

# Цифровой гидроакустический приемник

Б.В. Кияшко, П.И. Коротин, А.С. Чашин, А.В. Харитонов, Институт Прикладной физики РАН, г. Н.Новгород  
Научно-технический центр «Мониторинг», г. Н.Новгород

Потребители датчиков для измерения физических величин постоянно выдвигают все новые и более жесткие требования к разрабатываемым изделиям. Потребитель хочет получать точные и в то же время малогабаритные, многофункциональные, легкоподключаемые и долгоживущие датчики. Для интеграции новых типов датчиков в измерительные системы особое внимание при проектировании приходится уделять унификации интерфейсов. В результате этого сегодня мы видим все большее количество датчиков, в которых совмещены элементы, как аналогового устройства, так и цифрового. При этом цифровое устройство часто выполняет не только роль стандартного интерфейса, идентификатора типа, памяти для хранения номера и чувствительности, но и обработки сигнала. Такие датчики в литературе называются интеллектуальными.

Функция предварительной обработки сигнала принципиально важна при измерении динамических процессов, особенно в ситуациях, когда нужно передать информацию на большое расстояние со значительного числа контрольных точек. Встроенный в датчик сигнальный процессор в состоянии решить подавляющее большинство задач обработки сигнала, тем более, что чаще всего нужна не сама реализация сигнала, а только определенный диагностический признак или параметр.

В данной работе представлен цифровой гидрофон, соответствующий идеологии интеллектуального датчика, на примере которого продемонстрированы преимущества данного типа приборов. Цифровой гидроакустический приемник (ЦГП) внесен в Государственный реестр средств измерений (№28067 ЦГП-3 с 16-ти разрядным АЦП и №33564 ЦГП-4 с 24-х разрядным) и предназначен для измерения акустического давления в водной среде. Конструктивное решение предусматривает возможность собирать из ЦГП кабельные антенны, которые, в частности, пригодны для морской сейсмоакустической разведки. Контроллер ЦГП сертифицирован как отдельное устройство (Блок Анализа Сигналов – БАС, №33576), которое можно использовать в комплекте со стандартными первичными преобразователями, например пьезоакселерометрами, для формирования измерительных комплексов с цифровым распределенным сбором данных.

Представим типовую обобщенную схему интеллектуального датчика (рис.1).

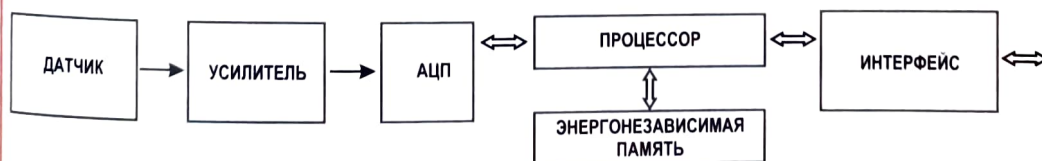


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального датчика

Датчик включает в себя следующие элементы:

- первичный преобразователь измеряемой величины в электрическую;

- предварительный усилитель, который является как согласующим, так и нормирующим элементом;

- аналого-цифровой преобразователь для преобразования сигнала в цифровой вид;

- микропроцессор, выполняющий функции обработки и управления;

- энергонезависимую память для хранения конфигурации датчика и, при необходимости, загружаемых программ и отрезков сигнала;

- интерфейс, соединяющий датчик с информационной или измерительной системой.

Сегодня можно выделить две ступени в развитии интеллектуальных датчиков и тем самым провести некую классификацию их "интеллектуальности".

Предприятия используют для управления производством, как правило, набор разнотипных сетей, поэтому наиболее правильным решением является использование датчиков в режиме автоконфигурирования. Сеть сама идентифицирует, какого типа датчик был подключен, какие из его данных доступны, каковы размерности входных и выходных данных (кубические метры в секунду, градусы Кельвина, Паскали, и т.д.), какова спецификационная точность устройства (например,  $\pm 2^\circ\text{C}$ ) и прочую информацию, касающуюся датчика или исполнительного устройства. Такой прием исключает необходимость выполнения программных шагов по конфигурированию сети при замене или добавлении датчика в систему, реализуя тем самым работу в режиме "установка и работа" вне зависимости от типа сети. Этим ограничивается «интеллектуальность» данного типа датчиков.

Между тем для многих применений важным является непрерывный анализ данных с ансамбля измерителей. Общий объем анализируемых данных получается большим и для того, чтобы разгрузить линии передачи, в датчик встраивается сигнальный процессор, который проводит предварительную обработку (дискретизацию, усреднение, фильтрацию, спектрально-корреляционный анализ и другие операции). В зависимости от конкретной задачи в датчик может быть загружена любая программа по обработке. После обработки данные передаются в центральный компьютер. Структура системы с данного типа датчиками показана на рис.2.

И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ...  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Микропроцессорные устройства, встроенные в датчик, в этой системе являются контроллерами нижнего уровня. Каждый из них имеет свой идентификационный номер со своей программой. Вся первичная обработка распределена по нижнему уровню, и только готовый результат передаётся контроллеру среднего уровня. Контроллер среднего уровня выполняет несколько функций: маршрутизатора и преобразователя (конвертера) протоколов; локальной диагностики каналов связи с контроллерами датчиков; автономного сбора и накопления данных. Конечная обработка, отображение полученных результатов, организация сетевого обмена, отработка алгоритмов принятия решений и другие задачи возлагаются на управляющую ЭВМ.

Миниатюризация, снижение стоимости микросхем и рост их функциональных возможностей позволяют встраивать чипы во все меньшие по размерам и разнотипные изделия. Преимущества этого очевидны: распределение вычислительных ресурсов повышает надежность системы в целом; перепрограммирование режима работы

и диагностика проводится без демонтажа; совокупность датчиков разного типа размещается на обычной двухпроводной линии без многочисленных экранированных кабелей и дорогих разъемов. Выполнение запрограммированных операций с сигналом (фильтрация, гетеродинирование, детектирование, обнаружение сигнала заданной формы, превышение порога и др.) на несколько порядков разгружает поток передаваемых от датчика данных и устраняет влияние шумов. Цифровой вид передачи устраняет наводки, гарантирует заданный динамический диапазон, унифицирует кабели связи и интерфейс, делает систему легко расширяемой по числу каналов.

Создание цифрового гидрофона и цифровой гидроакустической антенны на их базе – заметный шаг на пути совершенствования приемных гидроакустических систем. Миниатюризация электронных компонент позволила реализовать процессорное устройство, встроенное в гидрофон, которое в состоянии выполнять практически любую обработку сигнала.

Внешний вид цифрового гидрофона и кабель-



а)



б)

Рис. 3. Внешний вид ЦГП: а – одиночный гидрофон; б – многоэлементная приемная система из ЦГП.

ной антенны из ЦГП представлен на рис. 3.

Сформулируем основные преимущества характерные именно для цифровой антенны:

- возможность когерентной обработки сигнала;
- возможность параллельного выполнения нескольких задач;
- полное отсутствие межканальных связей;
- простота увеличения апертуры антенны;
- использование тонкого антенного кабеля, снижающего гидродинамическое сопротивление и вес антенны.

Цифровой гидрофон предназначен для непосредственного измерения звукового давления в водной среде в диапазоне частот от 5,0 Гц до 10,0 кГц. На выходе отдельного гидрофона или антенны может быть получена не только оцифрованная временная реализация сигнала, но и произвольная его функция, например, текущий третьоктавный спектр.

Принцип действия ЦГП, как и обычного гидрофона, основан на применении прямого пьезоэлектрического эффекта пьезокерамического материала, заключающегося в преобразовании действующего на них звукового (акустического) давления в электрический сигнал. Пьезокерамический элемент гидрофона конструктивно



Рис. 4. Пьезокерамический чувствительный элемент.

состоит из двух частей, соединенных последовательно между собой (см. рис.4).

Чувствительный элемент собран по дифференциальной схеме, что уменьшает синфазную электрическую помеху на 50 Гц примерно на 80 дБ. Общая точка пьезокерамических цилиндров заземлена, а с крайних снимается дифференциальный сигнал и подается на предварительный усилитель. Предварительный усилитель и микроконтроллер смонтированы на одной плате (рис.5).

Частота квантования АЦП может быть задана от внешнего источника либо от собственного кварца. Частота квантования, как от внешнего источника, так и от процессора гидрофона перестраивается в пределах от 100 Гц до 64 кГц. Цифровой гидрофон реализован на сигнальном процессоре типа ADSP2185N. Сигнальный процессор программируется и передает данные через последовательный канал стандарта RS-485. Для хранения программ и параметров применяется перепрограммируемое Flash ПЗУ емкостью 128 кБт. Перепрограммирование доступно в реальном времени в динамическом режиме со стороны центрального компьютера.



Рис. 5. Электронная плата цифрового гидрофона.

В многоэлементной приемной системе максимальное количество гидрофонов на одном канале связи - 256. Последовательный канал может быть синхронным и асинхронным. В синхронном режиме используются 3 витые пары для приема сигналов синхронизации, приема и передачи данных и цикловой синхронизации. Для реализации синхронного режима необходимо иметь на удаленном конце кабеля специализированный блок сбора цифровых данных - БВС-Ц. В синхронном режиме скорость передачи данных до 20 Мбит/с. В асинхронном режиме также используется RS-485, но протокол обмена данными - со стартовым и стоповым битами. В асинхронном режиме с полудуплексной передачей используется только одна витая пара, при этом в качестве сопряжения можно использовать стандартные вычислительные средства, имеющие в своем составе порт RS-485, или же цифровой гидрофон подключается к компьютеру через стандартные преобразователи RS-485/RS-232, RS-485/USB. Скорость передачи при этом ограничена параметрами канала связи и не превышает 3 Мбит/с. Удаление гидрофона от компьютера определяется стандартом протокола RS-485.

Процессорное ядро и периферийные цифровые схемы питаются от импульсных источников питания с КПД - 94%. Цифровые и аналоговые цепи АЦП для уменьшения помех питаются раздельно от 2-х каскадных линейных стабилизаторов.

Цифровой гидрофон ЦГП-4 имеет следующие характеристики:

- рабочий диапазон частот - 5 - 10000 Гц;
- максимальное гидростатическое давление - 4,5 МПа;
- максимальное измеряемое звуковое давление - 145 дБ отн.20 мкПа;
- уровень собственных шумов на более 40 дБ отн.20 мкПа;
- номинальная чувствительность -  $20 \pm 10$  мВ/Па;
- неравномерность АЧХ - не более 3 дБ;
- неравномерность угловой характеристики - не более 2 дБ;
- неидентичность ФЧХ различных образцов - не более 5 градусов;
- уровень нелинейных искажений - не более -80 дБ;
- масса - 0,12 кг;
- потребление не более 0,12 Вт;
- габаритные размеры (мм) -  $\varnothing 30 \times 130$ ;
- средняя наработка на отказ - не менее 1250 тыс. часов;
- климатическое исполнение - группа УХЛ 2,7;
- используемый антенный кабель имеет четыре витые пары 5-ой категории в общем экране и внутренний несущий трос из кевлара;
- усилие на разрыв антенного кабеля - 100 кг определяется заделкой гидрофонов. Для растяжки антенны при донной постановке в

# И СНОВА О СЕЙСМОПРИЕМНИКАХ... ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



а)



б)

Рис. 6. Рабочие эталоны: а – установка СК-10,6 – установка СБ-1.

горизонтальном направлении применяется несущий трос, например из кевлара:

-материал, применяемый в настоящее время для оболочки антенного кабеля - ПВХ марки «О 55».

Для метрологического обеспечения ЦГП как средства измерений разработаны и аттестованы рабочие эталоны второго разряда: установки СК-10 (камера малого объема для калибровки под рабочим давлением для диапазона частот 5 Гц – 2500 Гц) и СБ-1 (для работы в бассейне в диапазоне частот 2 кГц – 10 кГц) – см. фото на рис.6.

Питание отдельных гидрофонов может осуществляться непосредственно с разъема порта USB на компьютере. Таким образом, для использования отдельного гидрофона или антенны с количеством гидрофонов до 8-ми ничего кроме стандартного компьютера и программы (входящей в комплект поставки) не надо. Для антенны с большим количеством элементов необходим отдельный источник питания.

Удаление одиночного гидрофона от компьютера может достигать 300 метров. Для антенны удаление блока БВС-Ц от компьютера ограниче-

но протоколами порта USB2.0 или Ethernet, используемыми для передачи данных.

В заключение работы приведем примеры использования цифровой антенны в гидроакустических задачах. Основное преимущество, которое дает антенна при измерениях подводного шума, состоит в возможности фокусировки на контролируемый объект, что означает получение выигрыша в отношении сигнал/шум. На рис.7 показан пример результатов наблюдения гидроакустического поля при проходе небольшого судна над установленной на дне 48-ми элементной горизонтальной антенной с апертурой 100 метров.

На рис.8 хорошо видна когерентная интерференционная структура акустического поля, формирующаяся в мелком море (глубина около 80 метров). Легко проследить по проходной характеристике для узкополосной составляющей поля излучения судна и выигрыш от фокусировки антенны: уровень помех понижается на 18...20 дБ, вследствие чего наблюдается максимум в момент нахождения судна над антенной. Это означает, что антенна делает возможным измерение поле излучения судна, которое невозможно одиночным гидрофоном.

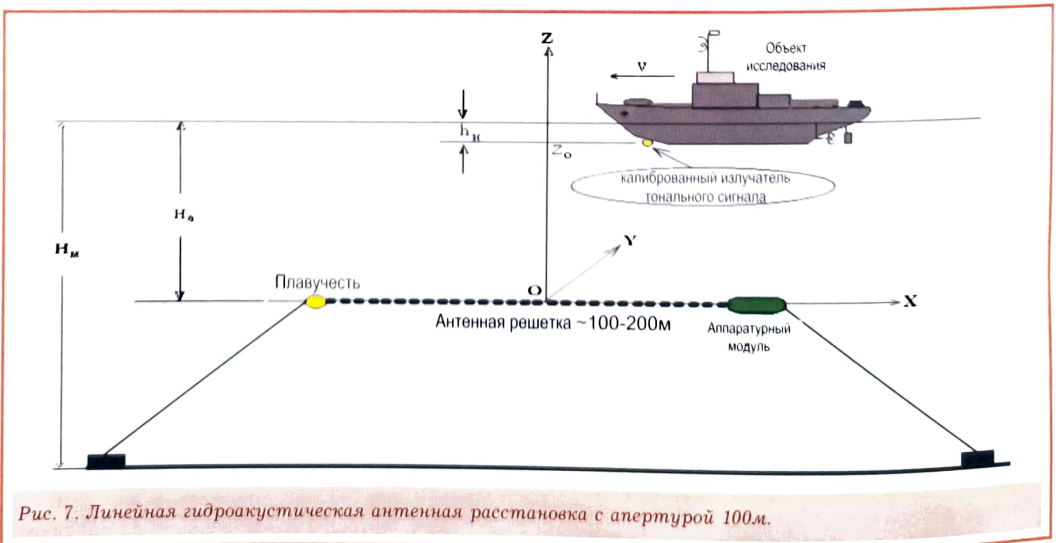
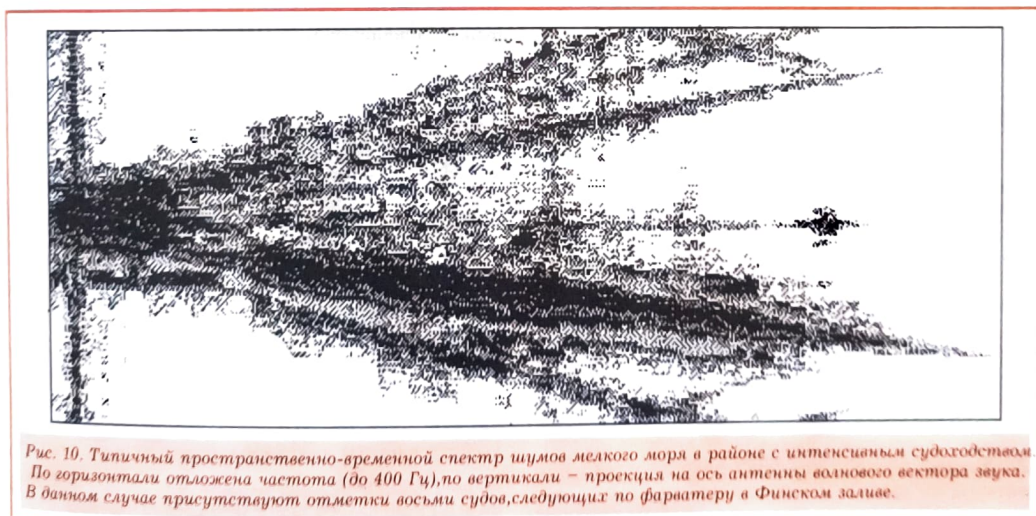
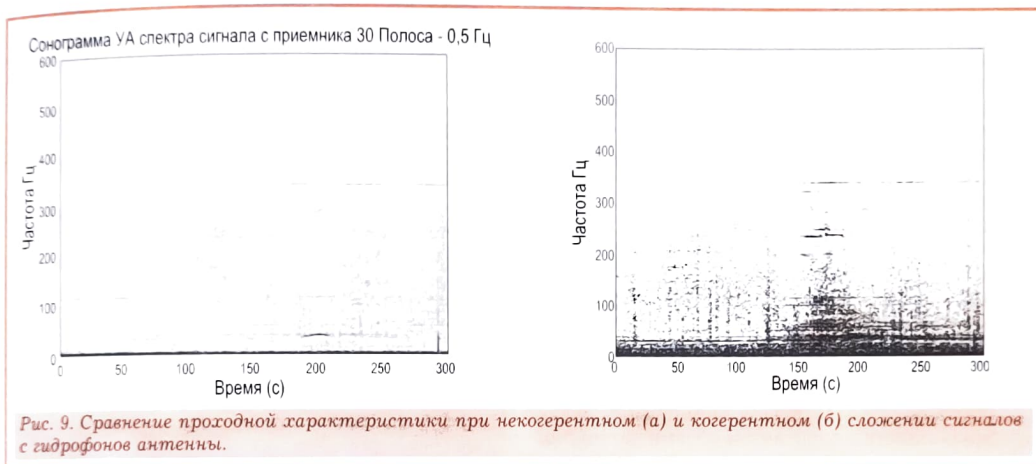
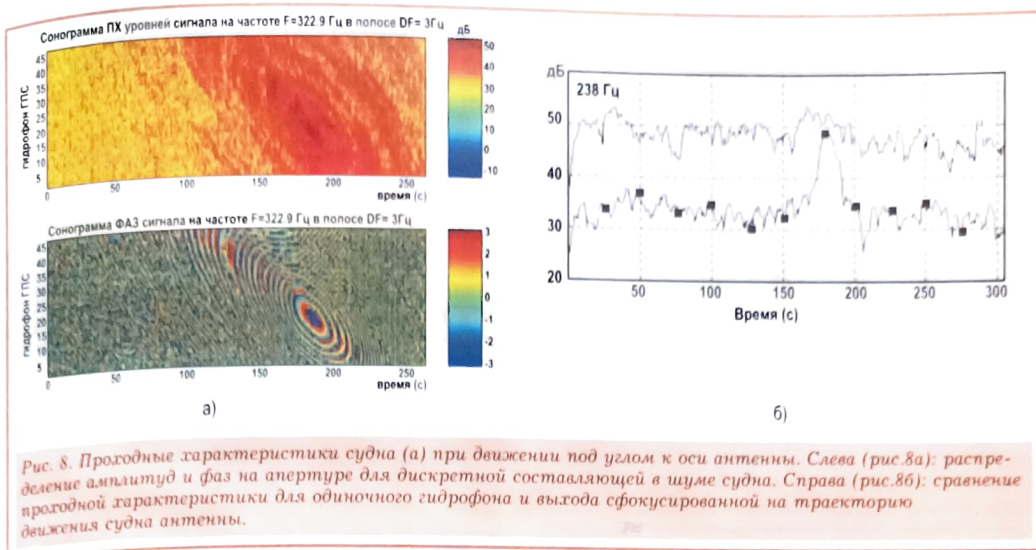


Рис. 7. Линейная гидроакустическая антенная расстановка с апертурой 100м.



На рис.9 для того же галса показан эффект от использования фокусировки антенны в широкой полосе на объект в ближней зоне антенны.

Таким образом, эффективность фокусировки линейной антенны в ближней зоне антенны оказывается достаточной для измерения гидроакустического поля судна в широком диапазоне частот при высоком уровне помех моря.

Линейная антенна, установленная по схеме

рис.7, может быть использована для наблюдения за несколькими судами, находящимися в ее дальнем поле. Сигнал каждого судна может быть выделен и проанализирован.

На рис.8 представлена ситуация, характерная для Финского залива Балтийского моря: горизонтальная антенна установлена недалеко (порядка 5-ти миль) от фарватера по которому движутся грузовые суда