

УДК 681.883.054, 551.462.8

# АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ АНТЕНН

И.Б. Агафонов, В.В. Золотарёв,  
Е.А. Мадисон

Институт проблем морских  
технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Анализируются результаты эксперимента по накоплению многоканальных гидролокационных данных и даётся оценка их применимости для формирования синтезированной апертуры. Рассматриваются структура гидролокационного комплекса «Синтез», методы анализа и постобработки гидролокационных и навигационных данных. Из анализа следуют оценки качества полученных экспериментальных данных и работоспособности комплекса. Перечислены задачи по усовершенствованию аппаратуры и алгоритмов синтеза гидролокационной апертуры.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод синтеза гидролокационной апертуры является одним из наиболее перспективных и успешных направлений в современной гидролокации [1, 2]. Однако его реализация требует не только применения сложных алгоритмов, но и наличия качественных первичных данных, отвечающих определенным требованиям. Отработка принципов и алгоритмов с использованием реальных многоканальных данных – процесс трудоёмкий и продолжительный. Тем важнее создать возможность продолжения этих исследований не только в море, но и в лаборатории, сделав их не зависящими от погоды, сезона и наличия обеспечивающего судна.

В ИПМТ ДВО РАН изготовлен макетный образец многофункционального комплекса

«Синтез», предназначенный для отработки и тестирования в морских условиях перспективных гидролокационных устройств различного назначения. В 2010 г. антенная система этого комплекса была исполнена в варианте низкочастотного (75–85 кГц) гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой. В условиях мелководного прибрежного полигона были выполнены эксперименты, целью которых был сбор многоканальных эхолокационных данных, необходимых для последующей отработки в лабораторных условиях методов и алгоритмов синтеза апертур.

К аппаратуре и программному обеспечению комплекса предъявлялись жесткие требования. Главное из них заключалось в необходимости сохранения многоканальной информации в самом первичном,

«сыром» виде, по возможности ещё не искаженном какой-либо обработкой. Способ накопления в «сыром» виде не оптимален с точки зрения использования дискового пространства и вычислительных ресурсов компьютера и является решением временным, предполагающим перенос процесса синтеза в режим отложенных вычислений. Он не даёт конечного результата в реальном времени, но на начальной стадии проектирования удобен, т.к. позволяет при минимальном вмешательстве в первоначальную структуру эхо-сигналов произвольно и гибко изменять алгоритмы постобработки без опасения за потерю достоверности данных (как это было бы в случае, когда обработка предшествует накоплению).

В статье кратко описаны особенности комплекса «Синтез» и приведены результаты анализа собранных данных с точки зрения их применимости для решения упомянутой задачи.

## Структура комплекса и описание эксперимента

Комплекс состоит из оборудования, размещённого на обеспечивающем судне, и подводных узлов, установленных на буксируемую платформу (рис. 1). Особенностью конструктивного исполнения является использование в качестве жесткой базовой платформы для размещения гидролокационных антенн комплекса «Синтез» буксируемого устройства (TowFish) гидролокатора EdgeTech 4200-FSL (рис. 2). Его высокочастотный локатор использовался в эксперименте в качестве обзорно-контрольного прибора. Данные бортовых датчиков EdgeTech (скоростные, глубинные, трёхмерные угло-

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (4232) 215545, доб. 416, e-mail: lab32imtp@marine.febras.ru

вые), а также координатные данные с выхода приёмника GPS непосредственно перед сохранением на жёстком диске компьютера «привязывались» через единое время к многоканальной эхо-информации комплекса «Синтез».

Наиболее ответственной частью комплекса «Синтез» является 8-канальная приёмная антенна, изготовленная в виде линейной фазированной решётки, состоящей из продольно расположенных независимых секций. К антенне предъявлялись следующие жёсткие требования:

- высокая степень идентичности всех приёмных секций по чувствительности, фазовым характеристикам и диаграмме направленности (ДН);
- соответствие ширины ДН каждой секции (как по азимуту, так и по вертикали) азимутальным и вертикальным значениям ДН передающей антенны;
- равномерность частотной характеристики в рабочей полосе частот 75–85 кГц;
- минимальный уровень проникновения электрических и акустических составляющих эхо-сигналов между каналами;
- максимальная помехоустойчивость к воздействию внешних электрических полей;
- стабильность характеристик при изменении внешних условий среды (температуры, гидростатического давления, воздействия вибраций и других механических возмущений).

Не менее высокие требования по идентичности фазовых и амплитудно-частотных характеристик предъявлялись к 8-канальному приёмно-усилительному тракту. Выполненный на современной элементной базе, он обладает высокой стабильностью и минимальными (не более  $0,1^\circ$ ) фазовыми искажениями в рабочей полосе частот. Использование единого для всех каналов

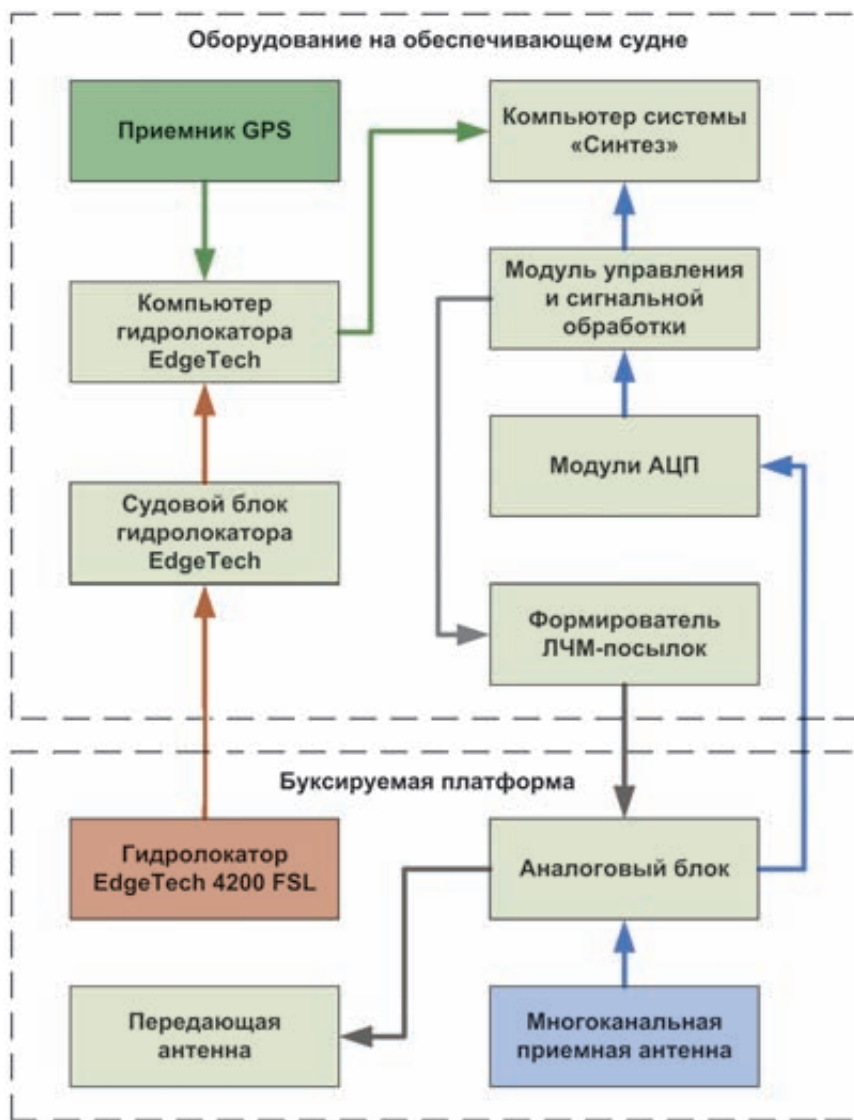


Рис. 1. Основные компоненты комплекса «Синтез»

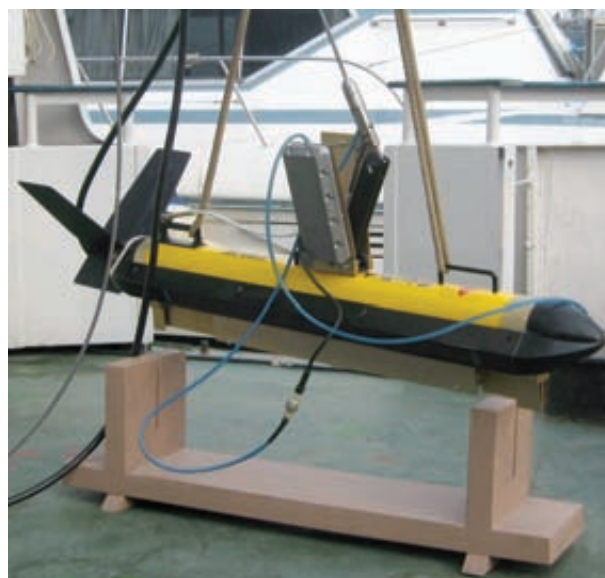


Рис. 2. Буксируемое устройство гидролокатора EdgeTech с размещенными на нём антеннами комплекса «Синтез»

управляющего напряжения временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) минимизирует различие законов изменения коэффициентов усиления во времени  $K_y(t)$ .

Передающая антенна обладает широкой (до  $40^\circ$ ) ДН в обеих плоскостях, что гарантирует озвучивание расчётной зоны синтезирования на поверхности морского дна. Цепи, согласующие выход усилителя мощности передатчика с передающей антенной, обеспечивают передачу на антенну без заметных искажений зондирующего ЛЧМ-импульса с девиацией частоты 75–85 кГц.

Поскольку эффективность ЛЧМ-сжатия во многом зависит от качества зондирующих ЛЧМ-посылок, был выбран самый точный в настоящее время метод их формирования с помощью прямого цифрового синтеза (DDS). Используемая в формирователе ЛЧМ-импульсов микросхема AD9954 обеспечивает потенциальную точность задания частоты до 0,01 Гц. С учётом присущей методу DDS взаимозависимости между длительностью формируемых посылок, шагом приращения частоты и величиной тактовой частоты, приоритет был отдан плавности изменения внутриимпульсной частоты. Это привело к появлению «некруглых» значений длительности посылок  $\tau$ , что при соответствующем учёте совершенно несущественно для процесса ЛЧМ-сжатия и других видов обработки. В нашем эксперименте из набора возможных длительностей были использованы следующие значения  $\tau$ : 8,948; 5,369; 4,881 мс. Шаг приращения частоты при этом был равен соответственно 0, 056; 0,093; 0,102 Гц. Параметры ЛЧМ-посылок можно оперативно задавать с клавиатуры судового компьютера.

С целью снижения требований к аналоговым узлам

приёмно-усилительного тракта и увеличения точности расчётов разрядность цифрового представления эхо-информации была выбрана высокой – 24 бита. Для оцифровки 8 аналоговых каналов использовались 2 четырёхканальных модуля ввода-вывода из серии Danville Signal dspstak на базе сигма-дельта АЦП. Частота оцифровки  $f_{samp} = 192$  кГц более чем вдвое превышает верхнюю частоту спектра эхо-сигналов и в 19 раз – его ширину. Благодаря характерному для сигма-дельта АЦП свойству подавлять на 70–80 дБ входные частоты, лежащие выше частоты  $0,5 \cdot f_{samp}$ , перед АЦП не потребовалась дополнительная фильтрация. Это свойство оказалось полезным и в плане снижения внеполосных шумов приёмно-усилительного тракта.

В модуле управления и цифровой обработки Danville Signal dspstak используется 32-разрядный процессор с архитектурой SHARC, управление которым осуществляется судовым компьютером. Оцифрованная эхо-информация с выхода модуля пересылается на компьютер через интерфейс USB 2.0.

Общее управление работой комплекса осуществляется судовым компьютером, который используется для:

- управления цифровым блоком;
- сохранения оцифрованной гидролокационной и навигационной информации на жесткий диск (при скоростях потока до 5 Мбайт/с);
- формирования предварительных эхо-изображений с целью отображения на экране текущей гидролокационной и навигационной обстановки.

Лабораторные испытания, выполненные перед началом морского эксперимента, показали, что приёмно-передающий тракт и другие электронные

узлы по показателям когерентности полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к аппаратуре цифрового синтезирования апертуры антенны [3].

## Обработка данных и результаты

В результате эксперимента было накоплено более 17 гигабайт «сырых» данных. Для каждого файла данных комплекса «Синтез» был записан соответствующий ему контрольный файл, полученный с помощью прибора EdgeTech 4200-FSL, в котором кроме контрольного ГБО-изображения содержится набор навигационных данных – координатных, скоростных, глубинных и трёхосевых угловых.

Процесс постобработки включал в себя:

- оценивание качества накопленных данных на предмет их применимости для синтезирования гидролокационной апертуры;
- развитие методов обработки эхосигналов и навигационных данных;
- проверку точности работы аппаратных узлов и эффективности применённых алгоритмов;
- выработку требований по усовершенствованию комплекса, методик его использования, технологии визуализации и накопления скоростного потока многоканальных данных.

Необходимость в проверке качества полученных данных обусловлена прежде всего погрешностями буксировки подводной платформы с антеннами и особенностями распространения звука в неоднородной морской среде. Требовало проверки и соответствие фактических характеристик антенн (особенно антенны приёмной) перечисленным жёстким требованиям, необходимым для реализации принципа синтезирования. Пер-



воочередные виды постобработки включали процедуры, позволяющие оценить полученные «сырые» данные прежде всего на предмет их когерентности как характеристики, наиболее существенной для реализуемости процесса синтезирования. При этом интерес представляли как кратковременная когерентность на интервалах времени  $\Delta t$ , не превышающих периода зондирования  $T$ , так и долговременная – на интервалах  $\Delta t \gg T$ . (В ходе эксперимента значения периода зондирования  $T$  задавались в пределах 100–300 мс).

Такое разграничение имеет смысл при учёте физических характеристик морской среды и условий буксировки. Действительно, в течение интервала  $\Delta t \ll T$  положение антенны в пространстве можно считать стационарным, поэтому эффективность таких видов корреляционной обработки, как ЛЧМ-сжатие (где длительность опорной функции равна длительности зондирующей посылки), зависит лишь от погрешностей обработки и аппаратных факторов. На интервалах  $\Delta t \leq T$  буксируемая платформа благодаря её массе и парусности почти не успевает подвергнуться случайным дестабилизирующим возмущениям, и перемещение антенны практически полностью определяется штатным режимом буксировки по заданной траектории. При этом преобладающими факторами, ухудшающими межканальную и временную когерентность, являются турбулентность и неоднородности внешней среды. В этом случае, с учётом специфики приёмной решетки, когерентность на интервалах  $\Delta t \leq T$  удобно оценивать путём формирования виртуальной апертуры на длине, равной физической длине решетки. Наиболее показательными могли бы стать результаты динамической «перифокусировки по дальности»,

однако самую первую оценку было проще выполнить синфазным сложением эхо-сигналов от всех каналов, что эквивалентно фокусированию линейной фазированной решетки «на бесконечность».

Наконец, на интервалах времени  $\Delta t \leq T$  к деструктивным факторам внешней среды добавляются факторы, обусловленные траекторными нестабильностями, которые и становятся преобладающими. Оценка когерентности на интервале  $\Delta t \leq T$  должна дать ответ на вопрос о принципиальной применимости эхо-сигналов, накопленных конкретной аппаратурой в конкретных условиях буксировки, для осуществимости гидролокационного синтезирования. В [4] показано, как метод синтезирования в гидролокации стал принципиально реализуемым лишь благодаря микронавигационным алгоритмам. Однако их применению обязательно должна предшествовать более «грубая» процедура – компенсация временных и фазовых

задержек, решаемая методами геометрической акустики. Исходными данными для компенсации являются инструментально измеренные траекторные возмущения, содержащиеся в накопленных навигационных данных. Ниже показано, что в ряде случаев точность этой компенсации можно повысить путём обработки первичных навигационных данных.

Для решения вышеназванных задач постобработки было разработано специализированное программное обеспечение (далее – «ПО постобработки»). Основная его особенность – наличие собственного языка сценариев (скриптов), позволяющего легко изменять последовательность и параметры обработки без изменения кода программы, что является удобным на стадии экспериментирования и отработки алгоритмов.

Общая схема постобработки изображена на рис. 3. Зелёным цветом отмечен блок обработки исходных данных, фиолетовым – блок

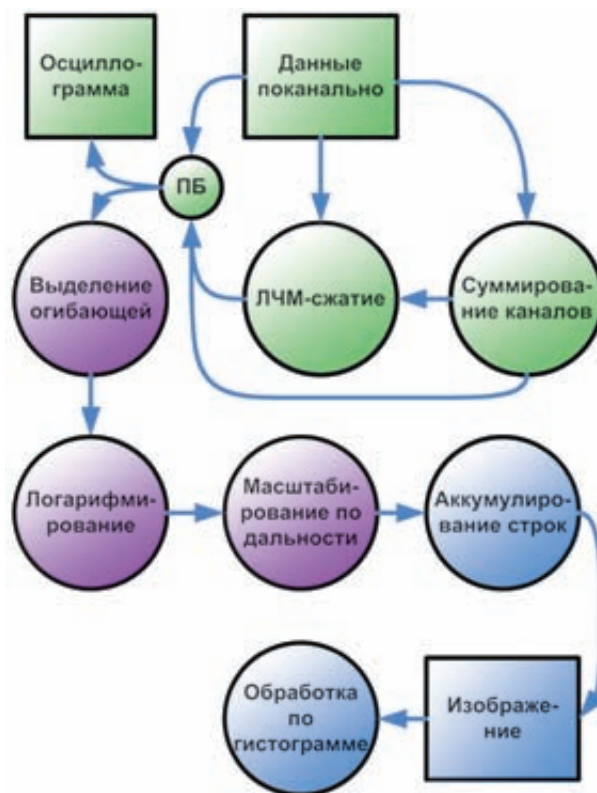


Рис. 3. Схема постобработки многоканальных гидролокационных данных

формирования видеосигнала, синим – блок обработки изображений. Аббревиатура «ПБ» означает «промежуточный буфер». Как видно из схемы, в блоке обработки исходных данных существуют различные варианты прохождения сигналов. В текущей конфигурации ПО постобработки на выходе этого блока можно получить «сырые» данные для каждого из каналов, а также результаты ЛЧМ-сжатия для каждого из каналов, синфазного суммирования всех каналов и ЛЧМ-сжатия суммы каналов. Обработанный сигнал может быть просмотрен в виде осциллограммы или направлен далее для формирования видеосигнала строки и изображения. Ниже приведены комментарии по некоторым из блоков схемы обработки.

**ЛЧМ-сжатие.** На выходе формирователя ЛЧМ-посылок генерируется зондирующий импульс [5] вида:

$$f(t) = \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2\right), \quad (1)$$

$$\mu = \frac{f_1 - f_0}{\tau},$$

где  $\mu$  – скорость изменения частоты,  $f_0$  и  $f_1$  – начальная и конечная частоты импульса, соответственно,  $\tau$  – длительность импульса.

Переходя в выражении (1) к дискретному представлению, получим:

$$s(i) = \sin\left(2\pi f_0 t(i) + \frac{1}{2} \mu t(i)^2\right),$$

$$N = \tau \cdot f_{\text{samp}}, \quad i = 0, 1, 2..N, \quad (2)$$

$$t(i) = i / f_{\text{samp}},$$

где  $T$  – число отсчетов на импульс,  $f_{\text{samp}}$  – частота дискретизации сигналов.

Согласованный фильтр для сигналов при этом определяется как

$$h(i) = s(N - i). \quad (3)$$

Для уменьшения уровня боковых лепестков функции корреляции и повышения на гидролокационном изображении четкости границ объектов по горизонтали фильтр взвешивается окном Ханна

$$W(n) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad (4)$$

т.к. путём визуального сравнения изображений было установлено, что взвешивание этим окном даёт лучший результат, чем взвешивание окном Хемминга.

ЛЧМ-сжатие осуществляется путем свёртки вида

$$y(i) = x(i) * h_w(i), \quad (5)$$

где  $x(i)$  – сигнал, подаваемый на вход модуля.

Фрагмент осциллограммы, иллюстрирующей результат ЛЧМ-сжатия сигнала одного из каналов, приведён на рис. 4.

**Суммирование каналов.** Виртуальная диаграмма направленности линейной антенной решётки из 8 элементов с фокусировкой «на бесконечность» формируется путём простого синфазного сложения:

$$x_s(i) = \sum_{k=1}^{k=8} x_k(i), \quad (6)$$

где  $x_k(i)$  – сигнал, принятый по каналу номер  $k$ .

«Виртуальная длина» организованной таким образом апертуры должна быть близка значению  $8D$ , где  $D$  – длина каждой секции приёмной многоканальной решётки. Вывод о

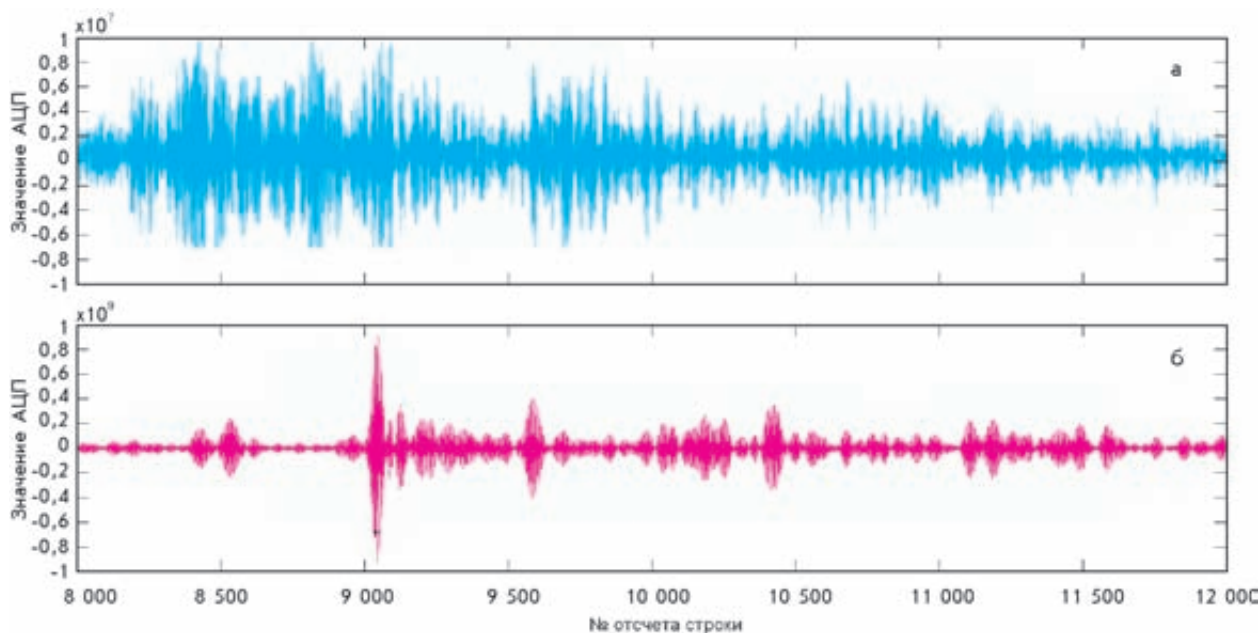


Рис. 4. Результат ЛЧМ-сжатия: а – первичный сигнал одного из каналов, б – сигнал, подвергнутый ЛЧМ-сжатию

степени когерентности сигналов в разных каналах на интервалах времени  $\Delta t \leq T$  устанавливается по степени сходства результатов обзора целей такой синфазной решёткой с результатами традиционного ГБО-обзора с «веерообразной» ДН физической антенны.

**Масштабирование.** Количество отсчётов в гидролокационной скан-строке (которое, по существу, является шириной первичного гидролокационного изображения в пикселах) определяется согласно выражению:

$$N = T f_{\text{сamp}}, \quad (7)$$

где  $T$  – период зондирования.

Величина  $N$  может оказаться достаточно большой, что повышает точность обработки. Например, при частоте дискретизации  $f_{\text{сamp}} = 192$  кГц и периоде зондирования  $T = 200$  мс значение  $N$  было равно 38400. Для приведения больших исходных значений  $N$  к значениям, приемлемым для отображения на мониторе, использовалось масштабирование строки, которое осуществлялось с помощью эффективного метода Карла-Фанта.

**Аккумуляция строк.** Сигнальные операции в блоке обработки исходных данных и в блоке формирования видеосигнала осуществляются построчно. Аккумуляция строк представляет собой процесс формирования изображения, в ходе которого обработанные строки сохраняются в буфере. По завершении обработки всех строк галса в буфере будет находиться битовый образ гидролокационного изображения, который может быть сохранён в любом растровом графическом формате и при необходимости отредактирован стандартными методами обработки изображений.

**Логарифмирование.** Для сжатия динамического диапазона эхо-сигналов исполь-

зуется логарифмирование как наиболее распространённый и простой способ конечного представления гидролокационной картины. Ввиду нелинейности логарифмирование не может предшествовать тем видам линейной обработки, в которых важна фазовая структура сигнала, поэтому оно, в сочетании с *гистограммной обработкой*, используется только в качестве завершающей процедуры. Не увеличивая (и даже уменьшая) информативность эхо-информации, логарифмирование позволяет улучшить визуальное восприятие на одной эхограмме одновременно как сильных, так и слабых целей. Основание логарифма рассчитывается таким образом, чтобы диапазон значений сигналов сокращался с  $[0..2^{23}-1]$  до  $[0..255]$ . Здесь  $2^{23}-1$  – это половина диапазона значений АЦП, т.е. фактически максимально возможное значение сигнала после выделения огибающей. Таким образом, количество байт на отсчёт уменьшается с 4 до 1, что позволяет отображать логарифмированный сигнал в виде 256 градаций одного цвета.

**Гистограммная обработка.** Параметры логарифмического сжатия не всегда удаётся подобрать оптимально для непосредственного визуально-

го восприятия. В этом случае для корректировки контраста и устранения нежелательной постоянной составляющей яркости, проявляющейся после логарифмирования в виде «вуали», целесообразно применить простейший вид гистограммной обработки – метод линейного растяжения гистограммы.

На рис. 5 приведён пример эхо-изображений участка дна, сформированных как результат действия описанных видов постобработки, а на рис. 6 приведены записи данных навигационных датчиков, соответствующие прохождению этого участка. Нулю по горизонтальной оси графиков соответствует нижний край картинок, вертикальной черте вблизи ординаты 780 – верхний край. В начале галса, на ординатах от 0 до 180, на графиках отчётливо видны сильные колебания всех навигационных параметров. Прослеживается явная связь между поведением навигационных параметров, качеством эхо-изображений на рис. 5 и эффективностью применённых видов обработки. Так, эффект от ЛЧМ-сжатия (рис. 5, б) очевиден на всём поле эхограммы, и это вполне согласуется с предположением о высокой степени когерентности эхосигналов на интервалах времени  $\Delta t \ll T$ ,

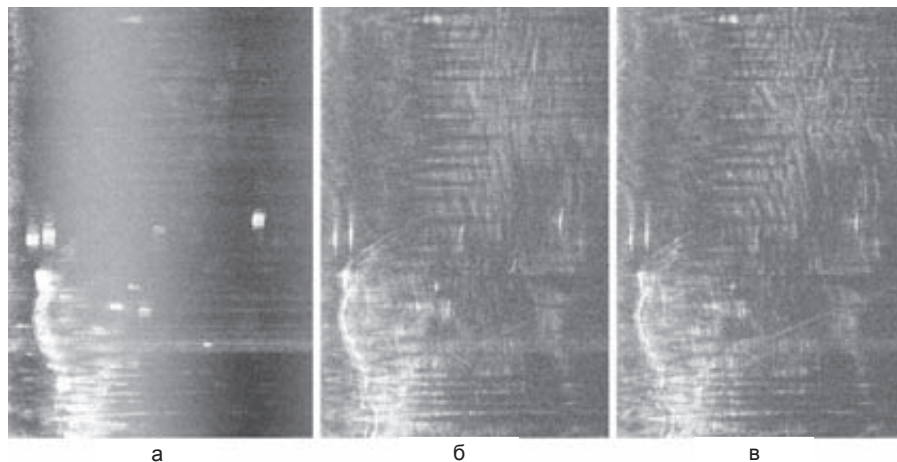


Рис. 5. Пример результатов постобработки: а – «сырые» данные первого канала (остальные каналы имеют похожий вид), б – результат ЛЧМ-сжатия первого канала, в – результат ЛЧМ-сжатия суммы восьми каналов



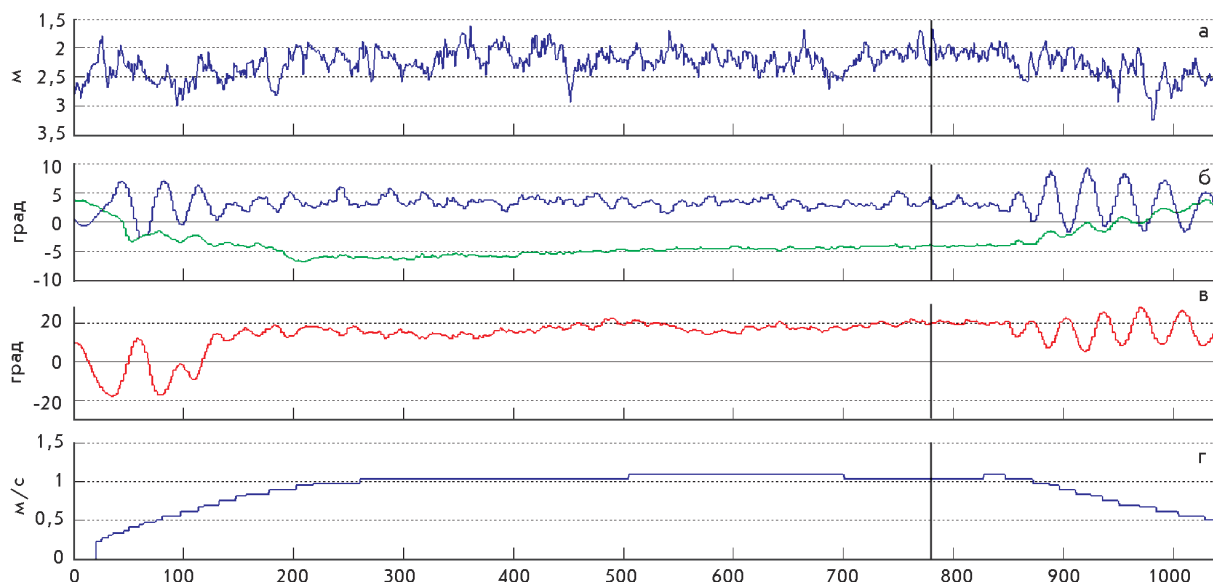


Рис. 6. Данные навигационных датчиков, соответствующие прохождению участка дна, показанного на рис. 5: а – график заглубления подводной буксируемой платформы, б – график изменений крена (фиолетовый цвет) и дифферента (зелёный цвет), в – график рыскания по курсу, г – график скорости платформы

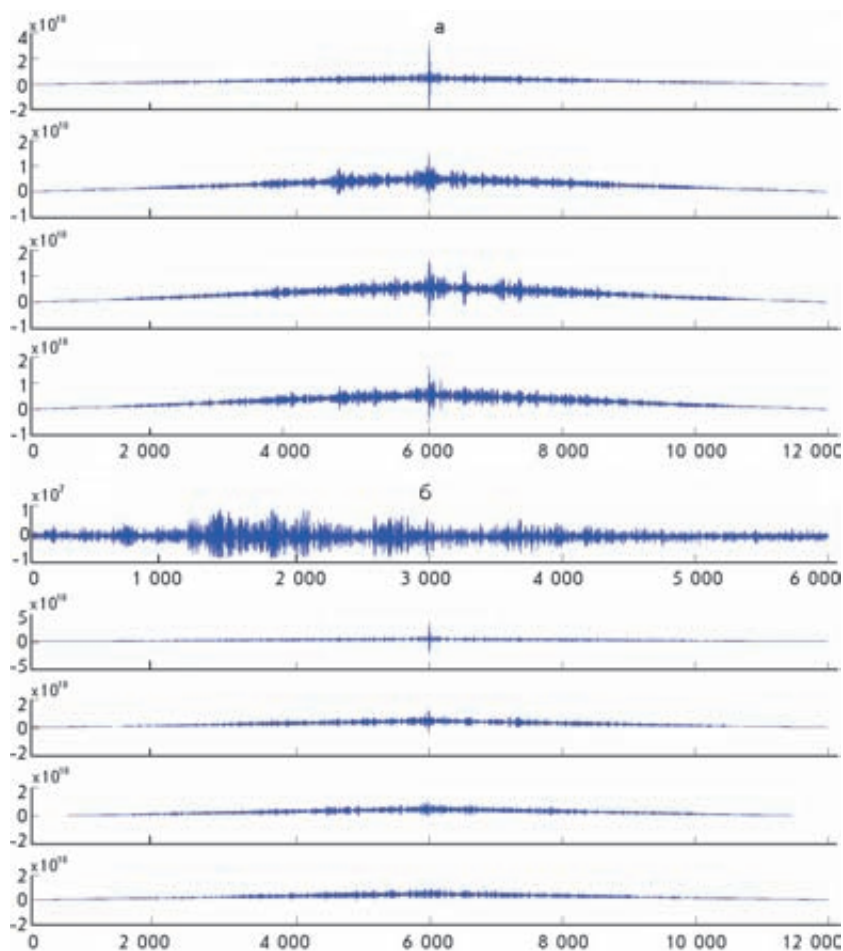


Рис. 7. Образцы результатов корреляционного анализа эхо-сигналов: а – верхний график – автокорреляционная функция эхосигнала 1-го канала, далее – взаимные корреляционные функции эхо-сигналов 1-го канала со 2-м, 5-м и 8-м в пределах одного цикла зондирования; б – первый график – реализация эхо-сигнала 1-го канала на  $i$ -м цикле зондирования, далее – его автокорреляционная функция, далее – взаимные корреляционные функции этого эхо-сигнала с эхо-сигналами 1-го канала, выбранными на 2-м, 3-м и 4-м циклах зондирования

практически вне зависимости от угловых колебаний антенны. Эффект от синфазного суммирования каналов (рис. 5, в) заметен, при внимательном рассмотрении, лишь в верхней части изображения, где выявляется больше деталей рельефа дна и уменьшаются азимутальные размеры объектов. Это свидетельствует о сужении сфокусированной «на  $\infty$ » виртуальной диаграммы направленности приёмной антенны, что является желаемым результатом суммирования и подтверждением когерентности каналов на интервалах времени  $\Delta t \leq T$ . Однако на начальном участке галса, где велико деструктивное влияние траекторных нестабильностей, эффективность синфазного сложения заметно снижается.

Свойства эхо-сигналов на интервалах времени  $\Delta t \ll T$  оценивались по методикам, аналогичным применявшимся при изучении структуры сигналов традиционных «тенеграфических» ГБО. Тогда взаимному корреляционному анализу подвергались физические огибающие эхо-сигналов смежных и близких циклов зондирования. Высокая степень их сходства

была особенно заметна для широких ДН антенны, когда цели в зоне бокового обзора озвучивались и регистрировались многократно. Данное свойство [5] благодаря эффекту накопления было полезным для повышения отношения «сигнал/шум». Но сейчас, при изучении когерентности эхо-сигналов с учётом фазы, взаимный корреляционный анализ эхо-информации близких циклов зондирования показал, что уже на втором-третьем циклах эхосигналы становятся практически независимыми от своего предыдущего состояния (см. рис. 7, б). Анализ навигационных данных (рис. 6) подтверждает явную зависимость между когерентностью сигналов и качеством движения. В то же время когерентность эхо-сигналов разных каналов в пределах одного периода зондирования оставалась высокой (рис. 7, а). Наличие траекторной информации, содержащейся в навигационных данных, накопленных во время экспериментов с комплексом «Синтез», предоставляет возможность ввести в эхо-сигналы компенсационные поправки, обусловленные траекторными возмущениями в движении антенны. Точность этих поправок может быть повышена путём предобработки навигационных данных. На рис. 8 показаны результаты такой предобработки на примере показаний датчиков крена и курсовой системы (аналогичной предобработке подвергались и первичные данные остальных датчиков). Существенным поводом для выполнения предобработки является несоответствие между частотой обновления показаний датчиков и более высокой частотой их считывания. Первичные данные показаны синим цветом. Первым этапом обработки является интерполяция данных (график красного цвета). На следующем этапе

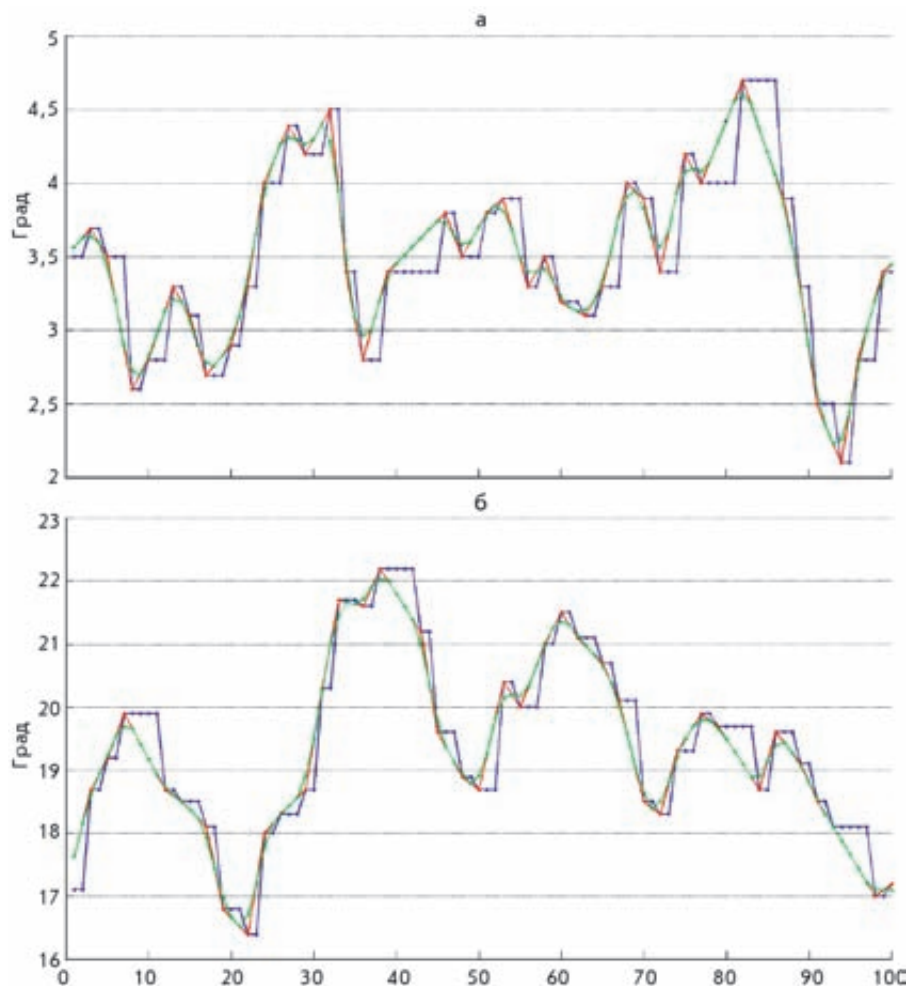


Рис. 8. Примеры обработки навигационных данных. Данные приведены во временном масштабе, увеличенном относительно рис. 6: а – графики крена, б – графики курса. Синий цвет – первичные необработанные данные, красный цвет – результат линейной интерполяции, зелёный цвет – результат низкочастотной фильтрации

производилась низкочастотная фильтрация данных, причём параметры фильтра устанавливались на основании учёта постоянной времени буксируемой платформы как механической величины, характеризующей её инерционность и гидродинамическое сопротивление. Использование фильтрованных навигационных данных для вычисления фазовых компенсационных поправок представляется корректным в предположении, что они в большей степени соответствуют реальному угловому и линейному перемещению буксируемой платформы в пространстве, нежели данные первичные. Данный тезис требует

экспериментальной проверки, и критерием его справедливости должно стать повышение (ещё до применения микронавигационных алгоритмов) разрешающей способности обзора при формировании виртуальных апертур хотя бы на 3–4 цикла зондирования. В этой связи следующим этапом постобработки станет когерентное сложение эхо-сигналов от двух и более зондирующих импульсов. Для этого необходимо перейти от построчной обработки данных к обработке блочной. Под блоком здесь подразумевается скользящее окно из  $n$  строк. При обработке блока в первую очередь предполагается реализовать



фазовую коррекцию сигналов с учётом показаний навигационных датчиков и лишь затем добавить уточняющую коррективку с помощью микронавигационных алгоритмов.

## ВЫВОДЫ

1. Натурные испытания рабочего макета многоканального гидролокационного комплекса «Синтез» показали его работоспособность при эксплуатационно-технических характеристиках, достаточных для эффективного сбора первичных эхолокационных дан-

ных с минимальными искажениями.

2. На интервалах, сравнимых с длительностью зондирующей посылки, временная и межканальная когерентность эхо-сигналов достаточна для практической реализации рассмотренных методов постобработки. Точность наиболее отработанных и эффективных из них (ЛЧМ-сжатие, динамическая перефокусировка с использованием ФАР) близка к теоретическому пределу. Отработанные технические решения вполне могут быть рекомендованы для использования и в других

гидролокационных устройствах реального времени.

3. Для повышения качества перемещения антенн в реальных морских условиях целесообразна адаптация комплекса «Синтез» к работе в составе АНПА.

4. Целесообразно проведение дополнительных исследований по интерполяции и обработке траекторных навигационных данных с постановкой экспериментов по оценке их эффективности.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН: № 09-П-СО-03-001.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fossum T.G., Saebo T.O., Langli B., Callow H.J., Hansen R.E. HISAS 1030 - High resolution interferometric synthetic aperture sonar // Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference and National Surveyors Conference 2008. Paper 10-2. Victoria, BC, Canada, 2008.
2. Chatham R., Chang E., Nelson M.A., Marx D., Putney A., Warman K., Chick K., Borchardt S. The Synthetic Aperture Sonar Revolution // The Autonomous Undersea Systems Institute's (AUSI) workshops on Sensors and Sensing Technology for Autonomous Ocean Systems, Waikoloa, Hawaii, Oct. 29-Nov. 3, 2000. Hawaii, 2000.
3. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
4. Bonifant W.W.Jr. Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing: A Thesis Presented to The Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia: Inst. of Tech., 1999.
5. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем): пер. с англ. / под ред. Ю.Б. Кобзарева. М.: Советское радио, 1969. 704 с.

