

УДК 681.883.45

ПЕРЕДАЧА ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОСТРУЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

СУХАРЬКОВ О.В.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

DIGITAL DATA TRANSMISSION IN HYDROACOUSTIC COMMUNICATION CHANNEL WITH THE USE HYDRODYNAMIC CONVERTERS

SUHARKOV O.V.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov

***Аннотация.** Рассмотрены особенности передачи информации в гидроакустическом канале связи. Проведен анализ акустических свойств жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. Разработан новый способ передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи с помощью рупорных антенн на основе жидкоструйных преобразователей.*

***Summary.** The features of information transfer in a hydroacoustic communication channel are considered. The analysis of the acoustic properties hydrodynamic converters with a circular nozzle and a stepped obstacle is performed. A new method for digital data transmission in a hydroacoustic communication channel with the use horn antenna based on hydrodynamic converters is presented.*

ВВЕДЕНИЕ

Освоение мирового океана, в том числе разведка и добыча полезных ископаемых со дна морей, различные военно-морские задачи нуждаются в надежной передаче цифровой информации между подводными объектами. По причине сильного поглощения электромагнитных волн в соленой морской воде практически во всех диапазонах частот, единственным каналом, по которому возможна передача информации в этих условиях, является гидроакустический канал. Для совершенствования звукоподводной связи важной проблемой является проблема увеличения дальности действия передающей аппаратуры за счет использования более низких частот. При этом особое внимание уделяется разработке эффективных глубоководных преобразователей, являющихся неотъемлемыми элементами гидроакустических излучающих антенн [1...3].

В настоящее время в гидроакустике наиболее широкое распространение получили магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи. Общий недостаток гидроакустических антенн на основе таких преобразователей – дорогостоящее высоковольтное оборудование, включающее сложные силовые генераторы. К недостаткам магнитострикционных преобразователей типа большого кольца или витков следует также отнести большие удельные массы магнитострикционных материалов и необходимость применения поляризации при излучении. Существенный недостаток пьезоэлектрических преобразователей связан с тем, что керамика не обладает большой прочностью на разрыв, а это приводит к ее повреждению (растрескиванию) на глубине при высоких уровнях мощности. Что касается частотного диапазона генерируемых колебаний, то электроакустические излучатели эффективны лишь на высоких частотах ($f > 20$ кГц), но уже при (5...6) кГц их КПД существенно уменьшается.

Использование этих преобразователей на частотах менее 1 кГц нецелесообразно из-за больших габаритов и массы.

Стремление использовать в гидроакустических системах связи низкие рабочие частоты приводит к поиску методов эффективного излучения низкочастотных сигналов, основанных на нетрадиционных принципах построения излучающих антенн. В связи с этим определенным интересом представляет использование жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [4, 5]. Неоспоримые их преимущества: экономичность (дешевизна изготовления излучателей), простота в эксплуатации, малые габариты и вес, отсутствие вибрирующих элементов конструкции, обуславливающее длительный срок службы преобразователей. Однако при проектировании гидроакустических излучающих антенн для передачи цифровой информации между подводными объектами жидкоструйные преобразователи ранее не использовались. Это связано со спецификой генерирования звука в водной среде: работа жидкоструйных преобразователей основана на преобразовании части энергии турбулентной затопленной струи жидкости в энергию акустических волн [6].

Целью данной статьи является разработка способа передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи с помощью антенн на основе жидкоструйных преобразователей.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Основным отличием акустических волн от электромагнитных является сравнительно низкая скорость их распространения в водной среде: в среднем 1500 м/с. По этой причине, в зависимости от дальности связи, время прохождения сигнала по гидроакустическому каналу связи составляет единицы и десятки секунд. Эта особенность оказывает существенное влияние на динамику характеристик принимаемого сигнала связи. Даже в случае передачи данных между стационарными абонентами принимаемый сигнал может испытывать значительные доплеровские смещения в результате отражения от движущейся поверхности воды. Для типичных скоростей движения подводных и наземных абонентов относительные доплеровские смещения гидроакустических сигналов могут на несколько порядков превышать относительные доплеровские смещения электромагнитных сигналов. Например, при перемещении поверхностной (ветровой) волны с относительной скоростью 1,5 м/с коэффициент Доплера для отраженного сигнала будет иметь значение 10^{-3} (для сравнения: при передаче радиосигнала из автомобиля, движущегося со скоростью 30 м/с по отношению к приемнику, коэффициент Доплера имеет порядок 10^{-7}) [7]. Это обстоятельство приводит к значительно большим относительным расширениям сигнала, чем в привычных радиоканалах. Однако при корректной разработке аппаратуры связи эффект Доплера компенсируется системой синхронизации аппаратуры.

При разработке процедур и протоколов обмена данными необходимо также учитывать относительно малую скорость распространения гидроакустических сигналов. В частности, при реализации привычных (для цифровой радиосвязи, интернета и пр.) протоколов канального уровня, требующих подтверждения доставки данных, с увеличением дистанции связи паузы ожидания квитанции будут возрастать, а скорость звукоподводной передачи информации будет снижаться. С целью усовершенствования физических возможностей гидроакустического канала связи в статье [8] предложен специализированный протокол канального уровня.

По сравнению с радиоканалами, где доступная для прикладных задач ширина частотной полосы может измеряться мегагерцами, гидроакустические каналы связи являются сравнительно низкочастотными и узкополосными. В зависимости от конкретных потребностей в гидроакустике используются звуковые частоты (0,3...16) кГц и ультразвуковые от 16 кГц и

выше. Однако с повышением частоты звуковых колебаний дальность их распространения уменьшается. Так, если в диапазоне частот (500...2000) Гц дальность распространения под водой звука средней интенсивности достигает (15...20) км, то для ультразвука она составляет (3...5) км [6]. Поэтому ограничение ширины частотной полосы, с одной стороны, связано с обеспечением необходимой дальности передачи информации. С другой стороны, это ограничение связано с обеспечением необходимой скорости передачи данных. С уменьшением частоты период колебаний увеличивается, и длительность символа данных растёт (это связано с тем, что модуляция несущей на интервале, например, четверти длины волны является недостаточной для формирования сигнала связи). Удлинение символов данных приводит к снижению скорости их передачи [7]. Например, для некоторых практических задач [9] при дальности связи 2 км требуемая номинальная скорость передачи данных 20 кбит/с. В этом случае частотная полоса ограничивается сверху значениями 60 – 80 кГц, а максимальная продолжительность символа данных: продолжительностью 80 – 100 мкс. Ограничение, связанное с необходимостью обеспечивать требуемую скорость связи, позволяет также оценить ограничение снизу на минимальную частоту сигнала связи. В силу особенностей силовой части тракта сигнал связи должен содержать не менее трех периодов колебаний, поэтому ограничение на частоту сигнала снизу составляет 30 – 35 кГц. Таким образом, ширина полосы частот, которая может использоваться для удовлетворения требованиям данного примера, составляет 30 – 40 кГц.

В естественных условиях, кроме затухания, обусловленного вязкостью воды, ослабление звука происходит за счет рефракции звука и его рассеяния и поглощения различными неоднородностями жидкой среды. Рефракция звука вызывается неоднородностью свойств воды, главным образом по вертикали, вследствие изменения с глубиной гидростатического давления, солёности и температуры в результате неодинакового прогрева массы воды солнечными лучами. В результате скорость распространения звука изменяется с глубиной, причем закон изменения зависит от времени года, времени дня, глубины водоема и ряда других причин. Например, зимой дальность распространения звука больше, чем летом. Из-за рефракции образуются так называемые зоны тени, т. е. области, расположенные недалеко от источника, в которых слышимость отсутствует.

Рефракция, однако, может приводить не только к уменьшению, но и к увеличению дальности распространения звука (сверхдальнее распространение звука под водой). На некоторой глубине под поверхностью воды находится слой, в котором звук распространяется с наименьшей скоростью. Выше этой глубины скорость звука увеличивается из-за повышения температуры, а ниже – скорость звука увеличивается вследствие увеличения гидростатического давления с глубиной. Этот слой представляет собой своеобразный подводный звуковой канал (ПЗК) или «SOFAR». Акустические волны, излученные ненаправленным источником, расположенным на оси ПЗК, распространяясь вдоль лучевых траекторий, в результате рефракции отклоняются по вертикали в направлении уменьшения профиля скорости звука к оси канала и, не испытывая отражений от дна и поверхности, могут распространяться на большие расстояния. Если поместить в ПЗК источник и приемник звука, то даже звуки средней интенсивности (например, звуки взрыва небольших зарядов массой 1 – 2 кг) могут быть зарегистрированы на расстояниях в сотни и тысячи километров [6]. В Черном море летом ось ПЗК расположена примерно на глубинах 50...65 м [10].

Гидроакустические каналы связи, также как и радиоканалы, характеризуются многолучевой интерференцией, следствием которой является непредсказуемое искажение принимаемого сигнала. Однако в системах радиосвязи продолжительность сигнала связи (символа данных) обычно значительно превышает продолжительность его избыточной задержки распространения. В частности, длительности символов данных имеют порядок десятков или сотен микросекунд, а

продолжительности избыточной задержки распространения сигнала лежат в пределах от нескольких сотен наносекунд до нескольких микросекунд [11]. Такое соотношение между продолжительностью задержки распространения и длительностью радиосигнала обуславливает незначительную межсимвольную интерференцию и, поэтому, обеспечивает сравнительно благоприятные условия для восстановления передаваемой информации на приеме. В гидроакустическом канале продолжительность избыточной задержки распространения сигнала измеряется сотнями микросекунд, миллисекундами, или иногда десятками миллисекунд. При этом продолжительности символов данных измеряются десятками или сотнями микросекунд [9]. Это означает, что длительности символов данных в подводной акустической связи могут быть на порядок меньше продолжительности избыточной задержки распространения. Такое соотношение обуславливает наличие выраженной межсимвольной интерференции и, следовательно, не обеспечивает сравнимых с радиоканалами благоприятных условий для восстановления передаваемой информации на приеме [7].

Анализ основных факторов, влияющих на распространение акустических волн под водой, характеризует сложность процесса передачи и восстановления гидроакустических сигналов. Тем не менее, на сегодняшний день акустика представляет собой основное средство передачи информации между подводными абонентами, как при аналоговой, так и при цифровой связи.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТРУЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Зона звукообразования жидкоструйного преобразователя представляет собой своеобразную резонансную систему, состоящую из внутренней кавитирующей среды, упругой струйной оболочки и присоединенной массы жидкости. Эта резонансная система обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая струйной оболочке стабильную частоту автоколебаний [12]. Рассмотрим подробнее механизм звукообразования прямоточного жидкоструйного преобразователя [4] со ступенчатым препятствием (рис. 1, а).

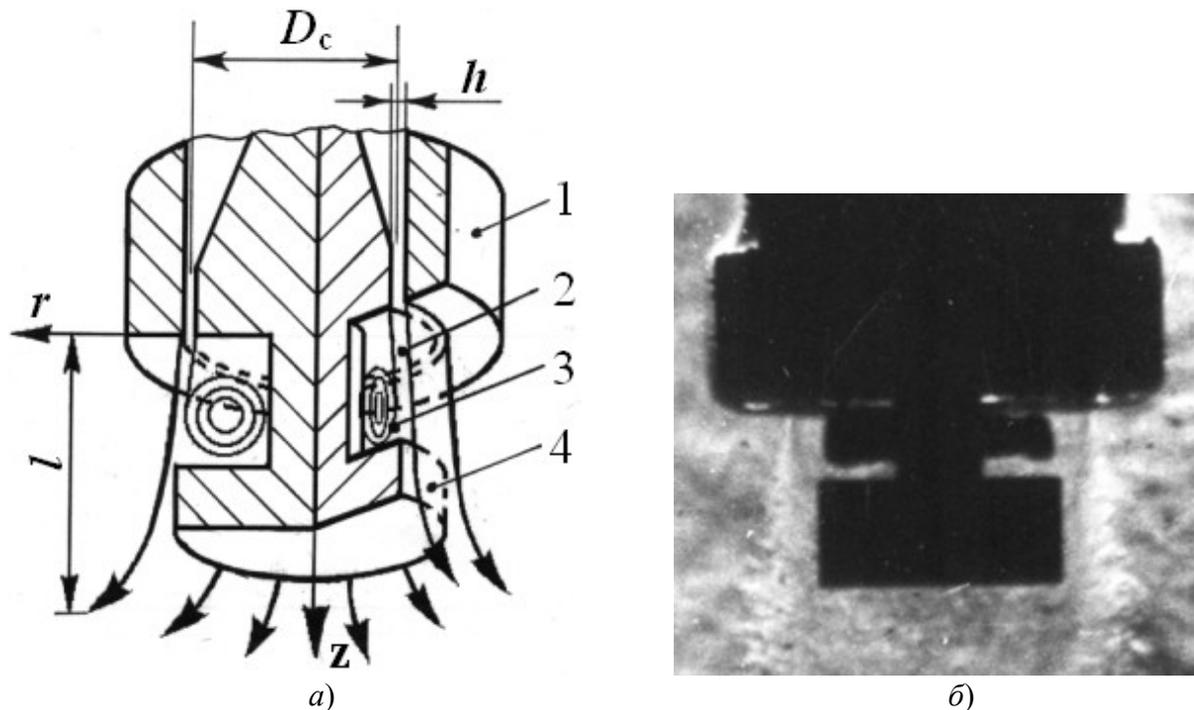


Рисунок 1 – Прямоточный жидкоструйный преобразователь: а) физическая модель, б) теньевая фотография работающего преобразователя

Струя жидкости, вытекающая с регулируемой скоростью из кольцевого сопла 1, представляет собой затопленную цилиндрическую струйную оболочку 2. Можно считать, что верхнее основание оболочки 2 жестко заземлено на торце сопла, а нижнее основание является свободным. Ступенчатое препятствие 4 способствует раздвоению вытекающей струи: одна часть потока уходит во внешнюю среду, а другая часть заворачивается в сторону оси симметрии преобразователя и формирует первичный вихрь 3 тороидальной формы. Струйная оболочка и первичный тороидальный вихрь хорошо видны на теневой фотографии работающего преобразователя (рис. 1, б).

За счет эффекта Бернулли в центре вихря создаются условия для разрыва жидкости и образования парогазовых кавитационных пузырьков. С увеличением концентрации каверн давление внутри вихря 3 возрастает и достигает критического значения. В этот момент свободный край упругой струйной оболочки 2 деформируется и происходит выброс содержимого кавитационной зоны во внешнюю среду. Ниже ступенчатого препятствия 4 за счет вязкостного трения образуется вторичный кольцевой вихрь. При коллапсе кавитационных пузырьков во вторичном вихре интенсивность генерируемых акустических волн усиливается. После этого давление во внутренней полости струйной оболочки 2 становится меньше гидростатического давления в невозмущенной водной среде, что вновь приводит к возникновению первичного вихря 3. В дальнейшем описанный процесс периодически повторяется.

Таким образом, накопителем энергии в жидкоструйном преобразователе является первичный вихрь 3, а его пульсации возбуждают изгибные колебания в струйной оболочке 2. Частота пульсаций вихря 3 зависит от скорости струи на выходе из сопла. При оптимальной скорости струи, когда частота пульсаций вихря совпадает с собственной частотой изгибных колебаний оболочки, генерируется тональный акустический сигнал максимального уровня (рис. 2). Преимуществом прямоточного жидкоструйного преобразователя, по сравнению с противоточным [6], является строго заданное формирование кольцевой струи перед обтеканием ею ступенчатого цилиндрического препятствия 4 (рис.1), что позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования звуковых волн.

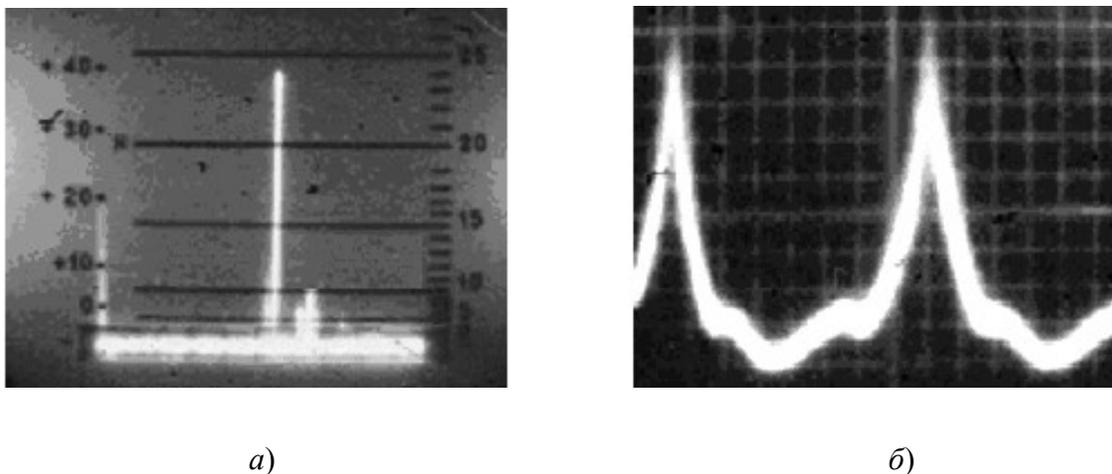


Рисунок 2 – Спектрограмма (а) и осциллограмма (б) генерируемого тонального акустического сигнала при оптимальном режиме истечения струи

Ранее проведенные экспериментальные исследования показали, что акустический сигнал, генерируемый жидкоструйными преобразователями, является негармоническим: в частотном спектре наблюдается ряд гармонических составляющих [13...16]. Однако при оптимальном режиме истечения струи амплитуда первой (нижней) гармоники превышает амплитуды высших гармоник на 20...40 дБ (рис. 2, а). В этом случае генерируемый тональный звуковой сигнал состоит из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы с разной крутизной переднего и заднего фронтов. Период следования импульсов ($T \approx 1/f_0$) определяется частотой основного тона f_0 генерируемого сигнала. Анализ осциллограмм показывает, что в течение приблизительно $3/4$ периода происходит накопление энергии и за время примерно $T/4$ излучается короткий импульс [14].

Динамика струйной оболочки определяет амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) жидкоструйных преобразователей. При этом АЧХ преобразователей зависят от геометрических и гидродинамических параметров затопленной струйной оболочки и свойств жидкости. Чем больше амплитуда A деформации изгиба свободного края оболочки, тем большее количество парогазовых каверн выйдет наружу из внутренней области оболочки (первичный вихрь). И тем выше будет интегральный уровень генерируемого сигнала (звуковое давление P) при коллапсе каверн во вторичной тороидальной области. Этому соответствует оптимальная скорость струи, при которой собственная частота струйной оболочки совпадает с частотой пульсаций неустойчивого первичного вихря. Наибольшая часть кинетической мощности затопленной струи преобразовывается в интенсивность акустического поля именно при резонансной частоте.

На рис. 3,а представлены АЧХ прямооточных жидкоструйных преобразователей с различным средним диаметром $D_{\text{цил}}$ струйной оболочки. Здесь сплошными линиями отражены теоретические кривые амплитуды вынужденных изгибных колебаний свободного края оболочки в относительных единицах (A/A_{max}), рассчитанные согласно методике статьи [16]. Там же в относительных единицах звукового давления (P/P_{max}) представлены точками результаты экспериментальных измерений АЧХ излучателей. При этом учтено, что $A/A_{\text{max}} = P/P_{\text{max}}$. При проведении экспериментов постоянными были толщина струйной оболочки ($h = 0,5\text{мм}$) и соотношение длины и среднего диаметра струйной оболочки ($l/D_{\text{цил}} = 0,6$). Видна хорошая корреляция экспериментальных АЧХ преобразователей и функции изгибных колебаний свободного края струйной оболочки.

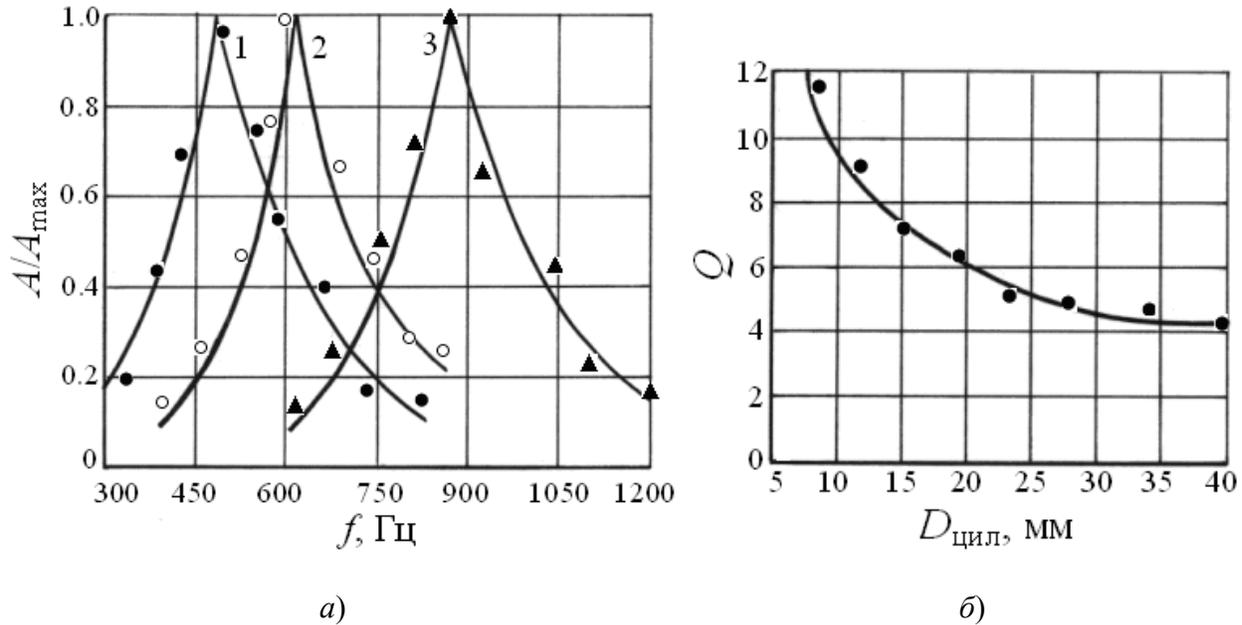


Рисунок 3 – а) АЧХ жидкоструйного преобразователя при среднем диаметре струйной оболочки: 1 – $D_{цил} = 34\text{мм}$, 2 – $D_{цил} = 23\text{мм}$, 3 – $D_{цил} = 15\text{мм}$; б) зависимость добротности преобразователя от среднего диаметра оболочки

На рис. 3,б показана зависимость добротности $Q(D_{цил})$ от среднего диаметра оболочки.

Добротность Q жидкоструйных преобразователей определялась как отношение $f_0 / \Delta f$, где Δf – ширина частотной полосы, на границах которой акустическая энергия излучателя при вынужденных колебаниях вдвое меньше энергии на резонансной частоте. Расчет показал, что добротность прямоточного преобразователя с ростом среднего диаметра струйной оболочки существенно понижается, асимптотически приближаясь к значению $Q = [4,3...5]$. Известно, что для обеспечения широкой равномерной частотной характеристики излучения, позволяющей воспроизводить без искажений акустический сигнал на электрической стороне (в приемниках), добротность излучателей должна быть невелика (≤ 10) [6]. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что добротность прямоточных жидкоструйных преобразователей позволяет эффективно использовать их в качестве элементов гидроакустических излучающих антенн.

ПЕРЕДАЧА ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОСТРУЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Анализ акустических свойств жидкоструйных преобразователей [12...16] позволил разработать новый способ передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи. На рис.4 представлена схема устройства передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции в гидроакустический канал связи.

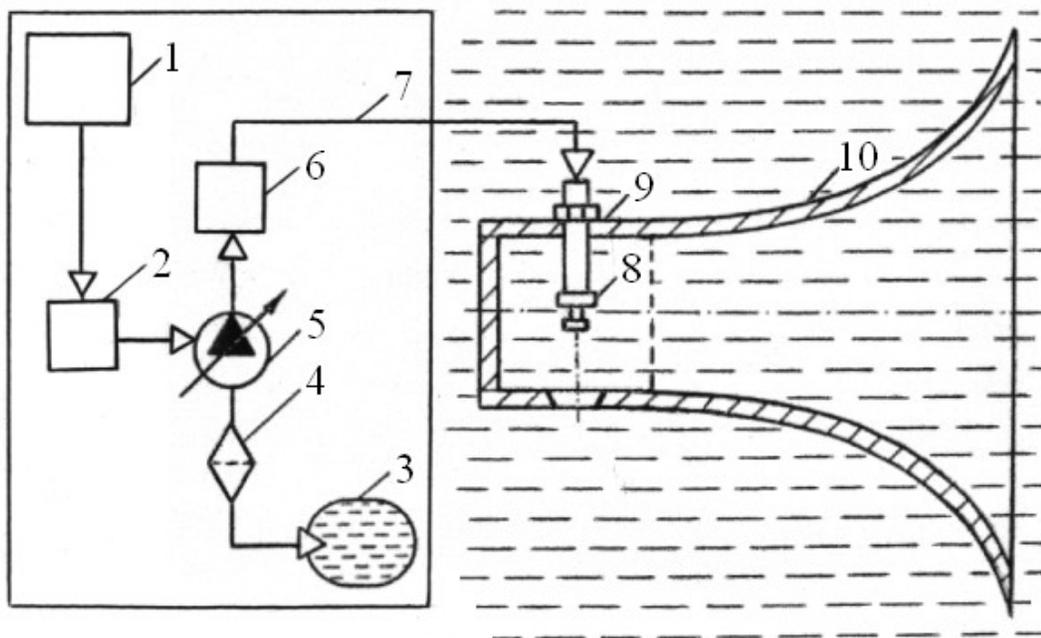


Рисунок 4 – Схема устройства для передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи

Передающий тракт состоит из персонального компьютера 1, исполнительного механизма 2 для регулирования расхода рабочей жидкости, емкости 3 с морской водой, фильтра 4; насоса 5; датчика расхода 6 рабочей жидкости; трубопровода 7. Компьютер 1, исполнительный механизм 2, емкость 3, фильтр 4, насос 5, датчик расхода 6 находятся на подводной лодке или на стационарной гидроакустической станции. Для работы насоса 5 можно также использовать забортную морскую воду. По трубопроводу 7 рабочая жидкость поступает в прямоточный жидкоструйный преобразователь 8, который установлен внутри предрупорной камеры 9 рупорной антенны 10 [17]. С учетом агрессивных свойств морской воды все конструктивные элементы гидроакустической антенны изготавливаются из нержавеющей стали, например, X18H10T.

Расположение преобразователя 8 на расстоянии равном четверти длины волны основного тона акустического сигнала от фланца предрупорной камеры 9, позволяет сформировать в осевом направлении рупорной антенны плоскую волну. При этом на оси горла рупора 10 величина звукового давления, регистрируемого с помощью гидрофона, возрастает в несколько раз по сравнению с величиной звукового давления на том же расстоянии от преобразователя 8 в случае генерирования им сигнала в свободной среде. С целью формирования характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости в разработанной антенне используется катеноидальный рупор. Достоинствами катеноидального рупора являются: плавное сопряжение рупора с предрупорной камерой и эффективное излучение сигнала в низкочастотной области звукового диапазона [17].

Способ передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции осуществляют следующим образом. При подключении электропитания центральный процессор персонального компьютера 1 выполняет специально разработанную программу, управляющую исполнительным механизмом 2. Исполнительный механизм 2 включает насос 5 и устанавливает величину расхода рабочей жидкости, соответствующую оптимальной скорости истечения струи

жидкоструйного преобразователя 8 [13]. В этом случае преобразователь 8 генерирует тональный звуковой сигнал, состоящий из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы [14]. Уровень генерируемого акустического сигнала зависит от режима истечения струи, геометрических параметров преобразователя и величины гидростатического давления на заданной глубине [4, 13...15]. Затем выполняется считывание передаваемого кодированного информационного сигнала (рис. 5, а) с носителя информации персонального компьютера 1.

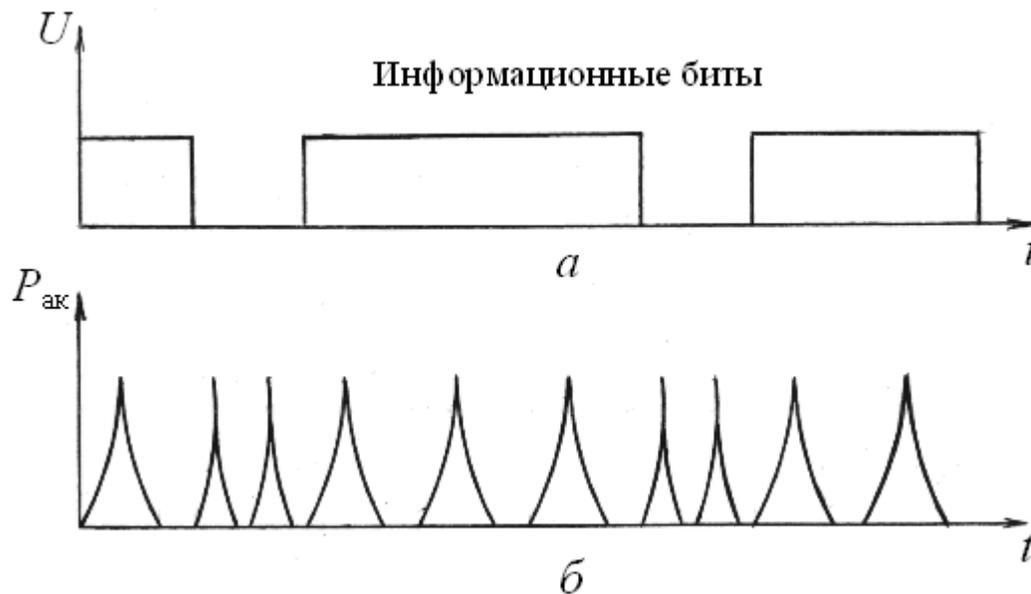


Рисунок 5 – Временные диаграммы, иллюстрирующие превращение сигналов в условиях частотно-импульсной модуляции: а) модулирующий электрический сигнал, б) модулированный акустический сигнал

Манипуляция несущей частоты звукового сигнала реализуется путем регулирования оптимальной скорости струи за счет программируемого управления центральным процессором работой исполнительного механизма 2. Таким образом, несущая частота звукового импульсного сигнала жидкоструйного преобразователя 8, согласно программе, модулируется передаваемым дискретным информационным сигналом. В результате генерируемый акустический сигнал превращается в комбинацию импульсных последовательностей с разными звуковыми частотами, одна из которых соответствует уровню логического "нуля", а вторая соответствует уровню логической "единицы" в фиксированные интервалы времени (рис. 5, б). При этом рупорная антенна 10 выполняет направленное в горизонтальной плоскости излучение модулированного звукового сигнала в гидроакустический канал связи.

На приемной стороне акустические сигналы, с помощью гидрофонов, принимают из канала связи, преобразуют их в электрические сигналы и измеряют периоды импульсных последовательностей этих сигналов в четко определенные интервалы времени. Далее осуществляют идентификацию единиц и нулей кодовой комбинации, передаваемой в канале связи, и записывают принятую информацию на носитель приемной аппаратуры. Конечный этап обработки включает в себя декодирование и представление информационного сообщения в удобном для слухового или зрительного восприятия виде.

Испытание способа передачи дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции проводилось в гидроакустическом бассейне. Исходными данными служили: скорость звука в водной среде $c = 1500 \text{ м/с}$, волновое сопротивление среды $(\rho c)_в = 1.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, избыточное статическое давление $\Delta P_{\text{СТ}} = 5 \text{ кПа}$. Геометрические параметры прямооточного преобразователя принимали следующие значения: средний диаметр кольцевого сопла $D_c = 13,0 \text{ мм}$, ширина щели сопла $h = 0,5 \text{ мм}$ (рис. 1,а). При оптимальной скорости струи $V_{\text{ОПТ}} = 30,8 \text{ м/с}$ (расход $Q_{\text{ОПТ}} = 0,63 \text{ л/с}$) преобразователь генерировал импульсный звуковой сигнал с частотой основного тона $f_1 = 870 \text{ Гц}$. Манипуляция несущей частоты звукового сигнала производилась за счет незначительного уменьшения оптимальной скорости струи. В этом случае значение частоты основного тона сигнала изменяется обратно пропорционально скорости истечения затопленной струи из сопла преобразователя [13]. При скорости струи $V = 29,4 \text{ м/с}$ (расход $Q = 0,60 \text{ л/с}$) частота импульсного сигнала принимала значение $f_2 = 900 \text{ Гц}$. Испытание звукоподводной связи показало, что девиация частоты $\Delta f = 30 \text{ Гц}$ позволяет передавать дискретную информацию со скоростью 15 – 20 слов/мин.

Достоинством разработанного способа является то, что частотно-импульсная модуляция акустического сигнала обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с модуляцией непрерывной синусоидальной несущей частоты [18]. К достоинствам способа следует также отнести: возможность эффективной передачи дискретной информации в широком диапазоне избыточных статических давлений (на глубине от 10 м до 240 м); достаточно высокий уровень генерируемого акустического сигнала (интенсивность звука в горле рупорной антенны может принимать значение от 2 Вт/см^2 до 98 Вт/см^2); низкочастотный рабочий диапазон тонального импульсного сигнала (от 300 Гц до 9 кГц) [4, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены особенности передачи информации в гидроакустическом канале связи. Проведен анализ акустических свойств прямооточных жидкоструйных преобразователей. Зона звукообразования жидкоструйного преобразователя представляет собой своеобразную резонансную систему, состоящую из внутренней кавитирующей среды, упругой струйной оболочки и присоединенной массы жидкости. Эта резонансная система обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая струйной оболочке стабильную частоту автоколебаний. Генерируемый тональный звуковой сигнал состоит из последовательности отдельных коротких импульсов экспоненциальной формы с разной крутизной переднего и заднего фронтов. Динамика струйной оболочки определяет АЧХ жидкоструйных преобразователей. Добротность жидкоструйных преобразователей ($Q = 4 \dots 12$) позволит без искажений воспроизводить акустический сигнал в приемном тракте звукоподводной связи. Проведенные исследования позволили разработать новый способ передачи дискретной информации в гидроакустический канал связи с помощью рупорных антенн на основе жидкоструйных преобразователей. Передача дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции обеспечивает повышение помехоустойчивости звукоподводной связи. Разработанный способ может быть использован при передаче дискретной информации в подводный звуковой канал, что позволит увеличить дальность действия передающей аппаратуры за счет использования низких частот.

Литература

1. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики / Роберт Дж. Урик. Л. : Судостроение, 1978. – 448 с.
2. Митько В.Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения / В. Б. Митько, А. П. Евтютов, С. Е. Гущин. – Л. : Судостроение, 1982. – 200 с.
3. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика / Г.М. Свердлин. – Л. : Судостроение, 1990. – 320 с.
4. Сухарьков О.В. Оптимизация параметров прямогочного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О.В. Сухарьков // Акуст. вісник. – 2008. – 11, № 4. – С. 54 – 63.
5. Сухарьков О.В. Жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – №1. – С. 102 – 108.
6. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / [науч. ред. Голямина И.П. и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
7. Кебкал К.Г. Количественные и качественные различия характеристик радио- и гидроакустического каналов связи / К.Г. Кебкал // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – 4, № 12. – С. 198 – 205.
8. Kebkal A.G. Data-link Protocol for Underwater Acoustic Networks [Електронний ресурс]: IEEE Conference Proceedings OCEANS 2005 Europe / A.G. Kebkal, K.G. Kebkal, M. Komar – 80 Min / 700 MB. – Publisher: Pis-cataway, NJ, USA: IEEE Operations Centre, 2005.
9. Kilfoyle D. B. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry / D.B. Kilfoyle, A.B. Baggeroer // IEEE J. Ocean. Eng. – Piscataway, NJ, USA: Operations Centre, 2000. – Vol. 25, No. 1. – P. 4-27.
10. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря / М.М. Дивизинюк. – Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАН Украины, 1998. - 351 с.
11. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с.
12. Вовк И. В. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, Ю. М. Дудзинский // Акустичний вісник. – 2008. – 11, № 2. – С. 16 – 23.
13. Сухарьков О.В. Влияние скорости струи на акустические характеристики осесимметричного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. – №2. – С. 78–84.
14. Сухарьков О.В. Экспериментальное исследование акустического поля прямогочного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2007. – №1. – С. 39–44.
15. Сухарьков О.В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямогочного гидродинамического излучателя / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – №1. – С. 70 – 77.
16. Дудзінський Ю.М. Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою / Ю.М. Дудзінський, О.В. Сухарьков // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2007. – 50, № 2. – С. 129 – 134.
17. Пат. 58117 Україна, МПК' Н04R 1/00, Н04В 13/00. Гідроакустична антена / Сухарьков О.В.; заявник і патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова. – № и 201015826; заявл. 28.12.10, опубл. 25.03.11, Бюл. № 6.
18. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. / Е.И. Манаев. – М. : Радио и связь, 1990. – 512 с.