnovy bestranshejnyh tehnologij (teorija i praktika). М.: PressBjuro № 1, 2005. 304 s. (In Russ.).
11. Kazancev A. A., Saruev L. A. Povyshenie jeffektivnosti vrashhatel'no-udarnogo burenija skvazhin malyh diametrov. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehn. un-ta, 2011. 113 s. (In Russ.).

12. Lokacija GNB. Sistema DigiTrak Falcon F5. URL: <https://gtmachine.ru/catalog/Lokatsionnye-sistemy/lokat-siya-gnb-digitrak-falcon-f5/> (data obrashhenija 15.04.2023). (In Russ.).
13. Biktimirova K. A. Inzhenerno-geologicheskoe obespechenie gorizonta'no-napravlennoho burenija pri stroitel'stve razlichnyh podzemnyh kommunikacij v uslovijah megapolisov // Gornyj inform.-analit. bjul. 2016. № 12. S. 342–348. (In Russ.).
14. STO NOSTROJ 2.27.17-2011. Prokladka podzemnyh inzhenernyh kommunikacij metodom gorizonta'lnogo napravlennoho burenija. M.: Izd-vo «BST», 2012. 145 s. (In Russ.).
15. Tipovaja tehnologicheskaja karta (TTK) prokladki truboprovoda bestranshejnym sposobom s ispol'zovanijem komplekta oborudovanija MNB-50. M.: Izd-vo ZAO «Kodeks», 2011. (In Russ.).
16. Gileta V. P., Smoljanickij B. N. Prohodka skvazhin s chastichnoj jekskavaciej grunta // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2001. № 4. S. 7–9. (In Russ.).
17. Angelopulo O. K., Podgornov V. M., Avahov V. Je. Burovyje rastvory dlja oslozhnennyh uslovij. M.: Nedra, 2001. 343 s. (In Russ.).
18. Razrabotka i issledovanie receptur burovych rastvorov dlja burenija bokovyh stvolov // O. A. Lushpeeva, G. B. Provodnikov, N. T. Keseva, L. V. Korikova // Vopr. geologii, burenija i razrabotki neftjanyh i gazoneftjanyh mestorozhdenij Surgut'skogo regiona: sb. nauch. tr. Ekaterinburg. 2001. Vyp. 3. 47 s. (In Russ.).
19. Research of aerodynamics of recirculation systems with forced aspirated air / R. R. Sharapov, Yu. G. Ovsyanikov, I. P. Boychuk, A. M. Agarkov, V. S. Prokopenko // Intern. J. of Appl. Engin. Research. 2015. T. 10, № 21. P. 42707–42713.
20. Agarkov A. M., Sharapov R. R. Vlijanie shiriny kamery rabochej zony inercionnoho koncentratora na gidravlicheskoje soprotivlenie // Mehanizacija stroitel'stva. 2016. T. 77, № 9. S. 19–21. (In Russ.).
21. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Teoreticheskoe i jeksperimental'noje obosnovanie principov postroenija gidrolokatorov obzora donnoj obstanovki // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. T. 15, № 5/6. S. 5–14. (In Russ.).
22. Integral'naja akusticheskaja anemometrija. Materialy HI Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vysokie tehnologii v promyshlennosti Rossii» / S. Z. Shkundin, V. Sh. Berikashvili, A. V. Voroncov, V. V. Stuchilin M.: MGTU im. N. Je. Baumana, 2005. 125 s. (In Russ.).
23. Shkundin S. Z., Kremleva O. A., Rumjanceva V. A. Teorija akusticheskoi anemometrii. M.: izd-vo Akademii gornyh nauk, 2001. 456 s. (In Russ.).

Information about the author

Anton V. Vagin – postgraduate student, assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Статья поступила в редакцию 15.05.2023; принята к публикации после рецензирования 26.05.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.

Submitted 15.05.2023; accepted 26.05.2023; published online 25.09.2023.