Второй. Вопрос связан с аналогами понятий грубости и структурной устойчивости в непрерывной математике. При непрерывном моделировании, если отбросить словесное оформление, это, по существу, вопрос о том, насколько устойчивы те или иные свойства объекта по отношению к непрерывным, гладким и т.п. (но обязательно малым в каком-то непрерывном смысле) возмущениям. Но если мы принимаем, что при компьютерном моделировании основным является вопрос об информации, то мы должны поставить и следующий вопрос: можем ли мы гарантировать информационную грубость выбранной схемы перехода от непрерывного объекта к дискретному?

Вероятно, всесторонний анализ этих вопросов явится в ближайшие десятилетия одним из стратегических направлений в развитии точных наук. Дать цельное описание ситуации в этой области и тем более прогноз её развития — задача безнадёжная. Некоторые первые достижения в этой области получены в [10-12].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 06-01-00256 и 07-07-00031).

# Список литературы

- Котельников В А "О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи", в сб. Всесоюзный энергетический комитет. Материалы к І Всесоюз. съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности (М.: Управление связи РККА, 1933) с. 1; переиздание: О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи (М.: Институт радиотехники и электроники МЭИ (TV), 2003); YOH 176 762 (2006) [Kotel'nikov V A Phys. Usp. 49 736 (2006)]
- 2. Кравченко В Ф, Рвачев В Л Алгебра логики, атомарные функции
- и вейвлеты в физических приложениях (М.: Физматлит, 2006) Whittaker E T "On the functions which are represented by the expansion of interpolating theory" *Proc. R. Edinburgh* (35) 181 3. (1915)
- Balakrishnan A V "A note of the sampling principle for continuous 4 signals" IEEE Trans. Inform. Theory 3 143 (1957)
- Беляев Ю К "Аналитические случайные процессы" Теория 5. вероятностей и ее применения (4) 402 (1959)
- Beutler F J "Sampling theorems and basis in a Hilbert space" 6. Inform. Control (4) 97 (1961)
- 7. Jerri A J "The Shannon sampling theorem — its various extensions and applications: a tutorial review" Proc. IEEE (65) 1565 (1977)
- 8 Синицын И Н Фильтры Калмана и Пугачева (М.: Логос, 1-е изд. 2005, 2-е изд. — 2007)
- 9. Григорьев Ф Н, Кузнецов Н А, Серебровский А П Управление наблюдениями в автоматических системах (М.: Наука, 1986)
- Козякин В С, Кузнецов Н А "Достоверность компьютерного 10. моделирования с точки зрения теории информации" Информационные процессы 7 323 (2007); http://www.jip.ru/2007/323-368-2007.pdf
- Vladimirov I "Quantized linear systems on integer lattices: Fre-quency-based approach. Part I", CADSEM Report 96-032 (Gee-11.
- long, Australia: Deakin Univ., 1996) Diamond P, Vladimirov I "Higher-order terms in asymptotic 12 expansion for information loss in quantized random processes' Circuits, Systems, Signal Process. 20 677 (2001)

PACS numbers: 43.30. + m, 43.58. + z, 91.50.Ga DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902k.0218

# Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами

# В.И. Каевицер, В.М. Разманов

#### 1. Введение

В докладе рассматриваются вопросы применения сложных зондирующих сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в акустических гидролокационных системах исследования морского дна, в том числе, с использованием многоэлементных антенн. Проведён обзор теоретических и практических результатов, полученных авторами в последние годы при разработке, испытаниях и реальном применении в различных условиях следующих гидроакустических систем: акустического низкочастотного линейного профилографа, обзорных и интерферометрических гидролокаторов бокового обзора (ГБО), многолучевого эхолота.

Радиолокационные исследования планет, проводимые под руководством В.А. Котельникова с конца 1950-х годов, привели к созданию в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР (ныне РАН) нового направления работ — дистанционного картирования протяжённых объектов с помощью высокоэнергетических сложных зондирующих сигналов и цифровых методов когерентной обработки эхо-сигналов. Цифровые методы синтезирования сигналов, регистрации и обработки, используемые при локации планет, в конце 1970-х годов с успехом были применены для создания нового поколения гидролокационных систем площадного картирования морского дна.

Сейчас акустические гидролокационные системы когерентного зондирования стали основным инструментом дистанционных измерений рельефа морского дна и структуры донных отложений. Для одновременных измерений рельефа и получения акустических изображений донной поверхности к настоящему времени сформировались два основных, в некоторой степени конкурирующих, класса систем — это интерферометрические ГБО и многолучевые эхолоты [1]. Если в состав обзорного ГБО обычно входит одна антенна на борт, а в составе интерферометрического ГБО содержатся две или три антенны, то многолучевые эхолоты представляют собой более сложный комплекс, состоящий из значительно большего числа приёмных элементов, порядка 100 и выше. Для изучения подповерхностной структуры морского дна используются низкочастотные акустические профилографы. Это, как правило, одноканальные системы, обеспечивающие непрерывное профилирование грунта вдоль трассы движения судна. При проведении исследований в состав комплексов включается спутниковая система навигации GPS (Global Positioning System)/DGPS (Differential Global Positioning System), измерители скорости звука в воде, а также датчики крена, дифферента и вертикальных перемещений судна. Для сложных многоэлементных систем оправданным является также применение стабилизирующих систем для уменьшения влияния качки.

Эффективность использования когерентных акустических локационных систем определяется типом зондирующих сигналов. Для работы на небольших глубинах (до  $\approx 100$  м) в системах ГБО и многолучевых эхолотах используются тональные зондирующие импульсы с несущей частотой до 500 кГц, что связано с простотой их формирования и обработки. При глубоководных исследованиях в современных системах применяются зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией, сочетающие высокий энергетический потенциал с высоким временным разрешением.

#### 2. Схема бокового обзора

Локационные методы бокового обзора основаны на последовательном формировании данных о морском дне при движении судна (рис. 1). Импульс, излучённый передающей антенной, последовательно отражается от



Рис. 1. Геометрия бокового обзора и фрагмент получаемого акустического изображения дна с затонувшими судами.

отдельных элементов дна на разной дальности. Отражённые эхо-сигналы принимаются одной или несколькими приёмными антеннами. Цикл, состоящий из передачи и приёма, образует одну реализацию (одну горизонтальную строку акустического изображения на рис. 1). Совокупность последовательных реализаций, сформированных при движении судна, содержит информацию об отражательных характеристиках морского дна в полосе обзора и представляет собой акустическое изображение дна — аналог оптического и радиолокационного изображений. Такие изображения предназначены для визуализации и классификации объектов. Для примера на вставке рис. 1 приведён фрагмент акустического изображения участка дна с двумя затонувшими судами. Полоса обзора, которая определяется диаграммой направленности приёмных элементов, энергетическими характеристиками, формой рельефа морского дна и обычно задается в глубинах Но "под собой", составляет (4-10) *H*<sub>0</sub>. Использование антенн с узкими диаграммами направленности в боковом направлении обеспечивает определённую двумерность измерений в плоскости бокового обзора. Морское дно рассматривается как пространственная среда с коэффициентом обратного рассеяния  $R = R(L, \theta)$ , зависящим от дальности L и угла  $\theta$ между вертикалью и направлением прихода в плоскости бокового обзора. Рассматривая коэффициент отражения  $R = R(u, \tau)$  как функцию двух параметров: углового параметра  $u = \sin \theta$  и задержки  $\tau$ , принятый сигнал на отдельной антенне  $Z_n(t)$  многоэлементной системы можно записать в виде

$$Z_n(t) = \iint R(u,\tau) S_0(t-\tau-\tau_n u) \,\mathrm{d}u \,\mathrm{d}\tau \,, \quad u = \sin\theta \,. \quad (1)$$

Дальность *L* связана с временем распространения (задержкой)  $\tau$  соотношением  $\tau = 2L/c$ , где *с* — скорость звука. Дополнительная задержка  $\tau_n = l_n/c$ , которая обусловлена геометрической разностью путей прихода эхо-сигналов на различные элементы антенны, определяется координатой  $l_n$  отдельного элемента в системе координат, связанной с антенной.

Для многих практических случаев при использовании сложных сигналов модель (1) можно упростить, ограничившись узкополосным приближением. Для этого представим  $S_0(t)$ , выделив несущую частоту  $\omega_0$  и относительно медленно меняющуюся компоненту модуляции  $S_A(t)$ , в виде  $S_0(t) = \exp(i\omega_0 t) S_A(t)$ . Сигнал  $S_0(t)$  будем считать узкополосным, если для  $\Delta t \ll t_0$  выполняется  $S_A(t + \Delta t) \approx S_A(t)$ . В результате при  $\Delta t \ll t_0$  получим следующее соотношение для узкополосного сигнала:  $S_0(t_0 + \Delta t) \approx \exp(i\omega_0\Delta t) S_0(t_0)$ . Рассматривая в качестве малого параметра  $\Delta t$  задержку времени прихода на отдельных элементах решётки  $\tau_n u$ , т.е. считая выполненным условие  $\tau_n u \ll t - \tau$ , модель измерения (1) можно представить следующим образом:

$$Z_n(t) = \iint R(u,\tau) S_0(t-\tau) \exp\left(-\mathrm{i}\omega_0 \tau_n u\right) \mathrm{d}u \,\mathrm{d}\tau =$$
$$= \int R_t(u) \exp\left(-2\pi\mathrm{i} \frac{l_n}{\lambda} u\right) \mathrm{d}u \,, \tag{2}$$

здесь  $R_t(u) = \int R(u, \tau) S_0(t - \tau) d\tau$ ,  $\lambda$  — длина волны, соответствующая несущей частоте  $\omega_0$ . Для фиксированной дальности определение коэффициента отражения становится задачей спектрального оценивания — оценки спектра сигнала по набору его дискретных

отсчётов  $Z_n$ ,

$$Z_n = \int R_t(u) \exp\left(-2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u\right) du.$$
 (2a)

Здесь  $R_t(u)$  можно рассматривать как угловой спектр, для его оценки естественно использовать известные методы спектрального анализа, как непараметрические, так и параметрические [2, 3]. Задачей обработки является оценка коэффициента отражения  $R(u, \tau)$  по совокупности измерений  $Z_n(t)$  и последующее определение параметров морского дна. В зависимости от количества приёмных антенн в разных системах используются различные методы оценки коэффициента отражения R и параметров морского дна, а также различные ограничения на предполагаемую форму рельефа морского дна.

#### 3. Одноканальные системы

# с линейно-частотно-модулированными сигналами: акустические профилографы

#### и обзорные гидролокаторы бокового обзора

В одноканальных системах, в которых отсутствует угловая избирательность, модель измерений (1) вырождается в соотношение для коэффициента  $R = R(\tau)$ , зависящего только от задержки  $\tau$  (дальности *L*), и регистрируемый сигнал описывается соотношением

$$Z(t) = \int R(\tau) S_0(t-\tau) \,\mathrm{d}\tau \,.$$

В среднеквадратичной метрике оценка *R*( $\tau$ ) должна минимизировать функционал

$$\Delta = \int dt \left( Z - \int S_0(\tau) R(t-\tau) d\tau \right) \times \left( Z^* - \int S_0^*(\tau) R^*(t-\tau) d\tau \right).$$
(3)

Оптимальная оценка R(t) должна удовлетворять интегральному уравнению Фредгольма первого рода

$$\int Z(t+\tau) S_0^*(\tau) \,\mathrm{d}\tau = \int R(t-\tau) K_0(\tau) \,\mathrm{d}\tau \,, \tag{4}$$

где ядро определяется корреляционной функцией зондирующего сигнала

$$K_0(\tau) = \int S_0(t) S_0^*(t+\tau) \,\mathrm{d}t \,.$$

Для ЛЧМ-сигнала  $S_0(t) = \exp(i\omega_0 t + i(\Delta\omega/2T)t^2)$  корреляционная функция имеет вид

$$K_0(\tau) = \exp\left(\mathrm{i}\Phi(\tau)\right) \frac{\sin\left[\pi B(\tau/T_0)\left(1 - |\tau|/T_0\right)\right]}{\pi B\tau/T_0} ,\qquad(5)$$

где  $\Phi(\tau) = -(\omega_0 + \pi B/T)\tau$ , B — база сигнала, определяемая соотношением  $T_0\Delta\omega = 2\pi B$ ,  $T_0$  — длительность импульса,  $\Delta\omega$  — полоса.

Строго говоря, уравнение (4) относится к классу некорректных задач. Существует ряд методов решения таких задач, использующих различные дополнительные предположения о характере изменения  $R(\tau)$  [4]. На практике соотношение (4) используется как готовый алгоритм приближённой оценки  $\tilde{R}(\tau)$  с заданным разре-

шением. Для этого запишем (4) в виде двух соотношений:

$$\tilde{R}(t) = \int Z(t+\tau) S_0^*(\tau) \,\mathrm{d}\tau \,, \tag{6a}$$

$$\tilde{R}(t) = \int R(t-\tau) K_0(\tau) \,\mathrm{d}\tau \,. \tag{66}$$

Соотношение (6а) можно рассматривать как алгоритм обработки, который осуществляется в спектральной области с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эта операция — сжатие сигнала является платой за использование сложных сигналов. Соотношение (бб) определяет разрешение оценки  $R(\tau)$ как свёртку точного решения с ядром  $K_0(\tau)$  — функцией корреляции зондирующего сигнала. Для тональных сигналов интервал корреляции (область, в которой величина  $|K_0(\tau)|$  значимо отлична от нуля) определяется длительностью импульса Т<sub>0</sub>. Главное преимущество применения ЛЧМ-зондирующих сигналов определяется тем, что за счёт внутриимпульсной модуляции интервал корреляции уменьшается до величины  $T_i/B$ , где B — база сигнала. Это позволяет сочетать большой энергетический потенциал с высоким, порядка нескольких долей сантиметра, разрешением.

Зависимость модуля коэффициента отражения R от дальности служит основой для построения карт акустического изображения дна. Отсутствие угловой избирательности в одноканальных обзорных ГБО не является препятствием для использования этого класса систем при исследовании относительно плоских районов морского дна, поиска малоразмерных предметов, деталей рельефа типа борозд, траншей, камней. Обычно обзорный ГБО представляют собой одноканальный гидролокатор правого и левого борта, с независимыми приёмопередающими антеннами, имеющими узкую (около 1°) диаграмму направленности вдоль линии движения носителя и, как правило, цифровую систему формирования, обработки и регистрации сигналов. Тип излучаемых импульсов — тональные и ЛЧМ-посылки. Рабочие частоты от 10 до 500 кГц. В тональном режиме длительность импульса составляет несколько долей миллисекунды, в ЛЧМ-режиме достигает нескольких секунд.

Одними из одноканальных приборов, в которых ЛЧМ-сигналы широко используются в экспериментальных образцах, являются акустические линейные профилографы. Многолетний опыт использования низкочастотного профилографа с ЛЧМ-зондирующими сигналами, разработанного в ИРЭ РАН, подтвердил его хорошие эксплуатационные возможности и позволил выявить некоторые особенности интерпретации получаемых результатов. Рабочая частота профилографа 5 кГц, полоса частот порядка 4 кГц, излучаемая мощность около 3 кВт. В состав профилографа входят: девятиэлементная антенная система, электронная система формирования зондирующих посылок (цифровой синтезатор), излучатель мощности, интерфейс ввода информации в компьютер. Прибор содержит цифровую систему сбора, отображения и обработки данных. Предназначен для обследования рельефа дна и донных отложений на глубинах от 20 до 3000 м. Программы сбора данных обеспечивают когерентный ввод эхо-сигналов, ввод навигационной информации с датчиков GPS о пространственном положении судна, отображение информации в реальном времени и архивирование полученных ланных.



Рис. 2. Профиль рельефа дна и осадочных пород (Чукотское море). Вероятно, древнее русло реки.

На рисунке 2 приведён фрагмент рельефа морского дна, полученного в результате профилирования в ледовых условиях Чукотского моря. Глубина примерно 70 м. Результат профилирования показывает высокую помехозащищённость прибора, позволившую реализовать высокое разрешение донных отложений. Приведённый фрагмент интересен ещё и тем, что хорошо видна впадина, заполненная осадками. Такой вид вполне могло иметь русло древней реки после опускания суши и наступлении моря. Высказанная гипотеза может оказаться очень продуктивной для решения некоторых проблем при установлении границ континентального шельфа.

Высокий энергетический потенциал при применении ЛЧМ-зондирующих сигналов позволяет производить профилирование донных отложений при больших глубинах моря. На рисунке 3 показан результат профилирования в Японском море на глубинах от 1200 до 1400 м. Исследуемый район характеризуется изменяющимся рельефом с толстым слоем пластичных отложений. Первое отражение соответствует глубине, что подтверждено результатами промера однолучевым и многолучевым эхолотами. По горизонтальной оси отложено пройденное расстояние в метрах, а по вертикальной оси отложена глубина в метрах. Как видно из рис. 3, глубина профилирования составляет более 100 м, характер отложений на склонах имеет слоистую структуру, характерную для илистых глин. Во впадине характер профилограммы более однороден по глубине, что характерно для супесей.

# 4. Сигналы с линейной частотной модуляцией в интерферометрических гидролокаторах бокового обзора

Для анализа рельефа дна в полосе съёмки в комплекс интерферометрического ГБО включают дополнительные приёмные каналы с набором антенн в вертикальной плоскости. Обработка сигналов в интерферометрическом ГБО основана на предположении о том, что на заданной дальности присутствует сигнал только одного направления:  $R(u, \tau) = R(\tau) \delta(u - u_0(\tau))$ , при этом модель приёма (2) в узкополосном приближении превращается в соотношение

$$Z_n(t) = R(t) \exp\left(2\pi i \frac{l_n}{\lambda} u_0(\tau)\right),$$

где  $R(t) = \int R(\tau) S_0(t-\tau) d\tau$ ,  $u_0 = \sin \theta_0$ . Определение коэффициента отражения R(t) полностью аналогично определению этого коэффициента для обзорного ГБО. Вычисление угла прихода осуществляется посредством измерения фазы  $\Psi$  комплексно-сопряжённого произведения пары отсчётов двух каналов (интерферометра):

$$A_{n,m}(t) = Z_n(t)Z_m^*(t) = |R(t)|^2 \exp \Psi_{n,m},$$

$$\Psi_{n,m} = \arctan \frac{\operatorname{Im} A_{n,m}}{\operatorname{Re} A_{n,m}}.$$
(7)

Фаза интерференции связана с углом прихода  $\theta$  и базой интерферометра  $b_{nm} = l_n - l_m$  следующей формулой:

$$\Psi_{n,m}(t) = \exp\left(2\pi i \frac{b_{nm}}{\lambda}\sin\theta(t)\right).$$

По фазе определяется угол прихода, а глубина h и горизонтальная координата x элемента отражения (рельефа) вычисляется по дальности L и углу прихода  $\theta$  исходя из геометрических соотношений

 $h = L\cos\theta, \qquad x = L\sin\theta. \tag{8}$ 

Более подробно детали обработки данных интерферометрического ГБО описаны в [6, 7].

Практически используемые интерферометрические ГБО включают в себя, как правило, две-три антенны по каждому борту (несколько интерферометров), систему спутниковой навигации, приборы определения профиля скорости звука, датчики крена, дифферента, вертикальных перемещений. Как и в одноканальных ГБО, диаграмма направленности узкая (порядка 1°) вдоль линии движения и широкая (порядка 60°) в плоскости бокового обзора. Благодаря относительно простой аппаратной реализации и широкой полосе обзора этот тип акустических систем получил широкое распространение, по-



Рис. 3. Фрагмент профилирования донных отложений в Японском море на глубинах до 1500 м. Глубина профилирования подповерхностных структур более 100 м.

скольку подобные системы позволяют одновременно получать высококачественные акустические изображения и измерять глубины в полосе съёмки.

Различные модификации экспериментальных интерферометрических ГБО, разработанные в ИРЭ РАН, успешно использовались в самых различных условиях: от катерных речных промеров до крупных изыскательских работ в ледовых условиях Арктики на крупнотоннажных судах [5–7]. Для работы на небольших глубинах (примерно до 100 м), как правило, используются тональные посылки, не требующие процедуры сжатия. На больших глубинах используются ЛЧМ-посылки с различной длительностью, в зависимости от глубины и требуемых энергетических характеристик.

Следует отметить важное различие при применении тех и других сигналов. На акустических изображениях при тональной зондирующей посылке начальные элементы по правому и левому боку имеют характерную засветку, что связано с амплитудной перегрузкой приёмников. На практике это существенно усложняет схему приёмного устройства вследствие необходимости создания временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) по каждой строке приёма, что существенно затрудняет обработку и, как правило, требует вмешательства оператора. Качество изображений сильно зависит от акустических шумов разной природы. При когерентной обработке сложных сигналов выделение полезной информации происходит не в амплитудной, а в частотной области, и при сохранении когерентности эхо-сигналов такой проблемы не существует, достаточно использования обычной системы автоматической регулировки усиления (АРУ) для согласования уровня выходного сигнала приёмника с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Последнее преимущество очень важно при применении рассмотренных систем дистанционного зондирования на необитаемых подводных аппаратах и в условиях значительных амплитудных помех.

Фрагменты акустических изображений, полученные в ходе работ по обследованию трассы прокладки оптического кабеля в ледовых условиях Арктики, представлены на рис. 4: показаны следы ледовой экзарации от крупного айсберга на дне (рис. 4а) и борозды того же происхождения, характеризующие сложную траекторию движения, связанную с изменением направлений течения (рис. 4б). Кроме изображений объектов акустические изображения содержат информацию об акустической плотности донной поверхности. Различие в коэффициентах обратного рассеяния, определяемое по яркостному фону, несёт информацию о геологических породах донной поверхности. На рисунке 5 показаны фрагмент батиметрической карты, построенной по данным интерферометрических измерений, и изменение плотности грунта в виде полутонового изображения.

Основной недостаток интерферометрических систем — отсутствие в некоторых условиях однозначности при селекции принимаемых сигналов с одинаковым запаздыванием по углу прихода, что приводит к ограничениям при использовании таких систем в условиях многолучёвости, сложного рельефа и т.д. [6]. Многоэлементные системы свободны от этих ограничений и позволяют разделять сигналы с нескольких направлений (параметрический подход) или с высоким угловым разрешением (непараметрические методы).

### 5. Многолучевой эхолот с линейно-частотно-модулированными зондирующими сигналами

Для многоэлементной решетки и модели измерений (1) среднеквадратичный критерий (3) оценки коэффициента отражения принимает вид

$$\Delta = \sum_{n} \int \left| Z_n(t) - \int R(u,\tau) S_0(t-\tau-\tau_n u) \,\mathrm{d}u \,\mathrm{d}\tau \right|^2 \mathrm{d}t \,,$$

а уравнение для оценки записывается как

$$\sum_{n} \int Z_{n}(t) S_{0}^{*}(t - \tau_{0} - \tau_{n}u_{0}) dt =$$
  
=  $\int R(u, \tau) \left\{ \sum_{n} K_{0}(\tau - \tau_{0} - \tau_{n}(u - u_{0})) \right\} du d\tau.$ 



**Рис. 4.** Фрагменты акустических изображений интерферометрического ГБО с ЛЧМ-зондирующим сигналом: (а) следы на дне ледовая экзарация от крупного айсберга в Арктике на глубине 20– 30 м, размер фрагмента по вертикали 1 км; (б) ледовая экзарация, характеризующая траекторию перемещения айсберга при изменении течения, размер фрагмента по вертикали примерно 2 км.

Ядро (в фигурных скобках) этого интегрального уравнения описывает разрешение по углу и дальности. В узкополосном приближении ядро вырождается в произведение двух сомножителей, зависящих от угла и дальности:

$$\sum_{n} \tilde{Z}_{n}(t) \exp\left(2\pi i \frac{l_{n}}{\lambda} u_{0}\right) =$$
$$= \int R(u,\tau) K_{0}(\tau-t) K_{\theta}(u-u_{0}) du d\tau, \qquad (9)$$

где  $\tilde{Z}_n(t) = \int Z_n(t) S_0^*(t-\tau_0) dt$  — сжатые входные данные,  $K_{\theta}(u-u_0) = \sum_n \exp\left(-2\pi i (l_n/\lambda)(u-u_0)\right)$  — диаграмма направленности решётки. Аналогично уравнению из раздела 3 уравнение (9) можно рассматривать как оценку коэффициента отражения  $\tilde{R}(u, \tau)$ , в рамках временно́го разрешения функции корреляции  $K_0(\tau)$  и углового разрешения диаграммы направленности  $K_{\theta}(u)$ ,

$$\tilde{R}(u,t) = \sum_{n} \tilde{Z}_{n}(t) \exp\left(2\pi i \frac{l_{n}}{\lambda} u_{0}\right).$$
(10)

Обработка сигналов при этом заключается в сжатии входных отсчётов по всем каналам и фурье-преобразовании отсчётов для каждой дальности. Для фиксированной диаграммы направленности, особенно при небольшом числе приёмных антенн, важной практической задачей является повышение пространственного разрешения. Решение этой задачи может быть получено как с помощью решения (9) (непараметрический метод), так и посредством применения параметрических алгоритмов спектрального оценивания [2–4].

Первые испытания экспериментальной системы с многоэлементной антенной системой и с ЛЧМ-зондирующими сигналами в ИРЭ РАН были проведены в 2007 г. в акватории Японского моря. В состав этой гидролокационной системы входят линейная передающая и 32-элементная приёмная антенная системы, выполненные по типу креста Миллса, мощный усилитель излучаемых сигналов, цифровой формирователь (синте-



Scale 1:10000, Ellipsoid WGS84, Projection UTM, Center Meridian27°

**Рис. 5.** Фрагмент батиметрической карты в виде линий уровня глубин (изобат). Изобаты проведены с шагом 5 м. Полутоновой растровый фон характеризует акустическую плотность донной поверхности.



**Рис. 6.** (а) Изменение амплитуды эхо-сигналов в отдельных лучах в зависимости от дальности (номера отсчёта), *m* — номер луча. Период дискретизации по времени соответствует интервалу по дальности в 0,1 м. (Получено по данным зондирования различных типов донной поверхности.) (б) Пример выделения рельефа по системе пространственных лучей.

затор) ЛЧМ-сигналов, 32-канальный малошумящий цифровой приёмник с интерфейсом ввода данных в ЭВМ. Несущая частота зондирующих сигналов 30 кГц, девиация частоты 3,0 кГц. Дискретизация сигнала осуществлялась с частотой ~ 6,0 кГц по каждому из каналов. Расстояние между приёмными элементами антенной решётки — половина длины волны несущей частоты излучаемого сигнала.

В соответствии с (10) первоначально осуществлялось сжатие сигналов всех 32 каналов. Вычисление углового спектра на каждой дальности проводилось с использованием БП $\Phi$  с размерностью N = 32 (в некоторых вариантах использовалась бо́льшая размерность — до *N* = 256) и с помощью взвешивания входных канальных отсчётов при различных вариантах весовых последовательностей. Набор спектральных отсчётов образует при этом систему парциальных лучей. Угловое положение  $u_m = \sin \theta_m$ луча с номером (спектральным отсчётом) т при расстоянии *d* между приёмными элементами антенны в половину длины волны  $\lambda$  определяется из соотношения  $u_m =$  $= \lambda m/(dN) = 2m/N$ , где m = 0, ..., N - 1, N — размерность БП $\Phi$ , угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к антенне. Амплитуда луча содержит максимум на дальности, соответствующей точке пересечения дна лучом. Построение рельефа производилось по наклонной дальности L, определяемой по положению максимума пика амплитуды в каждом луче с известным углом наклона по формулам (8). Примеры изменения амплитуды лучей в окрестности максимума, характеризующие два предельных типа данных, показаны на рис. 6. Для группы данных (в левой части рис. 6а) пик в окрестности максимума широкий, амплитуда в максимуме плавно уменьшается с увеличением номера луча (угла наклона), смещаясь по дальности. Алгоритм БПФ для формирования пространственной диаграммы хорошо формирует рельеф дна (пример такого рельефа показан на рис. 6б). Для второго типа записей (в правой части рис. 6а) форма амплитуды в окрестности максимума представляет собой узкий пик практически на одной дальности, амплитуда пика резко уменьшается при увеличении номера луча. Обработка показала, что использование БПФ в этих случаях неэффективно из-за высокого уровня боковых лепестков; для оценки углового спектра использовался параметрический авторегрессионный метод (метод Прони) [2]. Это показывает актуальность разработки и использования спектральных методов оценивания с высоким разрешением в многолучевых системах.

# 6. Заключение

Приведённые результаты теоретического анализа и разработанные алгоритмы обработки сигналов при использовании различных гидролокационных систем с ЛЧМ-зондирующими сигналами для дистанционных исследований морского дна реализованы и опробованы в различных условиях, включая сложнейшие работы в Арктике.

В сообщении приведены только некоторые аспекты обработки данных при использовании ЛЧМ-сигналов. Вне рамок доклада остались такие важные вопросы, как методы вторичной обработки, построение батиметрических карт, карт яркости, подготовка различных отчётных документов, без которых работа современных гидроакустических систем просто невозможна.

Проведённые эксперименты подтвердили важные преимущества таких разработок по сравнению с традиционными гидролокаторами, использующими тональные зондирующие импульсы. Это — увеличение энергетического потенциала и разрешающей способности; увеличение помехозащищённости и тем самым улучшение электрической и акустической совместимости различных приборов; увеличение возможности автоматизации гидролокационных систем различного назначения.

Кроме решения перечисленных задач, использование когерентных методов обработки при применении ЛЧМсигналов в перспективных разработках позволит использовать дополнительные сигнальные характеристики, которые могут стать очень важными классификационными признаками при интерпретации результатов дистанционных обследований морского дна [8].

#### Список литературы

- 1. Costnel C, Yoos L T Sea Technol. (March) (2007)
- Marple S L Digital Spectral Analysis: with Applications (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987) [Марпл С Л Цифровой спектральный анализ и его приложения (М.: Мир, 1990)]
- Leonowicz Z, Lobos T, Rezmer J IEEE Trans. Industrial Electron. 50 514 (2003)
- Василенко Г И Теория восстановления сигналов (М.: Сов. радио, 1979)
- 5. Каевицер В И и др. *Радиотехника* (1) 42 (2004)
- 6. Каевицер В И, Разманов В М Радиотехника (12) (2005)
- Разманов В М, Кривцов А П, Долотов С А *Радиотехника и* электроника 51 58 (2006) [Razmanov V M, Krivtsov A P, Dolotov S A J. Commun. Technol. Electron. 51 52 (2006)]
- Гуляев Ю В, Захаров А И, Каевицер В И Докл. PAH 413 257 (2007) [Gulyaev Yu V, Zakharov A I, Kaevitser V I Dokl. Earth Sci. 413 327 (2007)]