

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.3>

УДК: 534.213.4:517.518.82

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА ДЛЯ СКВАЖИННОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ

О.В. Стукач^{1,2}, И.А. Ершов², С.В. Быков², С.А. Гладышев²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

² Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 2 октября 2022 г.

Аннотация. Предложен и исследуется новый канал связи для передачи телеметрической информации. Основной идеей является использование акустического сигнала в полосе ультразвуковых частот и внутритрубного пространства как среды передачи. Выбор ультразвукового диапазона частот акустических сигналов был сделан из предположения о меньшем влиянии эффекта интерференции при разных расстояниях между приемником и передатчиком сигналов. Внутритрубное пространство содержит более однородную среду, чем породы за обсадной трубой. Использование ультразвуковых частот уменьшает рассеяние сигнала в затрубное пространство. Предполагается, что это позволит улучшить достоверность передаваемой информации. Представлены разработанные ультразвуковые приёмник и передатчик цифрового сигнала в коде «Манчестер-II» на базе ультразвукового излучателя ma40s4s и ультразвукового датчика ma40s4r. Приведена электрическая принципиальная схема приёмника. Для оценки эффективности технического решения разработан испытательный стенд. Проведена оценка затухания ультразвукового сигнала во внутритрубном пространстве и сделан вывод о перспективности использования ультразвукового канала связи. В ходе

экспериментов выявлено значительное влияние интерференции. Данное явление затрудняет его идентификацию, поскольку паузы между символами заполняются отраженным сигналом. Для решения данной проблемы был использован дополнительный резонансный усилитель.

Ключевые слова: измерения в процессе бурения, ультразвуковой канал, геофизическая телеметрия, кодирование сигнала.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

Автор для переписки: Ершов Иван Анатольевич, ershov@corp.nstu.ru

Введение

Нефтегазовый сектор вносит определяющий вклад в экономику России. Финансирование и проведение исследований, направленных на решение задач передачи телеметрии между забоем и устьем разведочных и добывающих скважин важно для повышения эффективности нефтесервиса. В современных системах связи широкое применение нашёл электромагнитный канал, но его низкая энергетическая эффективность обусловлена сильным затуханием, вследствие чего теряется целостность сигнала. Большое затухание физически обусловлено прохождением сигнала через проводящую среду с высокой диэлектрической проницаемостью [1]. Использование сигналов в полосе сверхнизких частот [2] полностью не решает проблему затухания и, как следствие, малой длины канала связи. Использование кабеля значительно повышает стоимость обслуживания за счёт спускоподъёмных операций. Помимо этого кабель быстро изнашивается, что повышает вероятность обрыва. Таким образом, для снижения ресурсоёмкости геофизических работ необходимо не просто модернизировать существующие технологии, а использовать новые каналы связи.

Предложено использовать внутритрубное пространство насосно-компрессорной системы в качестве среды распространения сигналов. Для генерации сигнала используется акустический излучатель в полосе

ультразвуковых частот. Предполагается, что данная полоса частот позволит достичь низкого затухания сигнала при прохождении через разные породы. Теоретическая оценка затухания звука в жидкостях, как правило, значительно ниже экспериментальных результатов, что связано с большим вкладом релаксационных процессов. В случае с оценкой затухания звука в микропузырьковой среде, основанной на предположении о разряжённости этой среды, невозможно правильно оценить величину коэффициента поглощения звука [3]. Также стоит учитывать высокое затухание первой волновой моды из-за излучения в затрубное пространство [4]. Повышение частоты передачи уменьшает данный эффект, а при достижении 100 кГц затуханием можно пренебречь.

1. Обзор технических и программных решений

Для передачи данных с датчиков скважины авторы статьи [5] предлагают использовать средства акустической телеметрии. Был смоделирован метод передачи, основанный на теории изгибов балок Тимошенко. Выбор используемого метода обоснован скоростью и точностью передачи информации. Цель исследования заключалась в оценке полос пропускания сигнала при изменении динамики бурильной колонны, а также установление наиболее эффективной несущей частоты для передачи сигнала при данной динамике бурильной колонны. Результатом исследования являются модели бурильных колонн с разными параметрами изгибов, по которым была смоделирована передача сигнала с разной несущей частотой. Как итог, в первом случае по мере увеличения скорости передачи увеличивается уровень ошибки. Во втором случае при скорости передачи в 64 бит/с достигается минимальный уровень ошибки в 7,6 %, а при увеличении скорости до 80 и 100 бит/с уровень ошибки достигает 27 %. В третьем случае даже на скорости 64 бит/с уровень ошибки достигает 18 %, что делает передачу данных ненадёжной. На основании полученных данных были установлены нужные параметры передачи для эффективного

использования системы акустической телеметрии для передачи данных по бурильной колонне.

Новый метод использования акустической телеметрии для передачи информации состояния буровой колонны описан в статье [6]. Метод включает в себя использование синхронного усилителя для восстановления затухающего сигнала, метод комбинирования с максимальным соотношением (MRC) для использования сигналов нескольких частот и повышения отношения сигнал/шум, а также свёрточное кодирование (FEC) для минимизации ошибок в приёмнике. Для проверки эффективности метода была собрана экспериментальная модель, отвечающая заданным параметрам приёма-передачи сигнала. В итоге акустический канал был охарактеризован с помощью частотной развёртки, которая определена двумя частотами передачи: 2387 Гц и 3742 Гц. Использование LIA улучшило коэффициент битовых ошибок (BER) системы на 3,2 % для первой частоты и на 2,6 % для второй. Метод MRC позволил улучшить средний показатель BER на 2,8 %. При эквивалентной длине буровой колонны в 1,95 км система акустической телеметрии достигла BER в $4,9 \cdot 10^{-4}$. Также проведённые эксперименты показали, что надёжная передача была возможна до -13 дБ, что соответствует эквивалентной длине 2,53 км и 1,81 км для каждой из используемых частот соответственно.

В статье [7] авторы приводят теоретические расчёты и анализ физических параметров двух возможных конфигураций системы индуктивной телеметрии – параллельная и последовательная. Для обеих конфигураций были выведены формулы расчета максимальной мощности приёмников с помощью связывающего коэффициента, а также коэффициент полезного действия системы приёма. Последовательная конфигурация обеспечивает лучшие характеристики, чем реализация схемы для такой индуктивной связи, которая была спроектирована, изготовлена и протестирована в ситуации, когда допускается использование слабого уровня сигнала. Система обеспечивает скорость передачи данных 1 Мбит/с при использовании несущей частоты 8 МГц с потребляемой мощностью 25 мВт.

Авторами статьи [8] было проведено экспериментальное исследование улучшения характеристик гидроимпульсной телеметрии во время бурения. Был проведён ряд теоретических исследований, где получен способ улучшения характеристик пульсации бурового раствора. Было предложено два метода улучшения телеметрии: прерывистая закачка газа и использование газожидкостного смесителя. За счёт использования прерывистой закачки газа удалось повысить максимальную скорость закачки газа с $6 \text{ м}^3/\text{мин}$ до $12 \text{ м}^3/\text{мин}$. В результате использования газового смесителя удалось увеличить амплитуду принимаемого сигнала с $0,0033 \text{ МПа}$ до $0,01 \text{ МПа}$. Также результаты эксперимента показали, что гидроимпульсная телеметрия с непрерывной несущей имеет больше преимуществ, чем при использовании генераторов положительных импульсов.

Важную роль в телеметрических системах играют методы уменьшения уровня шума. В системах гидроимпульсной телеметрии для приёма полезного сигнала можно использовать метод извлечения дифференциального сигнала [9]. В результате авторам удалось добиться повышения соотношения сигнал-шум с -13 дБ до 25 дБ . В статье [10] авторы описывают метод передачи телеметрического сигнала с повышенной шумозащитой. Авторы использовали код Боуза в двоичном симметричном канале. Авторы смоделировали бинарный симметричный канал связи, который включил в себя источник ошибок с заданной системой передачи данных. Описываемый метод кодирования сигнала обеспечивает высокую достоверность передаваемых данных, но на основании теоретических расчётов.

Перед разработкой приёмопередающей системы необходимо произвести теоретические расчёты. Статья [11] посвящена моделированию ультразвукового приёмопередатчика. Структура включает в себя эквивалентные схемы для импульсного электронного приёмопередатчика и для двух пьезоэлектрических элементов, соединённых каскадом. Авторами приведены формулы, описывающие поведение конечного сигнала передатчика. С помощью компьютерных расчётов были оценены передаточные функции двухстадийного

пьезоэлектрического эффекта с цирконат-титанатом свинца. Соотношение сигнал-шум повышалось путём нахождения оптимальных настроек параметров излучения. Был проведён анализ полученных сигналов во временной и частотной областях. Авторам удалось достигнуть повышения амплитуды принимаемого сигнала более чем на 2 дБ. Это свидетельствует о перспективности ультразвукового канала и необходимости его дальнейшего изучения для передачи скважинной телеметрии.

2. Результаты экспериментов

Нами была разработана система передачи телеметрической информации, которая состоит из ультразвукового передатчика и приёмника (рис. 1). Были использованы ультразвуковой излучатель ma40s4s и ультразвуковой датчик ma40s4r. Приёмник содержит два усилителя: первый с фиксированным коэффициентом усиления, второй с автоматической регулировкой усиления (APУ).



Рис. 1. Ультразвуковой передатчик и приёмник

Основная идея работы заключается в использовании внутритрубного пространства для передачи сигнала. Данная идея основана на предположении о том, что благодаря отражению сигнала от стенок труб будет достигнуто меньшее затухание, чем при прохождении сигнала через гетерогенную среду. Во внутритрубном пространстве будет возникать интерференция, в связи с чем мощность сигнала будет распределена неравномерно. Данное явление необходимо учитывать в системе передачи.

Был разработан испытательный стенд для оценки эффективности предложенного канала связи. Внешний вид испытательного стенда показан на рис. 2. Для стенда используется труба длиной 4 м с металлизированным покрытием. Приёмник размещается на одном конце трубы, а передатчик может свободно перемещаться. Таким образом, можно измерить уровень сигнала по всей длине трубы для создания модели распространения сигнала в данной среде. При этом мы принимаем допущения, что длина трубы значительно меньше длины скважины; внутритрубное пространство не заполнено жидкостью; не были использованы оптимальные частоты для передачи сигнала. Данный стенд необходим для первичной настройки системы, оценке затухания и поиска оптимальных частот.



Рис. 2. Испытательный стенд

На рис. 3 показаны сигналы с приёмника после первого усилителя (снизу) и после второго усилителя (сверху). Передаваемое сообщение представляет собой комбинацию импульсов и пауз. Был использован сигнал, преобразованный по коду «Манчестер-II». Структура сообщения: преамбула (0хаа), информационный байт, контрольная сумма. В процессе передачи информационный байт при каждой посылке увеличивается на единицу. В схеме передатчика предусмотрена возможность передавать произвольную информацию, задаваемую набором переключателей.

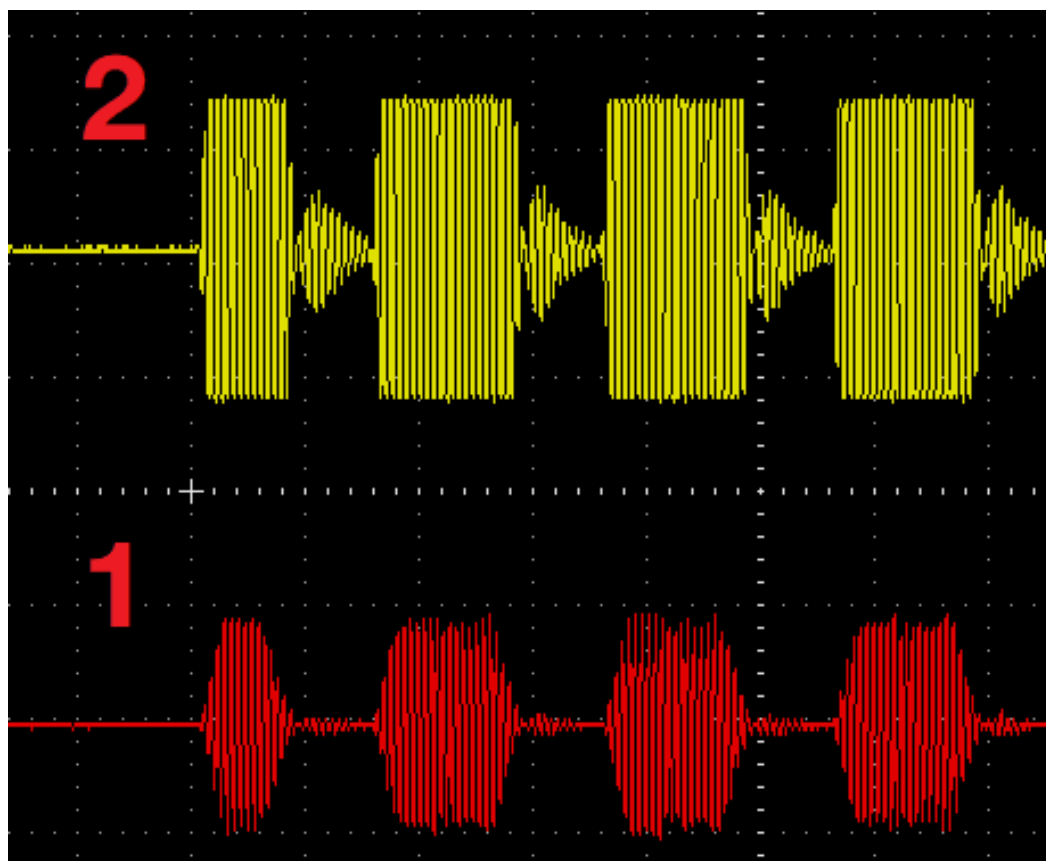


Рис. 3. Сигналы с приёмника

Как и ожидалось, мощность сигнала распределена неравномерно из-за интерференции. Особенно чётко оно наблюдается во время пауз между импульсами, где амплитуда сигнала должна быть равна нулю, однако наблюдается затухающий сигнал. При расстоянии 2 м между приёмником и передатчиком можно наблюдать сильное влияние интерференции на форму сигналов (рис. 5). Это приводит к ситуации, когда усилитель с АРУ усиливает шум в областях пауз до уровня информационного сигнала, что делает невозможным его декодирование. Данная проблема будет решена в дальнейшем. На текущий момент необходимо оценить затухание сигнала в внутритрубном пространстве. Результаты приведены в таблице 1. Была использована формула (1).

$$a = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_0}{U_x}\right), \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда сигнала вблизи передатчика; U_x – амплитуда сигнала на расстоянии x от передатчика.

Таблица 1. Затухание сигнала во внутритрубном пространстве

Расстояние между приёмником и передатчиком, м	Затухание сигнала, дБ
0,5	-0,16
1,0	-0,14
1,5	0,00
2,0	-0,12
2,5	0,18
3,0	0,05
3,5	0,18
4,0	0,35

По табл. 1 можно сделать вывод о том, что благодаря интерференции в некоторых областях внутритрубного пространства уровень сигнала повышается. Для наглядности на рис. 4 приведён график затухания сигнала. Таким образом, если решить проблему идентификации сигнала, возникающую из-за интерференции, то можно значительно увеличить дальность передачи данных. Также стоит отметить, что при нахождении оптимальных частот передачи сигнала затухание снизится.

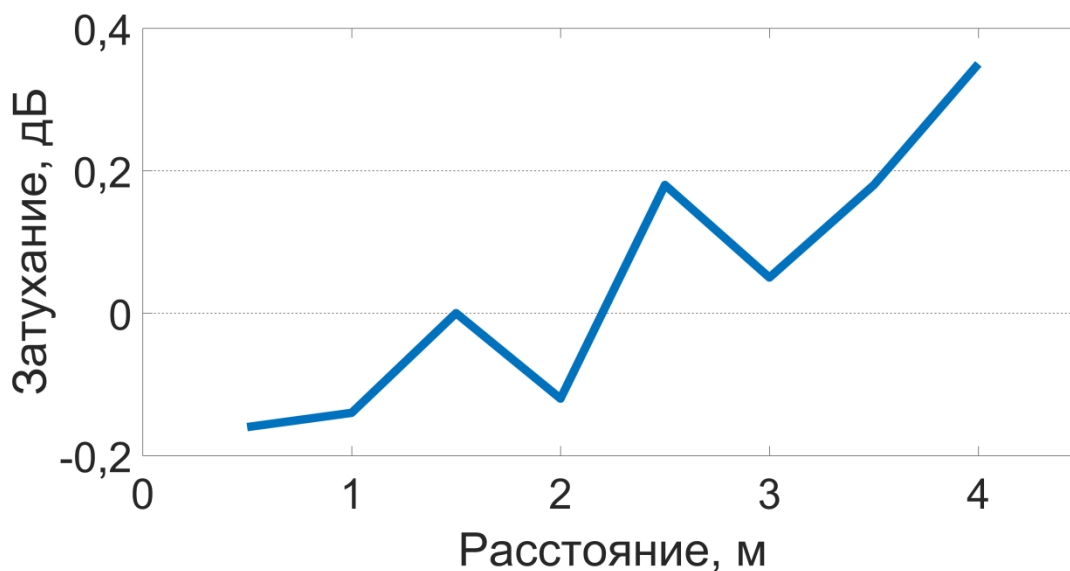


Рис. 4. Сигналы с приёмника

3. Принципиальная электрическая схема приёмника

Принципиальная электрическая схема приёмника показана на рис. 5. Первый вариант приёмника показан на схеме областью 1 и содержал только два усилительных каскада. Ультразвуковой датчик G1 был соединен с конденсатором C5.

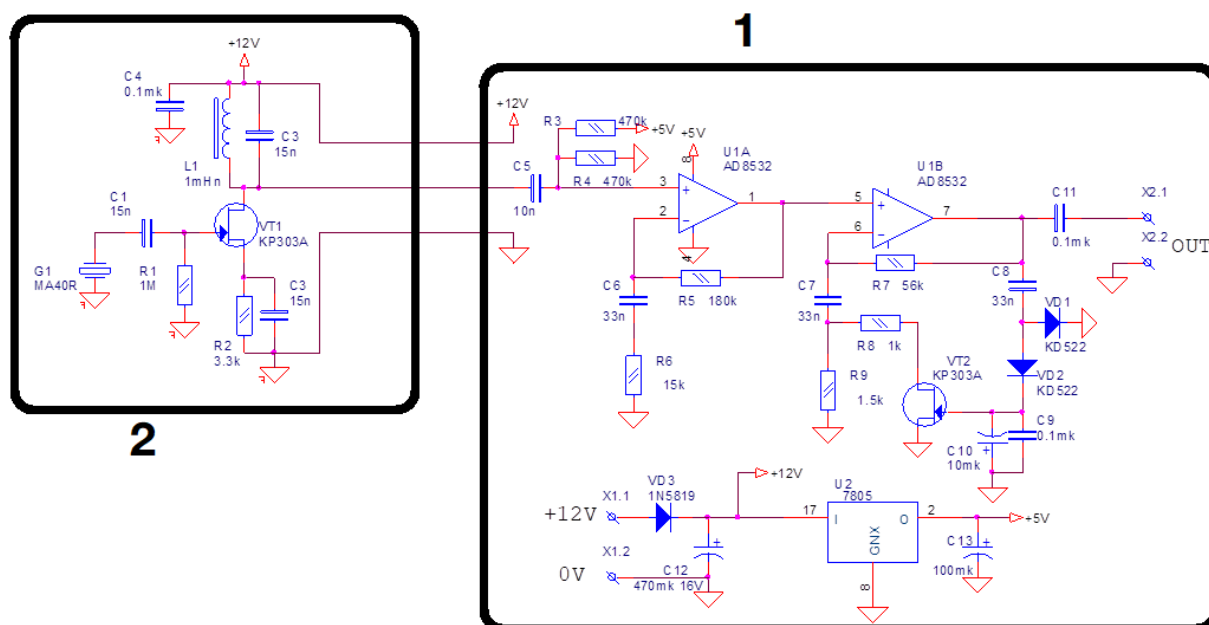


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема приёмника

В состав схемы приемника входит стабилизатор напряжения питания на основе микросхемы линейного стабилизатора напряжения 7805. Использование стабилизатора напряжения необходимо для проведения испытаний в полевых условиях при отсутствии силовой сети 230 В 50 Гц. В качестве первичных источников энергии предполагается использования свинцовых аккумуляторов с номинальным напряжением 12 В. В связи и использованием в процессе исследований первичных источников энергии в виде свинцовых аккумуляторов, в состав стабилизатора напряжения включен диод VD3, исключающий выход из строя схемы приемника при неправильном, с точки зрения полярности, подключения аккумулятора. Наличие стабилизатора напряжения питания позволит исключить влияние падения напряжения на аккумуляторе в процессе работы (разряд аккумулятора) на параметры схемы приемника. Выбор линейного стабилизатора напряжения связан с желанием уменьшить уровень

высокочастотных пульсаций в линии напряжения питания, которые возникают при использовании импульсных стабилизаторов напряжения. В качестве активных элементов, реализующих усиление сигналов, были выбраны операционные усилители AD8532. Причина выбора данной модели операционного усилителя: частота единичного усиления – 3 МГц, входной каскад на основе полевых транзисторов с затвором на основе р-п перехода. Указанное значение частоты единичного усиления обеспечит усиление сигналов с частотой 40 кГц. Входное сопротивление операционного усилителя с использованием входных полевых транзисторов имеет большое значение, что важно для обеспечения согласования сопротивления с выходным сопротивлением приемника ультразвуковых сигналов. Так как в процессе распространения акустических сигналов ультразвукового диапазона в испытательном стенде предполагалось изменение уровня сигнала за счет эффекта затухания сигналов в процессе распространения и за счет эффекта интерференции, в составе макета приемного устройства был реализован процесс автоматической регулировки коэффициента усиления. Первый каскад усиления (U1A) имеет фиксированный коэффициент усиления равный 12 и служит для формирования уровня сигнала, необходимого для устойчивой работы схемы усилителя с автоматической регулировкой коэффициента усиления. Схема включения операционного усилителя первого каскада – неинвертирующий усилитель. Выбор данной схемы включения обусловлен тем, что она имеет большое входное сопротивление и обеспечивает согласование сопротивлений с выходным сопротивлением приемника ультразвуковых сигналов. Использование в данной схеме конденсатора С6 обеспечивает усиление только переменных сигналов. В связи с этим, для второго каскада усилителя нет необходимости использовать электронные компоненты, задания рабочей точки. Во втором каскаде усилителя приемного устройства (U1B) реализован процесс автоматической регулировки усиления. Процесс реализации автоматической регулировки усиления основан на факте зависимости сопротивления канала полевого транзистора с затвором на основе р-п перехода от напряжения затвор-

исток. Так как транзистор включен параллельно резистору R9, сопротивление канала транзистора будет шунтировать сопротивление резистора R9. Результатом этого будет уменьшение сопротивления совокупности R9/(сопротивление канала полевого транзистора). Для выбранной модели полевого транзистора (КП303А) сопротивление канала близко к нулю вольт при нулевом значении напряжения затвор-исток и практически равной бесконечности при напряжении затвор-исток равном 4 В. Если выходной сигнал второго каскада не превышает 0,7 В сигнал через схему преобразования переменного напряжения в постоянное на основе диодов VD1, VD2. В результате напряжение затвор-исток полевого транзистора VT2 будет равно ноль вольт. При этом коэффициент усиления каскада будет равен 93,33. После превышения амплитуды выходного сигнала второго каскада усиления величины 0,7 В на выводах полевого транзистора затвор-исток будет возникать напряжение, что приведет к увеличению сопротивления канала полевого транзистора и как следствие, меньшего шунтирования сопротивления резистора R9. После достижения выходным сигналом второго каскада усиления величины 4 В, сопротивление канала полевого транзистора станет близким к бесконечности и коэффициент усиления второго каскада усиления станет равным 37,33.

В процессе определения уровня сигнала от передатчика на разных расстояниях было обнаружено, что в паузах между информационными сигналами происходит усиление интерференционных сигналов со сопоставимым коэффициентом усиления. Сигнал на выходе первого каскада усиления приёмника обозначен цифрой 1 на Рис. 6. Цифрой 2 на Рис. 6 показан сигнал на выходе второго каскада усиления, в котором реализован режим автоматической регулировки усиления.

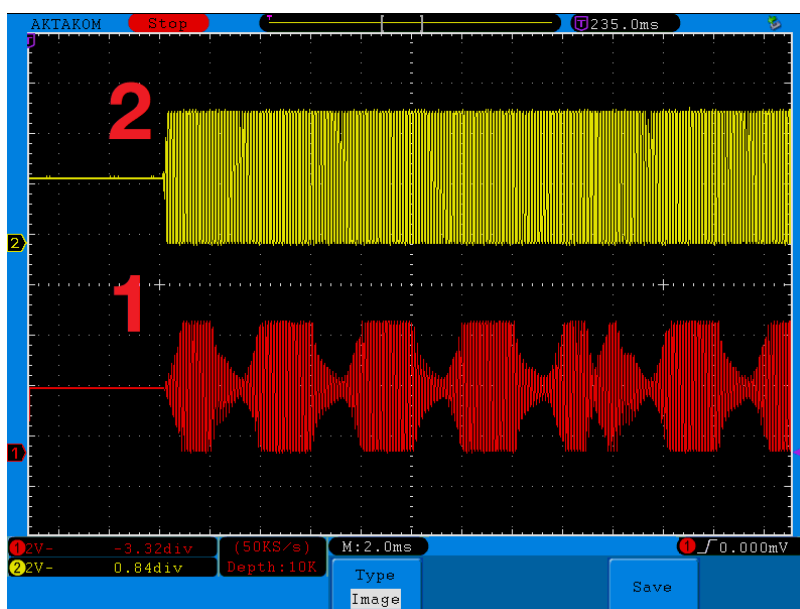


Рис. 6. Сигналы с приёмника

Предположительным объяснением эффекта, показанного на Рис. 6. является влияние конечного значения скорости нарастания выходного сигнала операционного усилителя. Следствием этого являлось то, что слабые сигналы усиливались эффективнее больших по амплитуде. Для проверки данного предположения схема приемного устройства была модернизирована за счет дополнительного входного резонансного усилителя на основе полевого транзистора (рис. 5, область 2). Параметры резонансного LC контура, используемого в качестве нагрузочного сопротивления усилителя на основе полевого транзистора соответствуют рабочей частоте сигнала – 40 кГц. Результат данной модернизации показан на рис. 7.

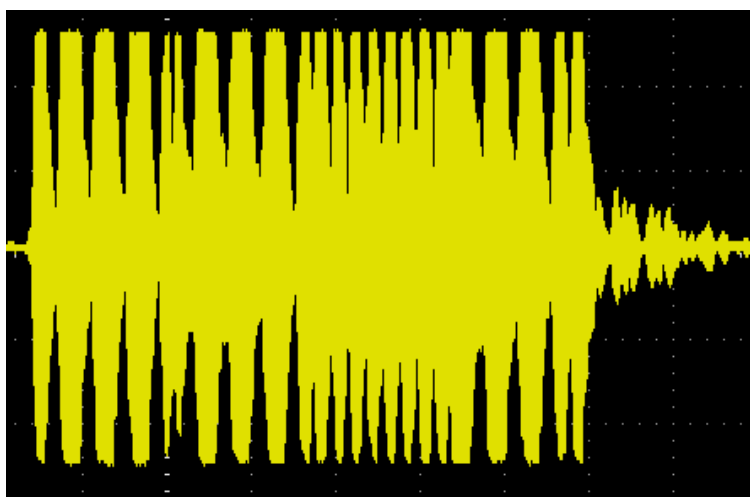


Рис. 7. Сигнал на выходе приёмника

Заключение

Исследования, направленные на увеличение эффективности нефтесервиса являются важным направлением электронной техники. В данной работе было предложено использовать ультразвуковой канал связи для передачи телеметрической информации от забоя к устью скважины. В качестве среды распространения предложено использовать внутритрубное пространство, поскольку достигается повышение мощности сигнала. Расчёты уровня затухания сигнала позволяют сделать предположение о том, что использование акустических методов в полосе ультразвуковых частот может обеспечить высокий уровень принимаемого сигнала. Испытания на стенде показали, что возникающая интерференция значительно усложняет его идентификацию. Данная проблема была решена за счёт использования дополнительного резонансного усилителя.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

Литература

1. Тынчеров К.Т., Червяков Н.И., Селиванова М.В., Калмыков И.А. Способ повышения достоверности телеметрической скважинной информации, передаваемой по беспроводному каналу связи. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т.329. №3. С.36-43.
2. Стукач О.В., Мирманов А.Б., Гопоненко А.С., Кочумеев В.А. Разработка новой телесистемы для передачи данных по радиоканалу в процессе бурения скважин. *Вестник науки Сибири*. 2014. №1(11). С.76-83.
3. Бошнятов Б.В., Попов В.В. Затухание низкочастотных звуковых волн в микропузырьковой газожидкостной среде. *Фундаментальные исследования*. 2009. №3. С.99-102.

4. Горбачев И.В., Кузяков О.Н., Прядко А.В. К вопросу о затухании звуковой волны, связанном с излучением звука в затрубное пространство. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2009. №5. С.29-31.
5. Mostaghimi H., Pagtalunan J.R., Moon B., Kim S., Park S.S. Dynamic drill-string modeling for acoustic telemetry. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. V.218. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.107043>
6. Pagtalunan J., Parmar K., Kim S., Moon B., Park S.S. Experimental study on repeater-free acoustic telemetry for downhole operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. V.202. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108551>
7. Li H., Liang J., Li C., Li G., Meng Y., Yang P., Liu J., Xu L. A novel method to improve mud pulse telemetry performance during gaseated underbalanced drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V.213. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110400>
8. Levenets A.V., Un C.E., Bogachev I.V. Method of noise-protected transmission of telemetric data with adaptation to the state of the communication channel. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon*. 2019. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934367>
9. Shao J., Yan Z., Han S., Li H., Gao T., Hu X., Wei C. Differential signal extraction for continuous wave mud pulse telemetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. V.148. P.127-130. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.047>
10. Sacristan-Riquelme J., Segura F., Osés M.T. Simple and efficient inductive telemetry system with data and power transmission. *Microelectronics Journal*. 2008. V.39. №1. P.103-111. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.11.012>
11. Ramos A. San Emeterio J.L., Sanz P.T. Different tuning contributions in piezoelectric transceivers improving transient signals for ultrasonic imaging. *ISAF 1998. Proceedings of the Eleventh IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*. 1998. P.251-254. <https://doi.org/10.1109/ISAF.1998.786681>

Для цитирования:

Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В., Гладышев С.А. Разработка ультразвукового приемопередатчика для скважинной телеметрии. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.3>