

УДК 681.883

МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭХОЛОТ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

© О.С.Голод, К.П. Львов, 2009

Государственный Северо-Западный технический университет, г. Санкт-Петербург

ОАО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург

У цей час можлива практична реалізація електронної апаратної частини багатопроменевого ехолоту. Проектування й виготовлення друкованих плат з ІС аналогових підсилювачів, ІС АЦП, СБІС 1288ХК1Т, БІС контролера 1892ВМ3Т, ІС ЦАП і ІС "об'язки" доступні цілому ряду підприємств, наприклад, ФДУП НДІ "Субмікрон" (Москва, Зеленоград). Розробка в реальному масштабі часу програмного забезпечення може починатися на налагоджуваних комплектах СБІС 1288ХК1Т, БІС контролера 1892ВМ3Т.

В настоящее время возможна практическая реализация электронной аппаратной части МЛЭ. Проектирование и изготовление печатных плат с ИС аналоговых усилителей, ИС АЦП, СБИС 1288ХК1Т, БИС контроллера 1892ВМ3Т, ИС ЦАП и ИС "обязки" доступна целому ряду предприятий, например, ФГУП НИИ "Субмикрон" (Москва, Зеленоград). Разработка в реальном масштабе времени программного обеспечения может начинаться на отладочных комплектах СБИС 1288ХК1Т, БИС контроллера 1892ВМ3Т.

At present it is possible the practical realization of electronic hardware of multibeam echosounder (МВЕ). Design and manufacture of printed circuit boards with analog amplifiers integrated circuits, IC ADC, VLSIC 1288ХК1Т, LSI controller 1892ВМ3Т, IC DAC and IC "binding" is available for a variety of businesses, for example, Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute "Submicron" (Moscow, Zelenograd). Development of real-time software can begin on debug packages VLSIC 1288ХК1Т, LSI controller 1892ВМ3Т.

МЛЭ, ВЕЕР ЛУЧЕЙ, СФХН, БПФ, ТОНАЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ, ЛЧМ СИГНАЛЫ, КВАДРАТУРНЫЙ СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР, ИС AD9271, СБИС 1288ХК1Т, БИС КОНТРОЛЛЕРА МС-0428, ПЭВМ.

Съемка морского дна всегда была важна для всех прибрежных регионов. Используемая вначале для обеспечения безопасности навигации, съемка дна теперь является важным компонентом как навигации, так и позиционирования прибрежных инженерных сооружений, таких как нефтяные платформы, нефтепроводы и газопроводы. При съемке используются результаты батиметрии - измерений глубины в океанах, морях и озерах. Изначально для измерения глубин использовались лотлины, затем - однолучевые эхолоты, в настоящее время - многолучевые эхолоты, а также известные гидролокаторы.

Главная проблема батиметрической съемки состоит в достижении хорошей разрешающей способности при сохранении точности позиционирования элементов дна. Кроме этого, важным является снижение стоимости промеров, что подразумевает съемку максимально широкой полосы бокового обзора. Как и в большинстве приложений, связанных с обработкой сигналов, существует проблема оптимального решения нескольких задач. Для батиметрических гидролокаторов - это проблема выбора между величиной полосы бокового обзора, точностью и разрешающей способностью. В настоящий момент основными являются батиметрические гидролокаторы двух типов - гидролокаторы бокового обзора и многолучевые эхолоты.

Многолучевые эхолоты (МЛЭ) часто имеют меньшую пространственную разрешающую способность (определяемую шириной характеристики направленности (ХН)), меньшие (но все же широкие) величины участков обзора, однако имеют большую, чем у ГБО, точность определения координат батиметрических промеров. МЛЭ предпочтительнее

использовать при обзоре неровного морского дна, напр., при навигации вдоль подводного каньона, трубопровода или кабеля. В этих условиях только МЛЭ может вычислить достоверные положения всех особенностей дна, формирующих эхо-сигналы, в каждый момент времени. Поскольку МЛЭ имеют разрешающую способность, меньшую по сравнению с ГБО, ее повышение для МЛЭ является важной задачей.

В большинстве случаев для формирования многолучевой ХН применяется метод преобразований Фурье. Этот метод может эффективно работать при использовании быстрых алгоритмов преобразований Фурье, однако не позволяет различать синхронные эхо-сигналы от близко расположенных источников.

С целью улучшения результатов батиметрической съемки МЛЭ используют несколько методов формирования ХН, обеспечивающих высокую разрешающую способность. Среди них выделяются спектральные и параметрические методы.

В спектральных методах вычисляются спектры по всем возможным углам приходящих волн (это ключевой параметр для батиметрических гидролокаторов), а углы, отвечающие максимумам спектра, считаются направлениями прихода волн.

В параметрических методах необходим одновременный поиск всех ключевых параметров (т.е. направлений прихода эхо-сигналов), что сопровождается увеличением сложности вычислений. Однако для однородных линейных антенных решеток увеличения сложности вычислений можно избежать без потери эффективности методов.

Назначение, принцип действия и устройство многолучевых эхолотов (МЛЭ) описано в [1-4]. Основное назначение МЛЭ – получение данных о глубине в некоторой полосе обзора, которая сканируется веером узких акустических лучей, расположенных в поперечной плоскости судна. Ширина раствора акустического луча $(1-3)^\circ$, количество лучей может достигать в промышленных моделях нескольких сотен. Рабочие частоты от 10 кГц до (200-400) кГц. Ряд промышленных моделей имеет Т-образную передающую и приемную антенные решетки. Передающая антенная решетка озвучивает узкую полосу дна перпендикулярно проекции курса судна (подводного аппарата). Приемная антенна представляет собой плоскую эквидистантную линейную решетку. Общее число преобразователей может быть около 100 и число групп N несколько десятков. Например, приемная решетка МЛЭ “ЕСОНOS-15” (измеряемая глубина до 6000 м) состоит из 108 преобразователей, которые объединены в группы $N = 36$ по три преобразователя, расстояние между группами $l = 0.688\lambda$, рабочая частота 12 кГц. Размеры Т-образной передающей и приемной антенных решеток примерно 3500X2200 мм. Подобная антенна МЛЭ SeaBat 8160 (измеряемая глубина до 3000 м) имеет размеры примерно 1470x1100 мм при рабочей частоте 50 кГц. Некоторые модели МЛЭ используют совмещенные приемопередающие плоские антенные решетки. Например, решетка МЛЭ НТП «Реаконт» (измеряемая глубина до 150 м) имеет число групп $N = 16$ по четыре преобразователя в группе, частота 155 кГц. В макете МЛЭ ИРЭ РАН [17] (измерения проводились при глубинах не более 3300 м) используется антенна по схеме «Крест Миллса» с $N = 32$, несущая частота 30 кГц. Все упомянутые МЛЭ излучают тональные сигналы, кроме макета МЛЭ ИРЭ РАН с ЛЧМ излучаемыми сигналами.

С учетом параметров движения судна (курс, крен, дифферент, вертикальные перемещения) и распределения скорости звука по глубине обследуемой акватории в результате каждого сканирования получается набор данных по глубинам акватории по линии, перпендикулярной траектории движения судна. Ширина области зондирования, как

правило, кратна глубине (обычно составляет от 3 до 7 глубин). Обязательным дополнением к самому многолучевому эхолоту являются: навигационное оборудование для определения точных координат судна-носителя, система определения параметров движения судна (гироскопас, крен-дифферент, датчик вертикальных перемещений), датчик определения вертикального распределения скорости звука в воде (STD-зонд). Как правило, стоимость дополнительного оборудования составляет значительную часть стоимости самого многолучевого эхолота.

Применение многолучевых эхолотов в океанографических и нефте-газопроисследовательских исследованиях на больших и средних глубинах началось достаточно давно (с середины 80-х годов). Применение данной технологии на мелководных водоемах стало возможным только после существенного увеличения производительности вычислительных комплексов. Это связано с тем, что при работах на малых глубинах для обеспечения полного покрытия дна акватории требуется существенное увеличение числа посылок в единицу времени, что, в свою очередь, вызывает значительное увеличение объема обрабатываемой информации.

Выходные сигналы каждой группы преобразователей поступают на входы усилителей с временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ) и далее с помощью схем формирования характеристик направленности (СФХН) образуется веер узких акустических лучей в поперечной плоскости судна.

Использование комплексных огибающих усиленных выходных сигналов N групп гидрофонов приемной антенной решетки позволяет использовать следующий математический аппарат СФХН: необходимый фазовый сдвиг сигнала i группы преобразователей для приема плоской монохроматической волны под углом θ между фронтом волны и плоскостью решетки равен, [2]

$$\Phi_i = 2\pi i \frac{l}{\lambda} \sin \theta.$$

Выходной сигнал СФХН для приема под углом θ равен

$$z(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) \exp(j\Phi_i),$$

где $s_i(t)$ - комплексная огибающая усиленного выходного сигнала i группы преобразователей.

Количество формируемых акустических лучей определяется числом групп преобразователей N . Ширина раствора акустического луча $\Delta\theta$ для $\theta = 0$ на уровне 3 дБ равна

$$\Delta\theta \cong 2 \arcsin[0.44 / (N(l/\lambda))].$$

Например, для приемной решетки МЛЭ "ЕСОНOS-15" $\Delta\theta = 2.04^\circ$. Если уменьшить число групп N при условии неизменности расстояния между группами l , то величина $\Delta\theta$ увеличивается и, например, при $N = 16$ ширина раствора акустического луча $\Delta\theta = 4.58^\circ$.

Количество формируемых лучей определяется величинами $\Delta\theta$ и сектором обзора $(40 - 60)^\circ$. Например, для приемной решетки МЛЭ “ЕСОНОС-15” аппаратурой приемного тракта формируется 15 лучей. В работе [9] рекомендуется выбирать шаг между лучами около $0.25\Delta\theta$ и сектор обзора не более 90° , поскольку на краях сектора обзора ширина луча существенно увеличивается, что снижает достоверность получаемых результатов промера. Приводимые в рекламных материалах секторы обзора 180 градусов, при использовании плоской антенны типа «крест Миллса», физически не осуществимы.

В настоящее время в МЛЭ находит применение СФХН в частотной области на основе алгоритма БПФ [3]. Там же обсуждаются результаты применения в спектральном оценивании метода авторегрессионной аппроксимации, который алгоритмически гораздо более сложен и требует более производительных сигнальных процессоров. В таком случае может использоваться микросхема MC-0428 («Мультифорс»).

Рассмотрим в общем виде построение приемного тракта МЛЭ на основе СБИС 1288ХК1Т с числом групп преобразователей $N = 16(32)$. Для конкретизации дальнейшего рассмотрения можно принять частоту излучения 50 кГц как, например, в МЛЭ SeaBat 8160.

В настоящее время коммерчески доступна гибридная (аналого-цифровая) микросхема AD9271, представляющая собой 8-канальную сигнальную цепь (рис. 1). Каждый канал состоит из маломощного усилителя (LNA), усилителя с переменным коэффициентом усиления (VGA), аналогового фильтра (AAF) и аналого-цифрового преобразователя (ADC). Динамический диапазон микросхемы 88 дБ, имеется возможность реализации ВАРУ. Частота дискретизации задается внешним источником. Корпус микросхемы TQFP-208, 100 выводов, 14x14x1.2 мм. Для настроечно-регулирующих работ с микросхемой имеется отладочный набор (Evaluation Board). Подробные сведения и примеры использования микросхемы можно найти на сайте www.analog.com.

Необходимое количество микросхем AD9271 определяется значением N , т.е. 2 ($N = 16$) или 4 ($N = 32$) микросхемы. Приемлемой будет частота дискретизации $f_s = 512$ кГц.

В случае $N = 16$ необходимо четыре СБИС 1288ХК1Т. Возможное соединение СБИС с контроллером 1892ВМ3Т (МС-12) через параллельный порт представлено на рис. 2. Обозначения на рис. 2 соответствуют принятым в документации на указанные микросхемы. Возможно использование в качестве контроллера сигнального микропроцессора для встраиваемых применений с особенно высокой производительностью MC-0428 («Мультифорс»). Данная микросхема имеет программную совместимость со всей линейкой «Мультикор» и со СБИС 1288ХК1Т. Пиковая производительность не менее 8 GFLOPS (float 32). Корпус микросхемы BGA-784, 29X29 мм. Использование MC-0428 может обеспечить взаимнокорреляционную обработку для ЛЧМ излучаемых сигналов и СФХН методом авторегрессионной аппроксимации в реальном масштабе времени.

В случае $N = 32$ необходимо восемь СБИС 1288ХК1Т. Возможное соединение СБИС с микропроцессором представлено на рис. 3. Такое соединение допускает до восьми СБИС 1288ХК1Т на один сигнал chip select. Смещение физического адреса в пределах одного chip select задается внешними выводами NUM СБИС 1288ХК1Т.

Цифровые гетеродины СБИС 1288ХК1Т имеют постоянную частоту 50 кГц и результирующая АЧХ ФНЧ может иметь полосу пропускания (400-500) Гц. Согласно рис. 1 прореживание данных возможно на выходах каждого из четырех КИХ-фильтров. Общий коэффициент прореживания может быть 1–16384. Можно принять общий коэффициент

равным 512. Разбивку прореживания по КИХ-фильтрам можно произвести в процессе проектирования с помощью программы «MFStudio».

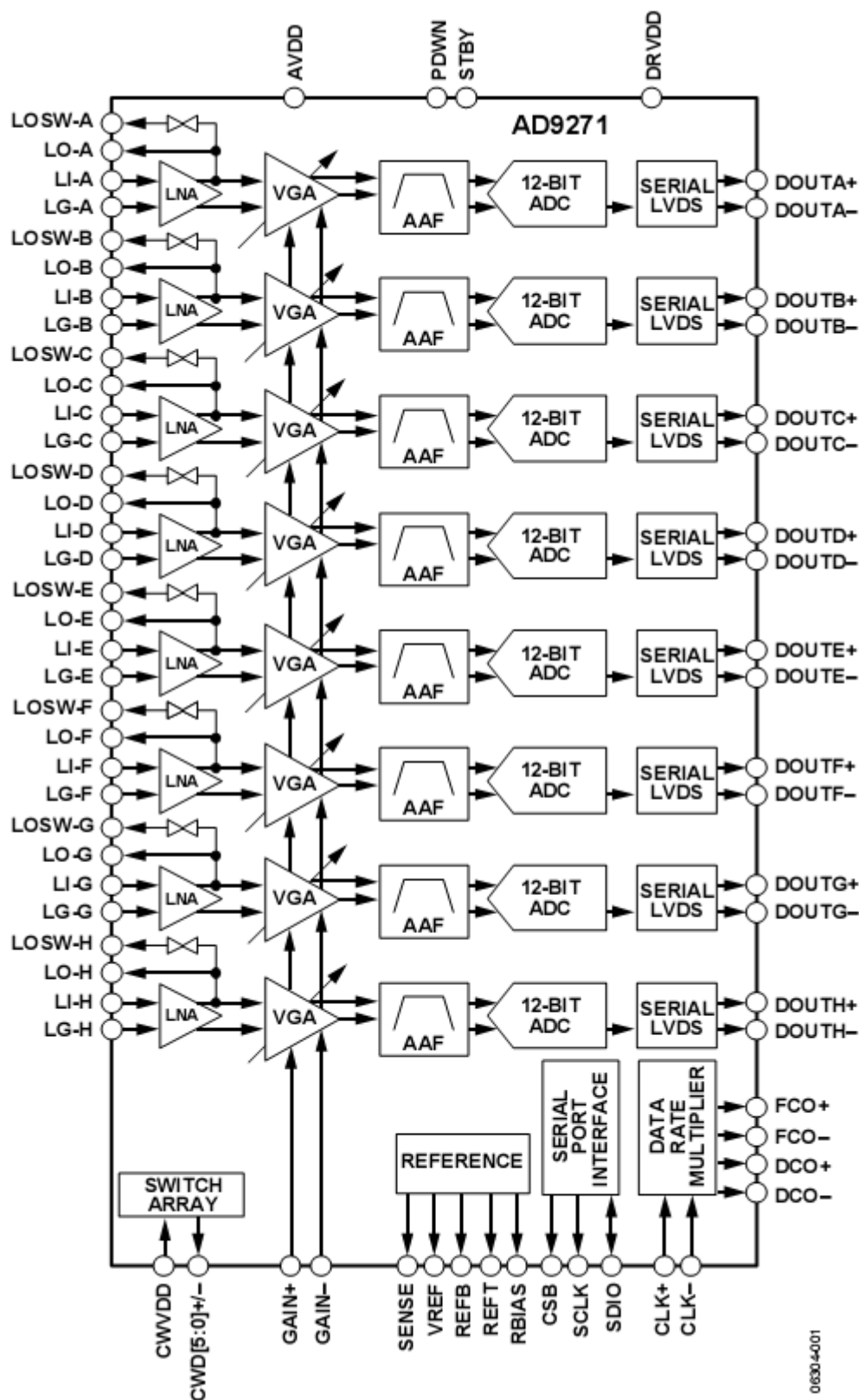


Рис. 1.

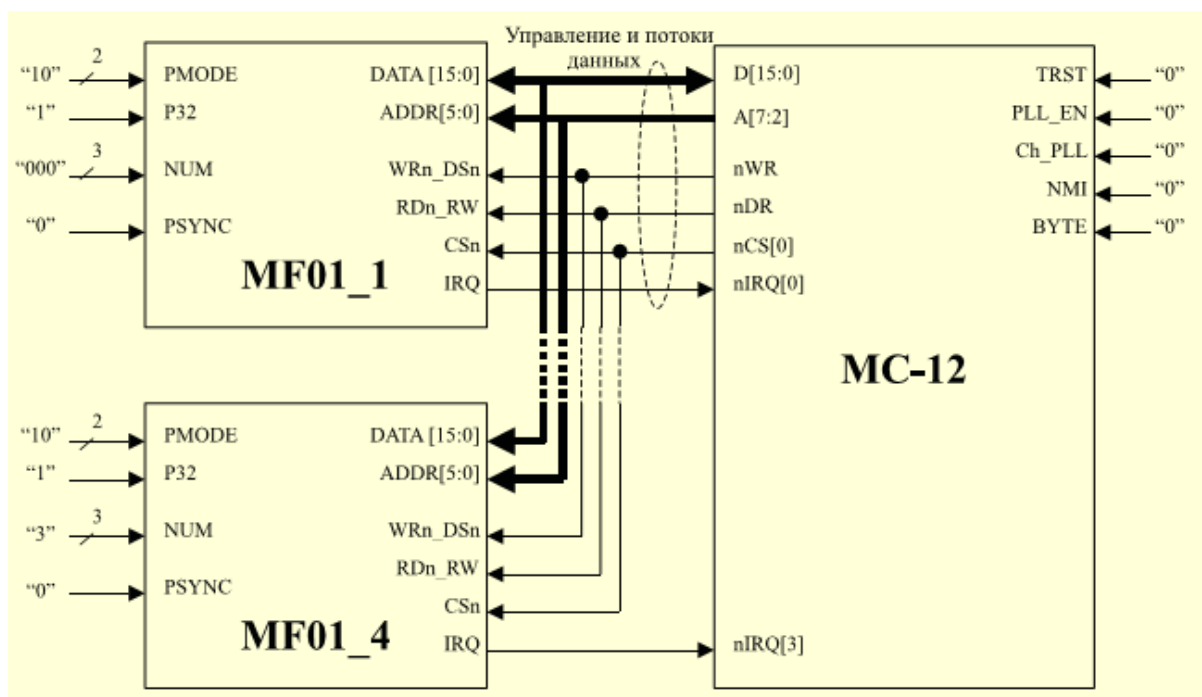


Рис. 2.

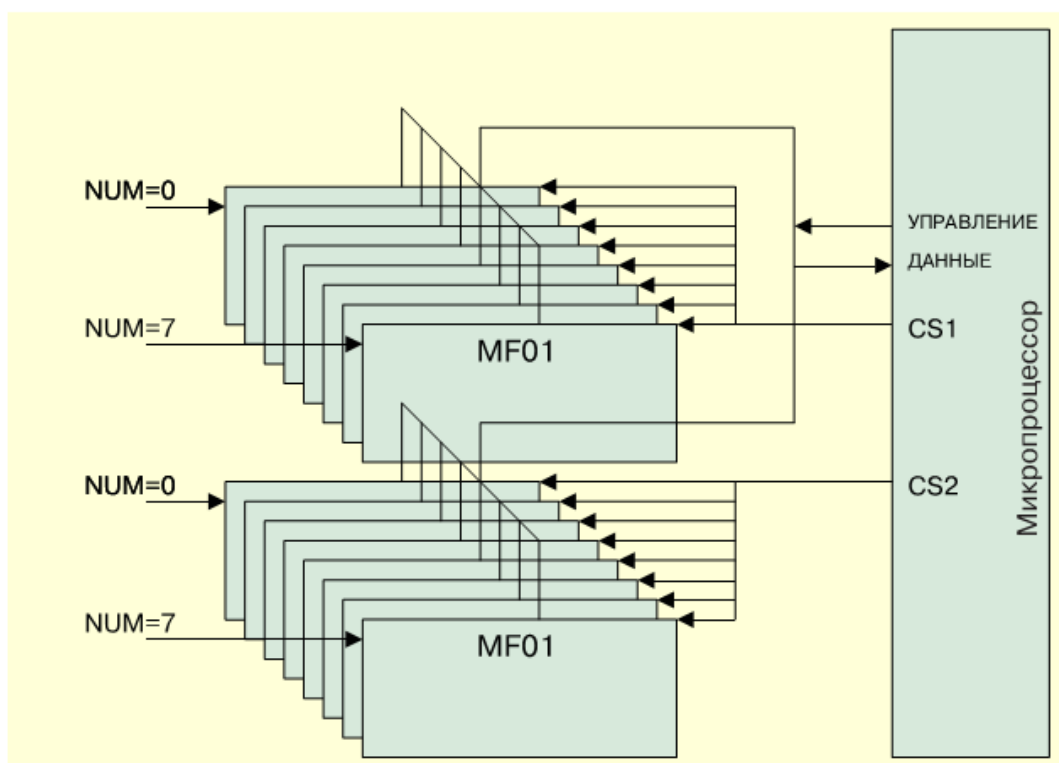


Рис. 3.

Выходные данные СБИС (дискретное представление комплексных огибающих принимаемых сигналов) поступают в FIFO, откуда поступают на вторичную обработку в контроллер.

Если, как, например, в макете МЛЭ ИРЭ РАН, использовать ЛЧМ излучаемые сигналы, то необходима взаимнокорреляционной обработка. В этом случае:

$$H(i\Delta t) = \exp[-j(\pi W / T)(i\Delta t)^2],$$

где W - девиация частоты, T - длительность излучаемых импульсов.

Оценим требуемое время вычислений одного значения развертки по глубине для следующих предположений:

1. Число групп преобразователей $N = 32$.
2. ЛЧМ излучаемые сигналы с базой $WT = 100$ при $T = 0.5$ с.
3. Алгоритм СФХН (7-8) образует 60 лучей с шагом 1.5° .
4. Программная реализация взаимнокорреляционной обработки и СФХН осуществляется на сигнальном процессоре микросхемы 1892ВМ3Т.

В этом случае значение M равно 500 (частота дискретизации после прореживания равна 1000 Гц). Тогда вычисление одного значения функции взаимной корреляции требует 2000 операций умножения и сложения. С учетом, что за один такт выполняется одно умножение, сложение и две пересылки, требуемое время $2000/(300 \times 10^6) = 7$ мкс. При $N = 32$ потребуется 224 мкс.

СФХН требует согласно (8) $32 \times 4 = 128$ операций умножения и сложения. На 60 лучей необходимо $128 \times 60 = 7680$ операций умножения и сложения или $7680/(300 \times 10^6) = 26$ мкс.

Таким образом, одно значение развертки по глубине с шагом по времени 1 мс вычисляется примерно за 250 мкс, т.е. обработка осуществляется в реальном масштабе времени.

Постобработка производится в RISC процессоре микросхемы 1892ВМ3Т.

Определение временного положения T_{i0} сигналов $z(t)$ производится сравнением модулей с порогами. Координаты пятна на дне для луча k при предположениях об однородности среды и постоянстве скорости звука в системе координат, имеющей начало в точке размещения антенн, равны

$$\hat{x} = R / \sin \theta_k,$$

$$\hat{z} = R / \cos \theta_k,$$

где $R = cT_{i0} / 2$ - наклонная дальность,

c - скорость звука,

θ_k - угол между фронтом волны и плоскостью решетки.

Из-за ряда физических факторов (температуры, давления, солености) скорость звука не является постоянной величиной. При распространении акустических колебаний происходит искривление траектории. В настоящее время существуют приборы измерения скорости звука в зависимости от глубины, т.н. измерители вертикального распределения скорости звука. Например, измеритель скорости звука «Алтын», ИЗМ-2000, «Лань» и зарубежные SVP-C, SVP20 (фирма «RESON», Дания). Последние два измерителя имеют

цифровой выход по интерфейсу RS-232 в коде ASCII со скоростью 9600 бод и могут подключаться к последовательному порту ноутбука.

Существуют формулы для расчета скорости звука в морской воде различных авторов. Например, усеченная формула Вильсона [5]:

$$V_{\varphi} = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D,$$

где T - температура воды, °C;

S - соленость, ‰;

D - глубина, м.

В рамках лучевой теории распространения акустических колебаний и представления воды в виде акустически неоднородной среды получено следующее выражение для времени распространения [10]:

$$T_{\text{ид}} = \frac{2}{c_0} \int_0^z h^2(z) dz / (\sqrt{h^2(z) - \sin^2 \theta_k}),$$

где c_0 - скорость звука в точке размещения антенн,

z - истинное значение глубины,

$h(z) = c_0 / c(z)$ - нормированная скорость звука.

Там же приведено выражение для проекции на ось x пути, проходимого лучом за время $T_{\text{ид}} / 2$

$$x = \sin \theta_k \int_0^z dz / (\sqrt{h^2(z) - \sin^2 \theta_k}).$$

Коррекция координат осуществляется программно. Исходные данные для расчета $\theta_k, h(z), T_{\text{ид}}$. Расчет осуществляется с использованием относительно несложных алгоритмов численного интегрирования для двух вышеприведенных выражений.

Связь с компьютером производится через универсальный асинхронный порт UART. В состав программного обеспечения могут входить пакеты NYPACK и NYSWEEP, которые обеспечивают представление данных согласно требованиям Международной Гидрографической Организации. Возможна организация связи с датчиками вертикальной, бортовой и килевой качек и курса судна, также как и с системой определения места, используя стандартные программно-аппаратные средства. Как пример можно назвать навигационную систему «Мини-навигация» разработки ФГУП ЦНИИ «Электроприбор».

Ведение временной диаграммы излучение/прием МЛЭ поддерживается наличием в контроллере интервального, сторожевого таймеров и таймера реального времени. Сигналы управления для генераторов излучаемых сигналов передаются через последовательный порт контроллера. Регулировка усиления (ВАРУ) усилителей может обеспечиваться, например, использованием ИС AD7244, содержащей два ЦАП. В этом случае на входы ИС AD7244 поступает соответствующий код из порта SPORT контроллера.

Размещение ИС AD9271, СБИС, контроллера и ИС ЦАП возможно на двух платах размером примерно 100x100 мм. Помимо указанных ИС, необходимы ИС преобразования последовательного интерфейса LVDS (выходные сигналы AD9271) в TTL сигналы, ИС внешней памяти, подключаемая к порту MPORT контроллера и ИС ППЗУ (Flash Memory).

Литература

1. Голод О.С., Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И. Многолучевые эхолоты//Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана). - Научно-технический центр панорамных акустических систем. - Запорожье, 2005 № 2. - С. 34-49
2. Буров В.А. и др. Проектирование многолучевых эхолотов и результаты их испытаний//Труды V Международной конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2000, с. 244-247.
3. Буров В.А. и др. Восстановление профиля донной поверхности с помощью модифицированных методов спектрального оценивания//Труды V Международной конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2000, с. 131-135.
4. Колосов К.В. Малый многоцелевой эхолот-гидролокатор//Труды VIII Международной конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2006, с. 154-157.
5. Каевицер В.И. и др. Особенности обработки данных многолучевого эхолота со сложными зондирующими сигналами//Труды IX Всероссийской конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2008, с. 195-199.
6. Дмитриев О.В. Нелинейный адаптивный метод повышения разрешающей способности гидроакустических систем// Труды VII Международной конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2004, с. 403-406.
7. Монзинто Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Р и С, 1986.
8. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988
9. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. СПб.: Наука, 2004
10. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1956.