

УДК:534.222.

АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**С.В. Сай, А.Г. Шоберг,
И.Н. Бурдинский**

Л.А. Наумов, В.В. Золотарев

Тихоокеанский государственный
университет, Хабаровск

Институт проблем морских
технологий ДВО РАН, Владивосток

В работе представлены алгоритмы обработки и анализа подводных изображений. В их числе фильтрация, сжатие, временная автоматическая регулировка усиления, редактирование, измерение навигационных параметров. Данные алгоритмы реализованы в виде компьютерной программы-редактора, которая прошла успешные испытания в системах технического зрения подводных роботов, созданных в ИПМТ ДВО РАН.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах большое внимание уделяется проблемам исследования Океана и развития подводной робототехники. Система технического зрения является одной из основных систем «интеллектуального» автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Современные системы технического зрения АНПА могут быть оборудованы различными датчиками, к которым относятся акустические датчики, фото- и видеокамеры. Гидролокатор бокового или секторного обзора относится к акустическим датчикам. Данное устройство обычно подключается к отдельному компьютеру для анализа, обработки, записи и передачи сигналов гидролокационных изображений. Настоящая работа посвящена актуальным проблемам компьютерной обработки и анализа изображений, получаемых с гидролокатора бокового обзора (ГБО).

Рассмотрим основные принципы формирования сигналов гидролокационного изображения [1]. В основу действия ГБО положен принцип сканирования поверхности дна узконаправленным акустическим лучом, перемещаемым в водной среде за счет поступательного движения антенны АНПА. Антenna обладает веерообразной диаграммой направленности, широкой (до 40–60 градусов) в вертикальной плоскости и узкой (не более 1–2 градусов) в горизонтальной. Последний параметр определяет угловую разрешающую способность ГБО. Акустический эхосигнал, отраженный от поверхности морского дна, формируется с помощью двух антенн, расположенных на левом и правом бортах подводного аппарата. При отображении информации гидролокационное изображение формируется таким образом, что распространению зондирующих посылок в пространстве соответствует развертка изображения по строкам. При этом в

процессе движения аппарата эхосигналы каждого цикла зондирования представляют собой отдельную строку. В результате n циклов зондирования будет сформировано гидролокационное изображение поверхности морского дна. В процессе движения АНПА аналоговый эхосигнал каждой строки гидролокационного изображения преобразуется в цифровую форму и далее подвергается предварительной обработке, записывается в память бортового компьютера, а также может передаваться по каналу связи.

К основным задачам предварительной обработки гидролокационных изображений относятся фильтрация сигналов от шумов и временная (пространственная) автоматическая регулировка усиления (ВАРУ).

Необходимость фильтрации сигналов от шумов обусловлена тем, что прием гидроакустических сигналов всегда осуществляется на фоне помех. В общем случае шумы в гидроакустическом канале можно разделить

на внешние, собственные и реверберационные [2]. По характеру взаимодействия помехи классифицируются как аддитивные и мультипликативные. Аддитивные помехи по своей структуре могут быть флюктуационными, импульсными и гармоническими. Наиболее распространенной помехой является флюктуационная, представляющая собой бесконечную сумму излучений от разных источников шума, которые не связаны с полезным сигналом. К импульсным помехам относятся помехи в виде одиночных импульсов, возникающие, например, в процессе работы излучающей антенны. Действие помех приводит к зашумленности гидролокационного изображения и, следовательно, к ухудшению его зрительного восприятия при решении задач анализа и распознавания подводных объектов человеком-оператором.

В настоящее время наиболее популярным критерием [3] зашумленности изображений считается пиковое отношение сигнал/шум (PSNR). Согласно этому критерию вычисляется нормированное среднеквадратичное отклонение яркостных координат пикселей тестового изображения без шума и зашумленного изображения. При этом усреднение выполняется по всей площади изображения. Отношение максимального значения яркости к среднеквадратичному отклонению в логарифмическом масштабе определяет значение PSNR. Соответственно, чем ближе зашумленное изображение к оригинальному, тем больше значение PSNR и тем выше считается его качество. Однако эта и другие аналогичные метрики позволяют оценивать лишь среднеквадратичную разницу между изображениями, поэтому лучшие результаты с точки зрения ме-

трики не всегда соответствуют наилучшему визуальному восприятию. Например, зашумленное изображение, в котором присутствуют мелкие детали с невысоким контрастом, может иметь высокое значение PSNR даже в том случае, когда эти детали не различимы глазом на фоне помех.

В первой части статьи предлагается альтернативный критерий зашумленности гидролокационных изображений, в котором учитываются свойства зрительного восприятия контраста мелких деталей. Приводятся результаты сравнительного анализа базовых алгоритмов фильтрации изображений по объективному критерию оценки качества воспроизведения мелких деталей и по пиковому значению PSNR. Предлагается новый алгоритм фильтрации, позволяющий эффективно фильтровать импульсные помехи и сохранять при этом четкость изображения.

Необходимость применения временной автоматической регулировки усиления обусловлена следующими особенностями [1] принимаемых эхосигналов. Амплитуда акустического эхосигнала зависит от дальности приема сигнала в каждой точке диаграммы направленности антенны. При этом амплитуда отраженного сигнала в дальней зоне приема будет существенно ниже, чем в ближней зоне. Следовательно, для выравнивания контраста гидролокационного изображения вдоль строки требуется автоматическая регулировка усиления сигнала в зависимости от пространственного (временного) положения каждого отсчета. Такая регулировка обычно выполняется схемами временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ). Однако на завершающей стадии компьютерной обработки для повышения качества изо-

брожения обычно требуется ручная регулировка контраста изображения на его локальных участках.

Следующей актуальной задачей цифровой обработки гидролокационного изображения является его сжатие. Алгоритмы сжатия применяются для более компактного хранения гидролокационной информации на жестком диске или для передачи цифровых данных по узкополосным каналам связи. Использование алгоритмов сжатия с потерями обычно приводит к ухудшению качества наблюдаемого гидролокационного изображения. Традиционным объективным критерием качества изображений считается среднеквадратичный критерий (MSE) или пиковое отношение сигнал/шум (PSNR). К недостаткам таких критериев относится то, что они являются интегральными и не всегда соответствуют наилучшему визуальному восприятию мелких подводных деталей. В [4] описаны алгоритмы и объективные критерии анализа качества воспроизведения мелких деталей фото- и видеоизображений. Во второй части статьи исследуются вопросы сжатия гидролокационных изображений в реальном времени. Приводятся результаты сравнительного анализа эффективности сжатия и качества изображений на основе дискретно-косинусного преобразования, преобразования Хаара и вейвлет-преобразования.

В настоящее время существуют различные варианты компьютерных редакторов гидролокационных изображений. С помощью таких редакторов пользователь может выполнять фильтрацию изображения от шумов, изменять контраст и яркость отдельных участков изображения, масштабировать изображение, измерять и анализировать навигацион-

ные параметры и др. В третьей части работы приводится описание разработанного в Тихоокеанском государственном университете компьютерного редактора гидролокационных изображений. Описываются его функции и особенности, приводятся примеры обработки реальных гидролокационных изображений.

■ 1. ФИЛЬТРАЦИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Алгоритмы фильтрации изображений достаточно хорошо изучены и представлены в литературных источниках [5]. Известные алгоритмы фильтрации обычно специализируются на подавлении какого-то конкретного вида шума. Не существует пока универсальных фильтров, детектирующих и подавляющих все виды шумов. Однако многие шумы можно довольно хорошо приблизить моделью белого гауссова шума, поэтому большинство алгоритмов ориентировано на подавление именно этого вида шума. Основная проблема при фильтрации шума заключается в том, чтобы не испортить резкость границ деталей изображения, а также не потерять мелкие детали, соизмеримые по амплитуде с шумом.

Еще одной сложностью является оценка качества подавления шума. Как правило, качество оценивается следующим образом: на незашумленное изображение накладывается искусственный шум, затем полученное изображение фильтруется с помощью выбранного алгоритма и сравнивается с исходным изображением с помощью выбранной метрики. Чаще всего для этой цели используют метрику PSNR, которая для полутоновых изображений с пиковым значением сигнала яркости $Y_{\max} = 255$ определяется формулой:

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{255}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \tilde{Y}_i)^2}}, \quad (1)$$

где Y_i и \tilde{Y}_i – значения яркостей i -х пикселей двух сравниваемых изображений, N – общее число пикселей в изображении. Соответственно, чем ближе отфильтрованное изображение к оригинальному, тем больше значение PSNR и тем выше считается качество работы алгоритма. Как было отмечено выше, значение PSNR позволяет оценивать лишь среднеквадратичную разницу между изображениями, поэтому лучшие результаты с точки зрения метрики не всегда соответствуют наилучшему визуальному восприятию.

Рассмотрим альтернативный алгоритм анализа и критерий зашумленности гидролокационных изображений, в котором учитываются свойства зрительного восприятия контраста мелких деталей.

С целью анализа выполняется следующая предварительная обработка оригинального изображения. На первом этапе выполняется поиск фрагментов изображения в виде блоков с размером 3×3 пикселя, контраст которых соответствует установленным пределам. При этом контраст каждого блока вычисляется в нормированном равноконтрастном пространстве [4], в котором учитываются пороги зрительного восприятия мелких деталей по индексу яркости

$$\Delta K = \Delta W^* / \Delta W_{th}, \quad (2)$$

где $\Delta W^* = 3(W_{\max}^* - W_{\min}^*)$ – контраст блока оригинального изображения, определяемый числом минимальных порогов зрения (МЦП); ΔW_{th}^* – пороговое значение контраста, при котором мелкие детали различаются глазом. Значение индекса яркости в равнокон-

трастном цветовом пространстве [6] для каждого i -го пикселя блока вычисляется как $W_i^* = 25 Y_i^{1/3} - 17$.

Далее для анализа выбираются фрагменты с контрастом, удовлетворяющим условию $(1 \leq \Delta K \leq 4)$, и выполняется распознавание блоков изображения по следующим признакам: «точечный объект», «тонкая линия», «фрагмент текстуры». Алгоритм распознавания представлен в [7].

На втором этапе тестовое изображение зашумляется, где в качестве модели шума выбран аддитивный шум с гауссовым законом распределения. Далее вычисляется максимальное отклонение координат яркости оригинального и зашумленного изображений для каждого k -го блока:

$$\Delta_k = \max_{i,j,k} \sqrt{\left(\frac{W_{i,j,k}^* - \tilde{W}_{i,j,k}^*}{\Delta W_{th}^*} \right)^2} \quad (3)$$

и среднее значение отклонения цветовых координат для всех фрагментов изображения:

$$\bar{\Delta}_k = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Delta_k, \quad (4)$$

где M – количество фрагментов с мелкими малоконтрастными деталями.

В конечном итоге по значению отклонения $\bar{\Delta}_k$ и, следовательно, по значению снижения контраста мелких деталей принимается решение о степени зашумленности изображения. В качестве критерия выбрано простое правило: если снижение контраста не превышает один нормированный порог

$$\bar{\Delta}_k \leq 1, \quad (5)$$

то принимается решение о том, что мелкие детали различаются глазом на фоне помех и четкость зашумленного изображения существенно не снижается.

С целью исследования влияния шума на качество воспроизведения мелких деталей гидролокационных изображений



Рис. 1. Анализатор шума

авторами разработан компьютерный анализатор. Интерфейс пользователя анализатора показан на рис. 1.

Рассмотрим основные функции анализатора. Перед началом анализа пользователь открывает в первом окне оригинальное незашумленное изображение («Test Image» – «Open»).

Во втором окне на оригинальное изображение накладывается аддитивный шум. В качестве модели шума выбирается флюктуационный шум с гауссовым законом распределения (Noise 1) или импульсный шум (Noise 2). Уровень шума

задается в процентном отношении к максимальной амплитуде сигнала Y_i .

При нажатии кнопки «Analysis» программа анализирует два изображения и выполняет алгоритм вычисления величины $\bar{\Delta}_k$ (4). При этом результат появляется в окошке «Error». Также в окошке «PSNR» появляется вычисленное значение пикового отношения сигнал/шум (1). Таким образом, по результатам анализа значения $\bar{\Delta}_k$ пользователь принимает решение о степени зашумленности гидролокационного изображения.

В качестве примера в табл. 1 приведены экспериментальные зависимости $\bar{\Delta}_k$ и PSNR от среднеквадратичного значения σ аддитивного гауссова шума в яркостном канале для тестового фрагмента гидролокационного изображения.

На рис. 2 показаны фрагменты гидролокационного изображения с различным уровнем зашумленности. Анализ качества зашумленных изображений показывает, что при значении шума в канале яркости $\sigma \leq 2\%$ условие (5) выполняется.

При этом снижение контраста мелких деталей малозаметно для глаза, и влияние помех не снижает качество зрительного восприятия изображения. Таким образом, разработанный критерий, в отличие от метрики PSNR, позволяет объективно оценивать влияние шума на снижение четкости мелких деталей изображений.

Таблица 1. Зависимости $\bar{\Delta}_k$ и PSNR от среднеквадратичного отклонения шума

| $\sigma, \%$ | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\bar{\Delta}_k$ | 0,30 | 0,57 | 0,84 | 1,08 | 1,40 | 1,68 | 1,96 | 2,24 | 2,54 | 2,82 |
| PSNR | 47,8 | 44,9 | 43,3 | 42,0 | 41,0 | 40,3 | 39,6 | 39,0 | 38,5 | 38,1 |

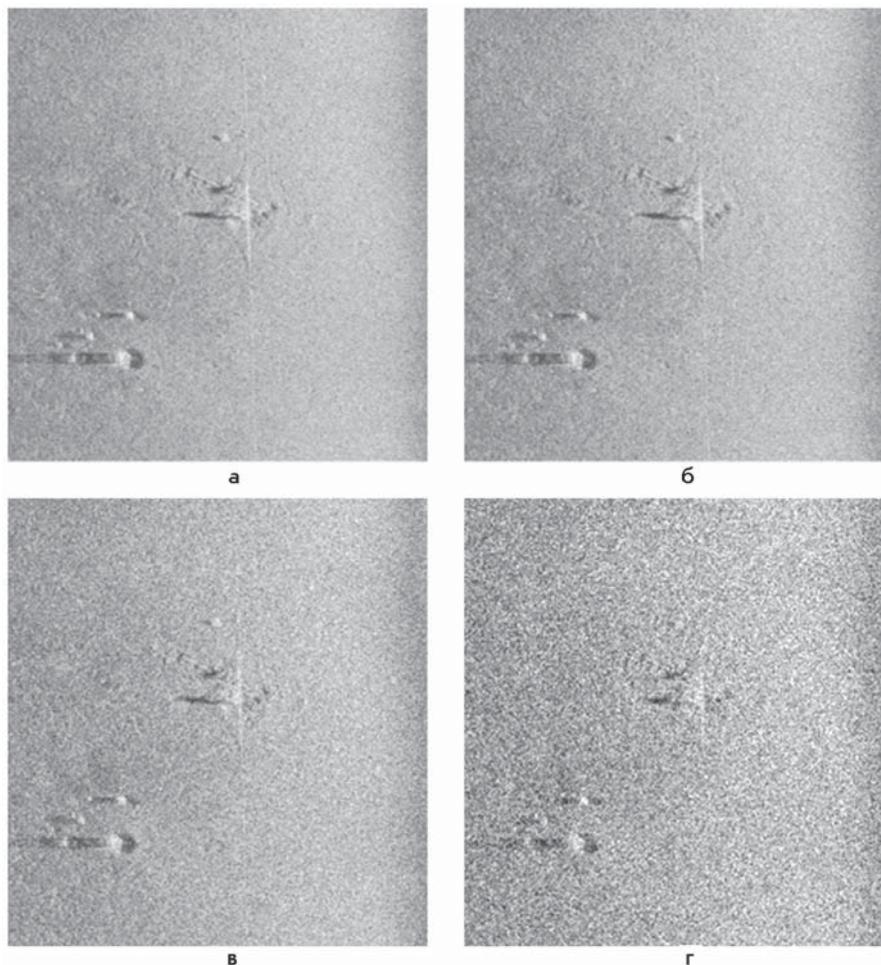


Рис. 2. Фрагменты тестового изображения: а) $\sigma = 0\%$, $\bar{\Delta}_k = 0$; б) $\sigma = 2\%$, $\bar{\Delta}_k = 1,08$; в) $\sigma = 5\%$, $\bar{\Delta}_k = 2,82$; г) $\sigma = 10\%$, $\bar{\Delta}_k = 5,85$

Очевидно, что компьютерный анализатор также может быть использован для оценки эффективности работы алгоритмов фильтрации шума. В этом случае во втором окне необходимо открыть отфильтрованное изображение и выполнить анализ.

Из известных алгоритмов фильтрации изображений можно выделить следующие базовые алгоритмы шумоподавления [3]: 1) линейное усреднение пикселей; 2) медианная фильтрация; 3) гауссовское размытие. К особенностям формирования гидролокационного изображения относится то, что в реальном времени оно формируется построчно. Следовательно, алгоритмы фильтрации должны обрабатывать пиксели

изображения также построчно.

Исследуем влияние базовых алгоритмов фильтрации на эффективность подавления шума и на качество воспроизведения мелких деталей гидролокационного изображения.

Простейшая идея фильтрации шума заключается в усреднении значений пикселей в пространственной окрестности. Для каждого пикселя анализируются соседние для него пик-

сели, которые располагаются в окне слева и справа от этого пикселя. Чем больше взят размер окна, тем сильнее происходит усреднение. Самый простой вариант фильтрации – когда в качестве нового значения центрального пикселя выбирается среднее арифметическое всех пикселей в окне.

Медианная фильтрация – это стандартный способ подавления импульсного шума. Для каждого пикселя в окне ищется медианное значение и присваивается этому пикслю. Определение медианного значения: если массив пикселей в окне отсортировать по их значению, медианой будет средний элемент этого массива.

Гауссовское размытие – это свертка изображения с функцией $g(x) = A \cdot \exp[-x^2 / \delta^2]$, где параметр δ задает степень размытия, а параметр A обеспечивает нормировку. Фактически, это то же усреднение, только пиксель смешивается с окружающими по определенному закону, заданному функцией Гаусса.

С целью анализа эффективности шумоподавления базовыми алгоритмами фильтрации воспользуемся компьютерным анализатором (рис. 1). Для этой цели на первом этапе обработки выполним два варианта зашумления тестового фрагмента гидролокационного изображения: флюктуационным и импульсным шумом со следующими параметрами. Для флюктуационного шума устанавливаем $\sigma = 10\%$, при этом среднее отклонение контраста мелких

Таблица 2. Зависимости $\bar{\Delta}_k$ и PSNR от типа фильтра

| Filter | Average | Median | Gaussian | Noise |
|------------------|---------|--------|----------|-------------|
| $\bar{\Delta}_k$ | 3,25 | 3,74 | 3,02 | Fluctuation |
| PSNR | 36,94 | 36,35 | 37,26 | |
| $\bar{\Delta}_k$ | 3,23 | 2,07 | 3,41 | Impulse |
| PSNR | 38,44 | 41,15 | 39,39 | |

деталей равно $\bar{\Delta}_k = 5,85$ и значение PSNR = 35,04 дБ. Для импульсного шума устанавливаем $\sigma = 80\%$ и вероятность его появления $P = 0,2$, при этом среднее отклонение контраста мелких деталей равно $\bar{\Delta}_k = 11,3$ и значение PSNR = 41,6 дБ.

На втором этапе выполняется фильтрация зашумленных изображений и оценивается качество шумоподавления по значению $\bar{\Delta}_k$.

В табл. 2 приведены результаты анализа качества шумоподавления для трех базовых алгоритмов, где размер окна фильтров задан тремя пикселями.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Лучшие характеристики при фильтрации флуктуационного шума имеет гауссовский фильтр.

2. Лучшие характеристики при фильтрации импульсного шума имеет медианный фильтр.

3. Для заданных параметров шума в канале яркости условие (5) после фильтрации изображений не выполняется. Следовательно, для повышения качества воспроизведения мелких деталей требуется повысить отношение сигнал/шум в исходном изображении или использовать более оптимальный метод фильтрации.

В настоящей работе предложен оригинальный метод фильтрации импульсных помех гидролокационных изображений, основанный на вероятностных методах обнаружения и распознавания импульсной помехи, а также на методе предсказания.

Суть метода заключается в следующем.

На первом этапе вычисляются среднее значение M и среднеквадратичное отклонение σ сигнала S в строке изображения:

$$M_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n; \quad (6)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S_n - M_s)^2},$$

где N – число элементов в строке.

На втором этапе проверяется условие

$$|S_{n+2} - S_n| > a_1 \cdot \sigma_s, \quad (7)$$

$$|S_{n+2} - M_s| > a_2 \cdot \sigma_s,$$

где $n = 1 \dots (N-2)$; a_1 и a_2 – постоянные коэффициенты.

Если условие (7) выполняется, считаем, что элемент строки изображения с номером $(n+2)$ является импульсной помехой,

и он заменяется с помощью следующего выражения:

$$S_{n+2} = (S_{n+1} + S_n) / 2. \quad (8)$$

Если условие (7) не выполняется, то элемент строки изображения S_{n+2} не изменяется. Коэффициенты a_1 и a_2 подобраны экспериментально. В частности, на основе анализа реальных гидролокационных изображений получено, что эффективное шумоподавление достигается при значениях $a_1 = 1,5$ и $a_2 = 2,0$.

На рис. 3 показаны фрагменты зашумленного гидролокационного изображения: б – до фильтрации; в – после медианной фильтрации; г – после фильтрации новым методом.

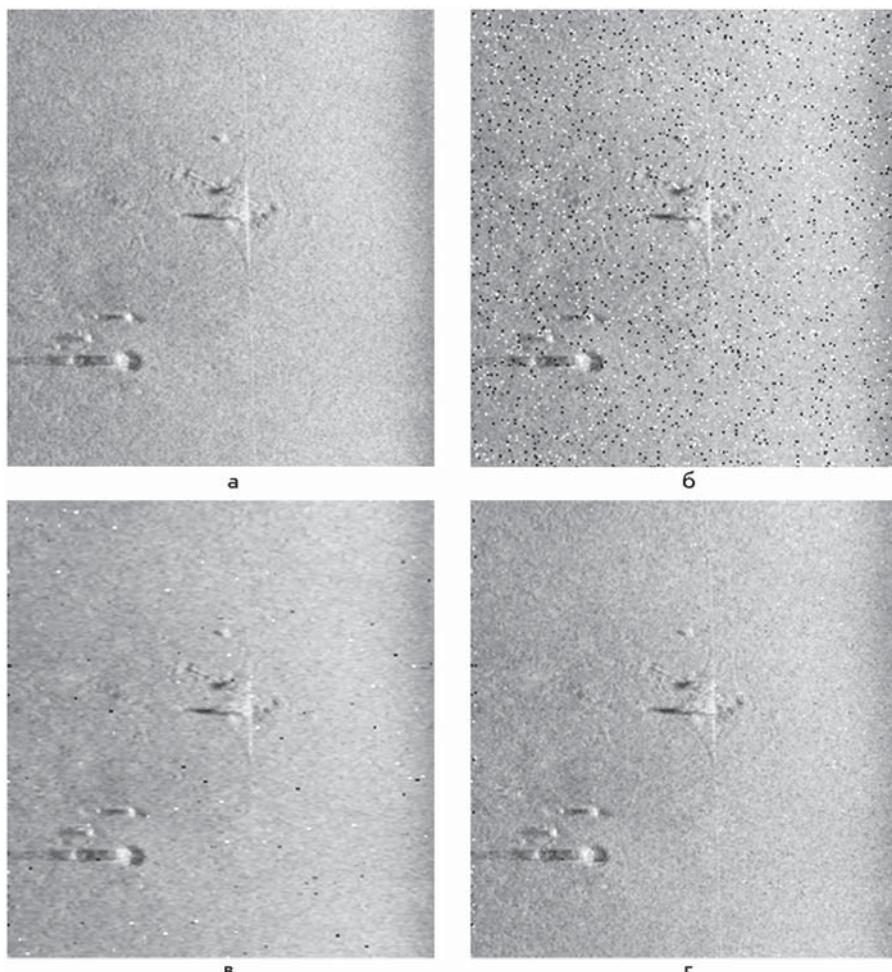


Рис. 3. Фрагменты тестового изображения: а – тестовое изображение; б – зашумленное изображение ($\sigma = 80\%$, $\bar{\Delta}_k = 11,3$); в – после медианной фильтрации ($\bar{\Delta}_k = 2,07$); г – после фильтрации новым методом ($\bar{\Delta}_k = 1,06$)

Как показали результаты экспериментов, в отличие от известных методов фильтрации импульсного шума [8], предлагаемый метод имеет такое преимущество, как сохранение качества воспроизведения мелких структур подводных изображений с высокой степенью подавления импульсных помех.

■ 2. СЖАТИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Основной проблемой при разработке системы технического зрения АНПА в реальном времени является ограничение полосы пропускания канала связи. В частности [1], скорость передачи информации по существующим гидроакустическим каналам связи может не превышать 3...4 кбит/с.

В качестве примера рассмотрим следующие характеристики сигналов гидролокационного изображения. Полагаем, что период зондирующих импульсов равен 0,5 с и частота дискретизации аналоговых сигналов, получаемых от антенн левого и правого борта АНПА, равна 3,2 кГц. В этом случае имеем по 1600 пикселей для каждой строки передаваемого изображения. Полагая, что каждый отсчет имеет байтовую структуру, получим, что скорость цифрового потока входных данных равна 32 кбит/с. Таким образом, для передачи сигналов по гидроакустическому каналу связи необходимо обеспечить сжатие цифрового потока примерно в 8...10 раз и при этом сохранить достаточно высокое качество изображения.

В настоящее время наиболее эффективными методами сжатия статических фотоизображений считаются стандарты JPEG и JPEG 2000, основанные на дискретном косинусном преобразовании (DCT) и на вейвлет-

преобразовании (DWT). Известно, что по сравнению с другими типами ортогональных преобразований DCT и DWT имеют лучшие результаты кодирования изображений по значению среднего квадрата ошибки (MSE) или по значению PSNR, т.е. по глобальным мерам качества. Поэтому другие типы преобразований практически не используются для сжатия изображений. В работе [9] для сжатия изображений в качестве альтернативного варианта исследовано преобразование Хаара (DHT). Ниже приводятся результаты сравнительного анализа эффективности кодирования сигналов гидролокационных изображений для трех типов преобразований – DCT, DHT и DWT.

В отличие от обычных фотоизображений гидролокационные изображения обладают анизотропией, поскольку разрешающая способность ГБО по дальности (т.е. вдоль строки) на порядок выше, чем вдоль линии перемещения антенны. Как следствие, значения пикселей, взятых из нескольких строк ГБО-изображения на одной и той же дальности, коррелированы в гораздо большей степени, чем значения соседних пикселей на одной строке.

В качестве примера рассмотрим следующие характеристики сигналов гидролокационного изображения. Полагаем, что период зондирующих импульсов равен 0,5 с и частота дискретизации аналоговых сигналов, получаемых от антенн левого и правого борта АНПА, равна 32 кГц. В этом случае имеем по 16000 пикселей для каждой строки передаваемого изображения. Полагая, что каждый отсчет имеет байтовую структуру, получим, что скорость цифрового потока входных данных равна 256 Кбит/с. Таким образом, для передачи сигналов по гидроакустическому каналу связи необходимо обеспечить сжатие цифрового потока при-

мерно в 80...100 раз и при этом сохранить качество изображения.

С целью сокращения избыточности сигнала по дальности в режиме реального времени выполним предварительную низкочастотную фильтрацию и прореживание отсчетов строки гидролокационного изображения. Прореживание в 10...15 раз позволяет, во-первых, уменьшить анизотропию изображения и, во-вторых, снизить коэффициент сжатия в кодере до 8...10 раз.

Рассмотрим алгоритм сжатия гидролокационного изображения на основе DCT и DHT в реальном масштабе времени.

В процессе движения АНПА сигналы изображения после аналогово-цифрового преобразования поступают построчно на вход блока кодирования, где записываются в буферное запоминающее устройство (RAM) емкостью в 16 строк. После записи первых восьми строк начинается процесс преобразования поблочно, где размер блока равен 8×8 пикселей. В это же время данные последовательно записываются во вторую половину RAM.

Выполнение DCT или DHT реализовано с помощью последовательности матричных перемножений. Прямое дискретное косинусное преобразование или преобразование Хаара описываются следующими выражениями:

$$P_{DCT} = M_{DCT} \cdot P \cdot M_{DCT}^T;$$

$$P_{DHT} = M_{DHT} \cdot P \cdot M_{DHT}^T,$$

где P – блок размером 8×8 пикселей; P_{DCT} , P_{DHT} – блоки коэффициентов DCT или DHT; M – прямая матрица преобразования; M^T – транспонированная матрица.

После преобразования коэффициенты трансформации, значение которых меньше пороговой величины Q , обнуляются. Далее для каждого блока выполняется сжатие модифи-

цированным методом RLE. Очевидно, что эффективность сжатия и качество изображения в большой степени зависит от величины Q .

Рассмотрим алгоритм вейвлет-преобразования.

В отличие от двумерного поблочного преобразования здесь используется одномерное преобразование строки гидролокационного изображения. Таким образом, емкость RAM равна двум строкам изображения.

Для первой итерации вейвлет-преобразования строки изображения вычисляем [10]:

$$H_j^{(i)} = \sum_{k \in Z} X_{2j+k}^{(i+1)} h_k; \quad G_j^{(i)} = \sum_{k \in Z} X_{2j+k}^{(i+1)} g_k,$$

где $H_j^{(i)}$ – низкочастотные вейвлет-коэффициенты, $G_j^{(i)}$ – высокочастотные вейвлет-коэффициенты, X_j – входная последовательность отсчетов, h_k и g_k – низкочастотная и высокочастотная составляющие материнского вейвлета.

Далее вейвлет-коэффициенты, вычисленные на предыдущем шаге преобразования, сравниваются со значениями пороговых коэффициентов. Если величина вейвлет-коэффициентов окажется меньше величины соответствующих пороговых коэффициентов, то их значения обрашаются в ноль.

После порогового квантования полученные значения вейвлет-коэффициентов сохраняются в выходном массиве преобразования, а массив НЧ-составляющих, размер которого в два раза меньше первоначального, является входным сигналом для следующей итерации вейвлет-преобразования:

$$H_j^{(i)} = \sum_{k \in Z} H_{2j+k}^{(i+1)} h_k;$$

$$G_j^{(i)} = \sum_{k \in Z} H_{2j+k}^{(i+1)} g_k.$$

Количество итераций преобразования можно варьировать от одной и до такого количества, что после последней итерации число вейвлет-коэффициентов и НЧ составляющих сигнала будет меньше размера окна синтезирующего фильтра. Оптимальное число итераций [11] вейвлет-преобразования – от 3 до 5. После выполнения преобразования строка вейвлет-коэффициентов кодировалась модифицированным методом RLE. Коэффициенты порогового квантования для каждой итерации преобразования подбирались опытным путем, по критерию достижения наилучшего качества восстановленного изображения при максимальном коэффициенте сжатия. Отметим, что величина пороговых коэффициентов уменьшается по мере увеличения уровня вейвлет-преобразования, т.е. по мере увеличения их влияния на результат реконструкции изображения.

В [9] исследовано влияние на эффективность сжатия следующих типов материнских вейвлетов – Хаара, Добеши [11]. В результате экспериментов получено, что оптимальной схемой для сжатия сигналов гидролокационных изображений с достаточным качеством является схема, реализуемая четырьмя итерациями фильтра Добеши.

Выполним сравнительный анализ эффективности кодирования сигналов гидролокационных изображений на основе DCT, DPT или DWT. С этой целью воспользуемся компьютерным анализатором, показанным на рис. 1. Во втором окне интерфейса анализатора открываем декодированное изображение после выбранного преобразования. Далее выполняются вычисления (1)–(4) и ставится оценка качества изображений по значению $\bar{\Delta}_k$. В табл. 3 показаны экспериментальные зависимости коэффициента сжатия

C_f тестового гидролокационного изображения от пороговых коэффициентов для трех преобразований. Для анализа был выбран тестовый фрагмент изображения морского дна размером 1600×500 пикселей. Здесь же приведены значения $\bar{\Delta}_k$ и PSNR. В таблице значение Q для вейвлет-преобразования соответствует первой итерации.

На рис. 4. показаны примеры фрагментов тестового изображения (260×280) до сжатия и после декодирования для примерно одинаковых значений параметра качества $\bar{\Delta}_k \approx 2,1$. В табл. 3 данная строка параметров выделена цветом.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Коэффициенты сжатия гидролокационных изображений после обработки DCT или DHT примерно одинаковы. Визуальное сравнение качества изображений также дает примерно одинаковый результат. Вейвлет-преобразование уступает как по эффективности, так и по визуальному качеству изображений, что объясняется, в первую очередь, применением одномерного преобразования и особенностью гидролокационных изображений, в которых преобладают зернистые структуры и практически отсутствуют плавные переходы яркостей.

Таким образом, преобразование Хаара является конкурентоспособным ДКП и является более предпочтительным при обработке сигналов гидролокационных изображений как по эффективности сжатия, так и по качеству изображений.

■ 3. КОМПЬЮТЕРНЫЙ РЕДАКТОР ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время существуют различные варианты компьютерных редакторов

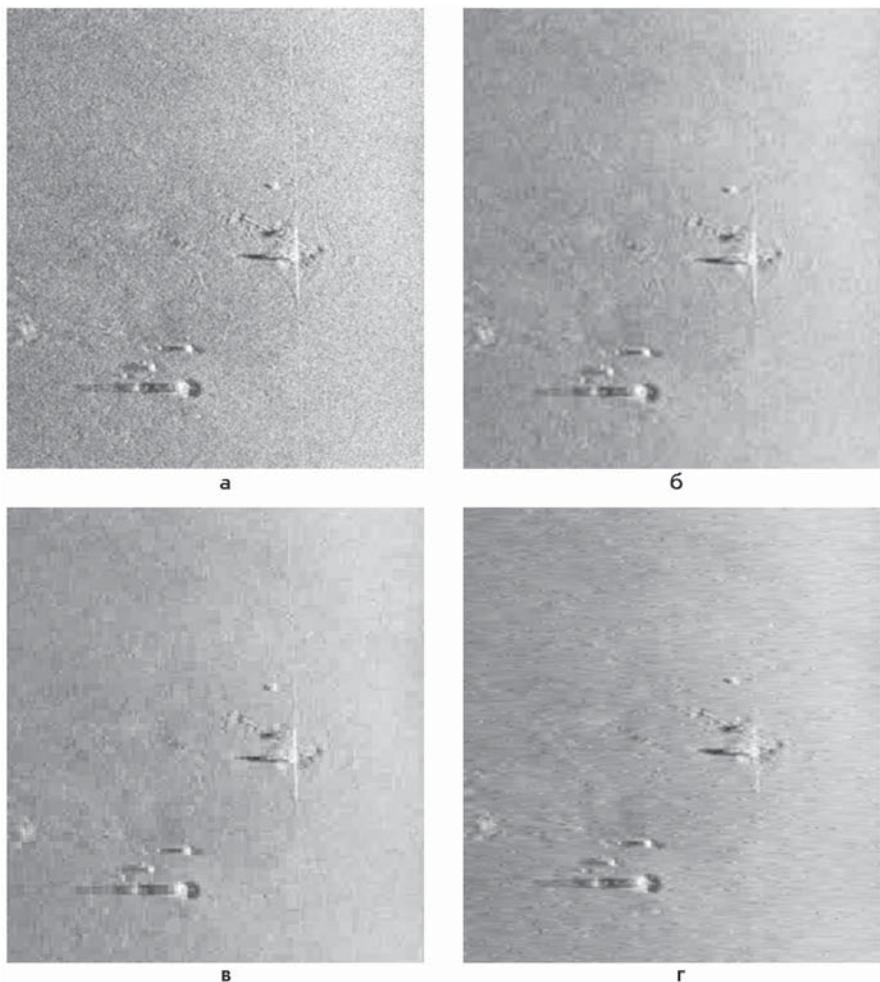


Рис. 4. Фрагменты тестового изображения: а – тестовое изображение; б – DCT, Cf = 9,16; в – DHT, Cf = 9,51; г – DWT, Cf = 6,8

гидролокационных изображений. С помощью таких редакторов пользователь может выполнять различные функции обработки и анализа гидролокационной информации. Ниже приводится описание компьютерного редактора гидролокационных изображений, разработанного в совместной

исследовательской лаборатории ИПМТ ДВО РАН и ТОГУ.

Программа гидролокационного редактора работает с файлами с расширением *.gbo, где регистрируется собственно эхосигналы гидролокационного изображения (оцифрованные и сжатые до разрядности 8), и с дополнительными файлами

Таблица 3. Зависимости коэффициента сжатия тестового изображения от порога Q

| DCT | | | | DHT | | | | DWT | | | |
|-----|-------|------------------|-------|-----|-------|------------------|-------|-----|------|------------------|-------|
| Q | Cf | $\bar{\Delta}_k$ | PSNR | Q | Cf | $\bar{\Delta}_k$ | PSNR | Q | Cf | $\bar{\Delta}_k$ | PSNR |
| 1 | 3,44 | 1,69 | 40,89 | 1 | 3,49 | 1,72 | 40,79 | 6 | 3,06 | 1,39 | 40,80 |
| 2 | 6,14 | 1,98 | 40,23 | 2 | 6,31 | 2,02 | 40,14 | 12 | 5,17 | 1,84 | 39,87 |
| 3 | 9,16 | 2,14 | 39,92 | 3 | 9,51 | 2,16 | 39,84 | 18 | 6,89 | 2,06 | 39,50 |
| 4 | 12,22 | 2,23 | 39,73 | 4 | 12,73 | 2,27 | 39,66 | 24 | 8,00 | 2,31 | 39,17 |
| 5 | 15,04 | 2,29 | 39,61 | 5 | 15,71 | 2,32 | 39,55 | 30 | 8,17 | 2,42 | 38,99 |

с расширением *.idx, где регистрируется вспомогательная информация (время, сигналы с навигационных датчиков и т.д.). Программа реализована на языке C++ в среде разработки C++Builder 6.

Гидролокационные файлы формируются в процессе движения АНПА и записываются на жесткий диск бортового компьютера. Для буксируемого или привязанного АНПА предусмотрен режим построчной передачи гидролокационной информации через модем по кабельному каналу связи с целью наблюдения гидролокационного изображения в реальном времени.

Интерфейс пользователя

Программа представляет собой многооконный просмотрщик (рис. 5), позволяющий открыть несколько файлов (количество ограничено памятью компьютера) и разместить их на экране в виде, удобном для анализа (каскадом, вертикально, горизонтально). Панель инструментов и строка состояния могут отключаться.

Каждое окно с изображением имеет в верхней части информацию о название файла с указанием папок, где он находится.

В режиме «Editing» пользователь может выделить прямоугольный фрагмент изображения с целью его более детального просмотра.

При сохранении обработанного файла с целью предотвращения стирания исходной информации предусмотрена опция «Save As...». В этом случае пользователь выделяет файл полностью или его прямоугольный фрагмент (размер строк не изменяется), и в окне появляется таблица с пересчитанными навигационными параметрами о галсе (описание приведено ниже). Далее обработанный файл можно сохранить с произвольным именем.

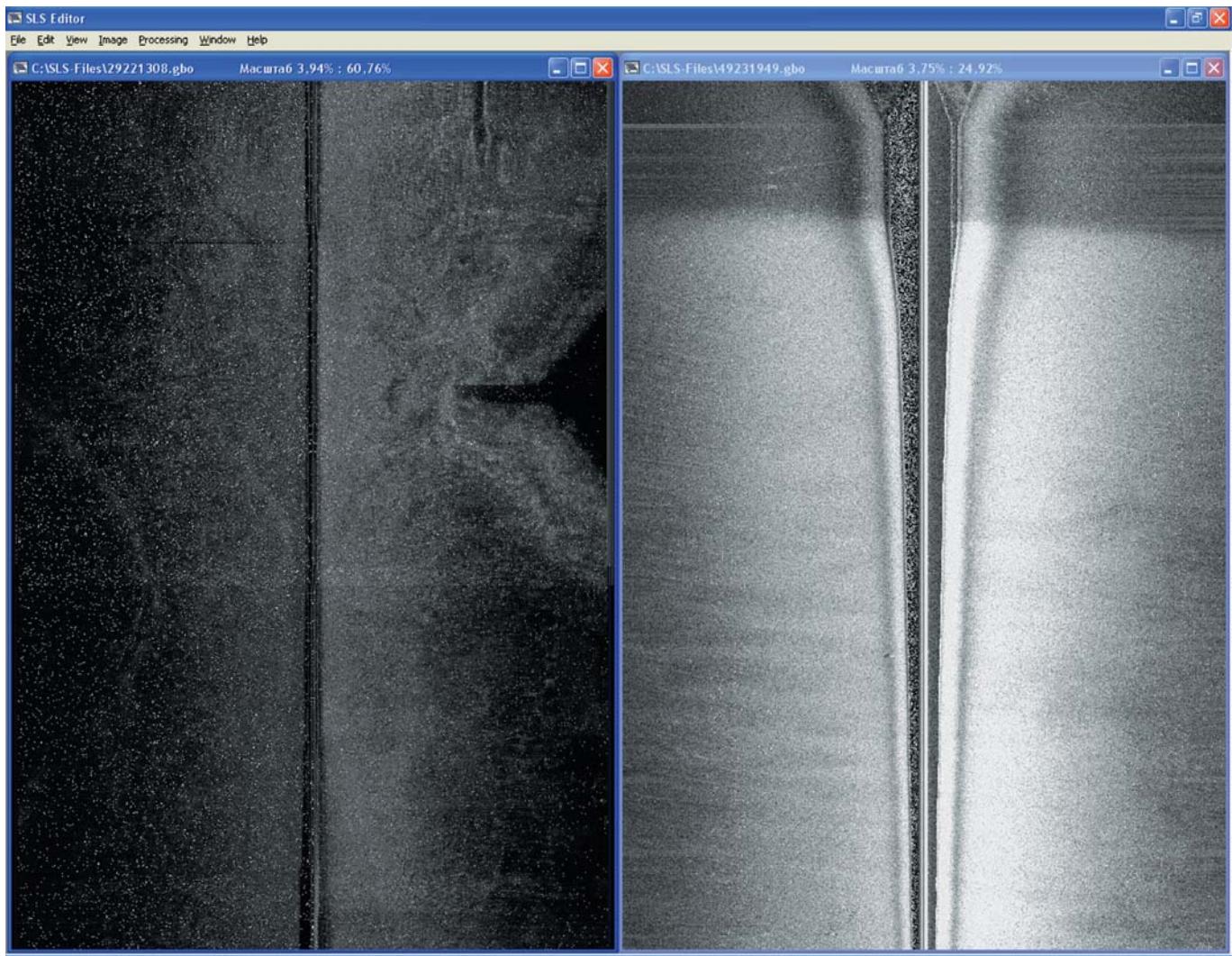


Рис. 5. Интерфейс пользователя

Масштабирование

Масштаб (панель инструментов: «View»—«Scale») может быть выбран произвольным до 100% по ширине и высоте без сохранения пропорций.

В окне «Scale» пользователь может выбрать следующие типы масштабирования: «On width of the screen», «Proportionally», «Without of proportions», «On all screen».

Тип масштабирования «Proportionally» позволяет просматривать изображения с реальным соотношением размеров по ширине и высоте за счет прореживания пикселей по горизонтали с целью выравнивания пространственных межэлемент-

ных интервалов вдоль строки и между строк зондирования.

К особенностям масштабирования относится применение предварительной низкочастотной фильтрации строк изображения в случае уменьшения его размера. При этом размер окна усредняющего фильтра выбирается как величина отношения размера исходного изображения к размеру его уменьшенной копии.

Режимы обработки изображения

Обработка изображений представлена следующими известными методами [12]:

- инверсия;
- настройка яркости – линейное увеличение и уменьшение,

автоматическая настройка по всему изображению и отдельно по левому и правому борту;

- изменение палитры на полуточновую и цветную «Sepia»;
- медианная фильтрация (по строкам и по столбцам с произвольными нечетными размерами окна);
- низкочастотная фильтрация (одномерная, двумерная, двумерная гауссовая фильтрация).

Дополнительно к известным методам в программе реализован новый метод фильтрации импульсных помех, описание которого приведено в [4]. Панель инструментов: «Image»—«Filters»—«New Filter».

В программе реализован оригинальный метод временной автоматической регулировки

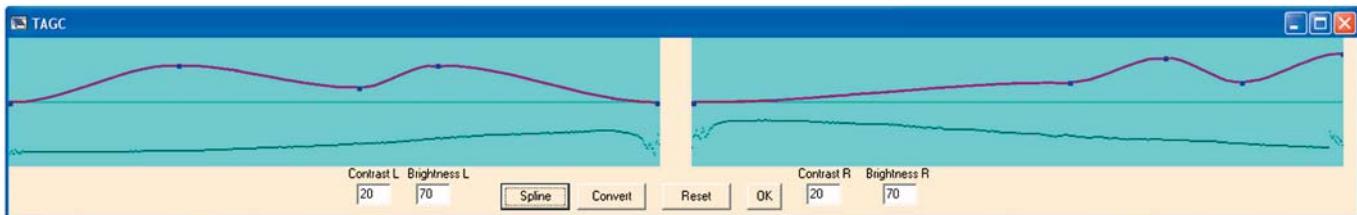


Рис. 6. Окно TAGC

усиления (TAGC) сигналов гидролокационного изображения. На рис. 6 показан пример окна TAGC, которое вызывается через панель инструментов: «Image»—«TAGC».

При инициализации появляются графики распределения амплитуд сигнала вдоль строк для каждого борта. Каждая точка на графике представлена как среднее значение яркостей всех строк. В «окошках» для левого и правого борта указаны исходные значения яркости (Y) и контраста (C) в процентном соотношении к половине максимальной амплитуды сигнала.

После инициализации режима TAGC пользователь может выполнять следующие функции:

1. Устанавливать яркость и контраст изображения раздельно по каждому борту. После установки значений – нажать «Convert» и смотреть результат. Если результат не устраивает – нажать «Reset», при этом выполняется сброс всех настроек и изображение восстанавливается к исходному виду. Далее можно установить новые значения.

2. Регулировать контраст на выбранных участках изображения с помощью построения графика TAGC. При нажатии кнопки «Splain» появляются горизонтальные оси графика TAGC. При нажатии кнопки «мыши» в любой точке левой или правой панели появляется третья точка гра-

фика ВАРУ, при следующем нажатии – четвертая и т.д. (до 100 точек). График рисуется по кубическому сплайну. После построения графика нажимается кнопка «Convert» и для каждого n -го пикселя строки для левого или для правого борта выполняется следующее преобразование:

$$\tilde{S}(n) = SPF(n) \cdot S(n) \cdot K_C + K_Y,$$

где $SPF(n)$ – сплайн-функция; K_C и K_Y – установленные коэффициенты контраста и яркости.

Отметим следующие достоинства разработанной программы TAGC:

- Точки графика можно перемещать произвольно в любом направлении, для этого достаточно поместить курсор в выбранную точку и, удерживая левую клавишу «мыши», выполнить перемещение.
- Для устранения перенасыщения сигнала в программе для каждой строки (раздельно по каждому борту) вычисляется среднее значение и среднее отклонение от среднего. Если при настройках яркости, контраста и TAGC сигнал выходит в насыщение, автоматически снижается коэффициент усиления или яркость для каждой точки строки.

На рис. 7, 8 показаны примеры изображения до обработки (рис. 7) и после обработки (рис. 8): фильтрации импульсных помех («New Filter») и регулировки TAGC.

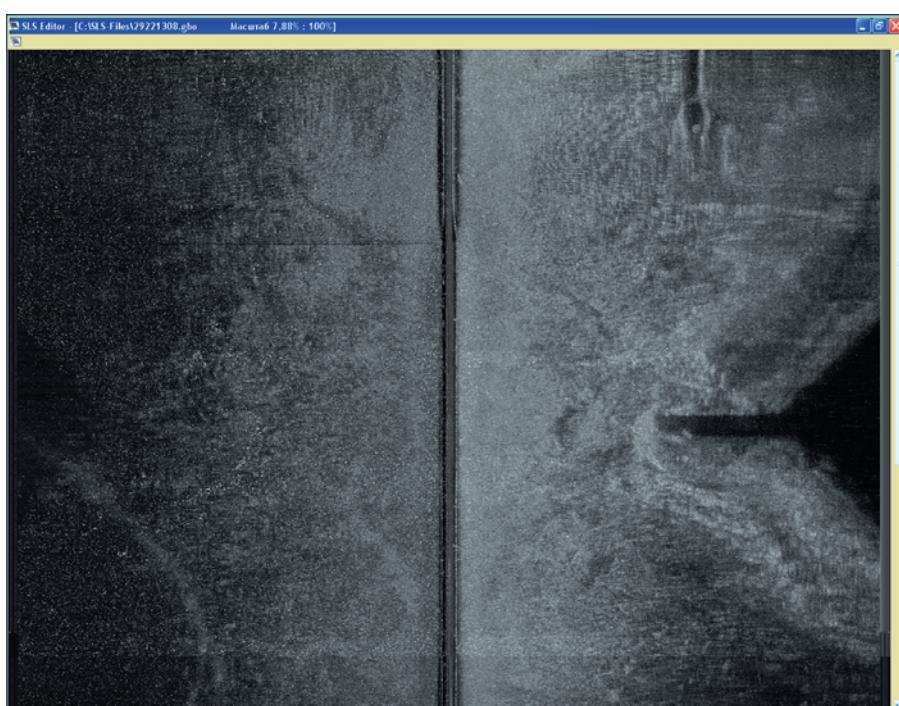


Рис. 7. Пример изображения до обработки

Режимы анализа и измерения навигационных параметров

Анализ навигационных параметров производится на основе дополнительного *.idx файла. Наиболее важными параметрами являются: время начала и окончания галса, широта и долгота начала и конца галса, период зондирования и др. На их основе рассчитываются: средняя скорость, длина галса, путевая дискретность, дискретность (в метрах) вдоль строки и другие параметры.

Таблицу параметров с полученной информацией о галсе можно посмотреть через панель инструментов: «Processing» – «Task». Пользователь также может посмотреть более подробную навигационную информацию о заголовке («Processing» – «IDX-file» – «Header») и о каждой строке («Processing» – «IDX-file» – «Data»). При просмотре данных о каждой строке предусмотрена возможность выбора строк с помощью кнопок «Step» и «Next line number».

Приведем соотношения, необходимые для расчета навигационных параметров в фиксированных точках гидролокационного изображения.

Угловые координаты гидролокационных целей ($\varphi_{u,i}, \lambda_{u,i}$), зафиксированных на эхограммах ГБО, определяются на основании формул [13]:

$$\varphi_{u,i} = \varphi_{\Gamma,i} + \sin(-\kappa) \cdot \left(\frac{D}{R_{\varphi_0}} \right), \quad (9)$$

$$\lambda_{u,i} = \lambda_{\Gamma,i} + \cos(\kappa) \cdot \left(\frac{D}{R_{\varphi_0} \cdot \cos(\varphi_0)} \right), \quad (10)$$

где $\varphi_{\Gamma,i}, \lambda_{\Gamma,i}$ – координаты антенны ГБО в i -й момент времени, полученные из IDX-файла; κ – текущие значения курса для

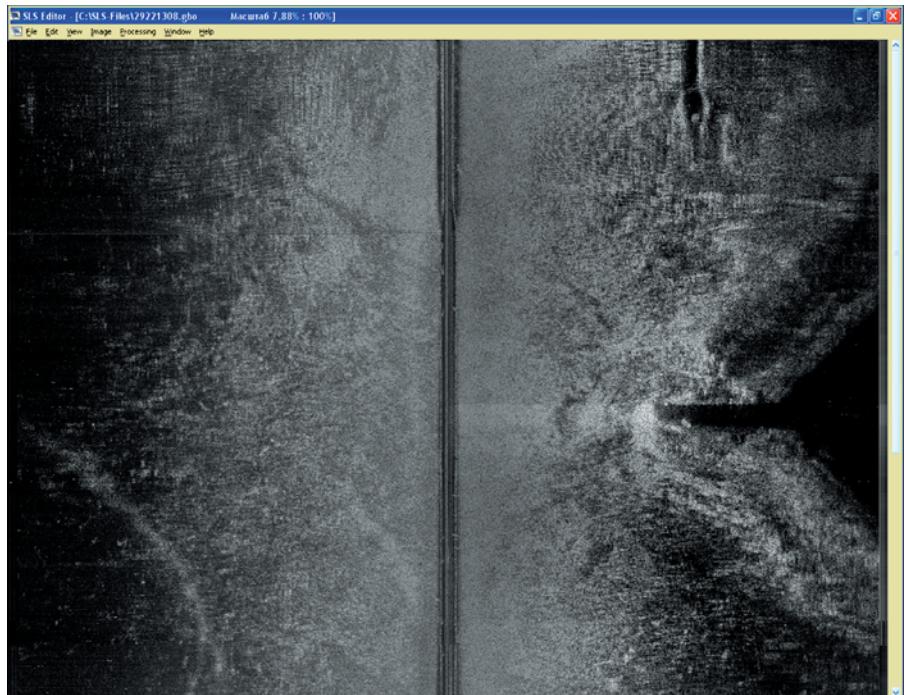


Рис. 8. Пример изображения после обработки

i -й строки; $R\varphi$ – значение радиуса Земли на средней широте φ ; D – полоса обзора по каждому борту.

В случае буксируемого аппарата вводится поправка между координатами антенны ГБО и GPS.

Так как текущие значения курса κ при съемке с борта АНПА не всегда содержатся в данных IDX-файла, то в этом случае программа использует приближенные вычисления, где вместо значения курса в выражениях (9), (10) подставляется величина $k = \eta_T + \delta_k$, где η_T – осредненное на некотором интервале текущее значение путевого угла, а величина δ_k – угловая добавка к текущему путевому углу, характеризующая боковой снос АНПА. Величина δ_k вводится вручную.

Текущее значение путевого угла в i -й точке оценивается по приближенной формуле:

$$\eta_{T,i} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_{i-B} \cdot \cos \varphi_0}{\varphi_i - \varphi_{i-m}}, \quad (11)$$

где φ_i и λ_i – широта и долгота антенны ГБО в i -й момент времени, φ_{i-m} и λ_{i-m} – широта и долгота антенны ГБО в $i-m$ -й момент времени.

Значение m для буксируемого аппарата вычисляется на основе заданного значения горизонтального проложения кабеля (т.е. на основе заданного расстояния между антеннами ГБО и GPS), а для АНПА (в случае отсутствия значений курса) κ в каждой скан-строке задается вручную.

Вычисление m на основе заданного значения горизонтального проложения кабель-троса производится следующим образом.

По формуле

$$\delta L_\Gamma = R_{\varphi_0} \sqrt{(\varphi_i - \varphi_{i-m})^2 + (\lambda_i - \lambda_{i-m})^2 \cos^2 \varphi_0} \quad (12)$$

в цикле с наращиванием m вычисляется длина отрезка δL_Γ между точками с координатами (φ_i, λ_i) и $(\varphi_{i-m}, \lambda_{i-m})$. Длина этого отрезка постоянно сравнивается с введенным

значением горизонтального проложения. Как только δL_T превысит величину горизонтального проложения, цикл по m останавливается и по формуле (11) вычисляется значение η_T для полученного m .

Далее, подставляя $k = \eta_T + \delta_k$ в формулы (9), (10), получим скорректированные координаты целей ГБО с учетом горизонтального проложения кабель-троса:

$$\varphi_{u,i} = \varphi_{T,i-m} + \frac{D}{R_{\varphi_0}} \cdot \sin(-(\eta_{Ti} + \delta_k)), \quad (13)$$

$$\lambda_{u,i} = \lambda_{T,i-m} + \frac{D}{R_{\varphi_0} \cdot \cos(\varphi_0)} \cdot \cos(\eta_{Ti} + \delta_k) \quad (14)$$

Перед началом измерений пользователь в окне настройки («Processing»–«Option») устанавливает начальные параметры. Далее параметры начальной установки используются при вычислении координат цели. В процессе измерений («Processing»–«Measurement») фиксируется начальная точка, и далее после перемещения до следующей точки в таблице отображаются навигационные параметры. Программа позволяет выделять произвольную область, и при этом в таблице фиксируются ее навигационные параметры. Отметим, что при рисовании контура последняя точка соединяется с первой точкой с помощью нажатия правой клавиши «мыши».

В целом, разработанная программа является достаточно эффективной для анализа и обработки гидролокационных изображений морского дна, включает оригинальные решения и представляет собой конкурентоспособный продукт по сравнению с аналогами [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируем основные результаты работы. Представленные выше критерии, алгоритмы и программа-редактор позволяют:

- проводить анализ зашумленности изображений с учетом контраста мелких деталей,
- эффективно фильтровать импульсные помехи и сохранять при этом четкость изображения,
- выполнять оценки для сравнительного анализа эффективности сжатия изображений в реальном времени на основе дискретно-косинусного преобразования, преобразования Хаара и вейвлет-преобразования,

- выполнять временную автоматическую регулировку усиления (TAGC) сигналов гидролокационного изображения,
- повысить эффективность обработки и анализа подводных изображений с помощью разработанной программы-редактора.

В развитие данных работ в ИПМТ ДВО РАН и ТОГУ проводятся перспективные исследования по передаче подводных изображений по гидроакустическому каналу связи, помехоустойчивому кодированию, 3-D обработке изображений, распознаванию подводных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1983. 280 с. (Сер. «Библиотека инженера-гидроакустика»).
3. Gonzalez R.S., Woods R.E. Digital Image Processing. Prentice Hall. New Jersey, 2002.
4. Sai S.V. Methods of the Definition Analysis of Fine Details of Images. Chapter in the book: Vision Systems: Applications / eds. G. Obinata, A. Dutta. Advanced Robotic Systems, Vienna, Austria, 2007. P. 279–296.
5. Pratt W.K. Digital Image Processing. Wiley, 2001.
6. Wyszecki G. Uniform Color Scales: CIE 1964 UVW Conversion of OSA Committee Selection // JOSA. 1975. V. 65. P. 456–460.
7. Sai S.V., Sorokin N.Yu. Search Algorithm and the Distortion Analysis of Fine Details of Real Images // Proc. of the 1st International Workshop on Image Mining Theory and Applications IMTA 2008, Madeira, Portugal, January, 2008. P. 58–64.
8. Mastin G.A. Adaptive Filters for Digital Image Noise Smoothing: an Evaluation // Computer Vision, Graphics and Image Processing. 1985. N 31. P. 103–121.
9. Сай С.В., Герасименко К.А. Анализ эффективности сжатия гидролокационных изображений // Материалы конф. «Технические проблемы освоения мирового океана», 2–5 октября 2007. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 287–290.
10. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. 2nd Edition. London: Academic Press, UK, 1999.
11. Mertins A. Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications, John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex, England. 1999.
12. Шoberг А.Г. Использование алгоритмов обработки изображений в работе с ГБО-файлами // Материалы конф. «Технические проблемы освоения мирового океана», 2–5 октября 2007. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 291–295.
13. Золотарев В.В., Косарев Г.В. Диалоговый программный комплекс для координатной привязки гидролокационных целей // Материалы конф. «Технические проблемы освоения мирового океана», 2–5 октября 2007. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 354–359.
14. Программа гидролокационного редактора, объединяющая и обрабатывающая различную съемочную информацию // НТФ «Гидромастер». – <http://www.hydromaster.ru/software.html>