

УДК 534.222

П. А. Стародубцев

(Владивосток)

**К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

Предложено для формирования томографических образов подводных объектов, полученных на основе двустороннего просветного метода (бистатической локации) или численного моделирования, использовать сверточные методы или метод фазовых изменений. Как показала практика, эти методы лучше всего применять не при построении изображений объекта, а при направленном суммировании (τ - ρ -преобразовании) полученных на самописце приемной системы данных и обработанных в аналого-цифровом преобразователе компьютерной системы. Показано, что непосредственный переход от пространства проекций к плоскости изображения реализуется путем обратного преобразования Радона или восстановления по отфильтрованным проекциям. Отмечено, что с уменьшением частоты излучаемого сигнала данные методы дают отрицательные результаты, поэтому рекомендуется в этом случае использовать метод фазовых изменений, позволяющий реализовать частотно-фазовую обработку принимаемых сигналов.

Введение. Сложность процесса визуализации обнаруженной информации о подводных объектах не позволяет механически перенести в гидроакустику и гидроакустическую томографию научно-технические достижения акустической голографии, медицинской томографии и другие аналогичные достижения науки и техники. Следовательно, требуются новые и нетрадиционные подходы, учитывающие особенности выделения, регистрации, обработки, визуализации пространственно-временного распределения результатов обнаружения подводных объектов (ПО).

Для формирования томографических образов ПО, полученных путем односторонней (двусторонней) локации водного пространства, предлагается применять сверточные методы или восстановление изображений по отфильтрованным проекциям (метод фазовых изменений) [1].

Распознавание подводных объектов. Механизм односторонней (двусторонней) локации водного пространства при обнаружении ПО предложен Р. Дж. Уриком. Он использовал глубоководную цепочку гидрофонных блоков, каждый из которых устанавливался на заданной глубине и контролировался датчиком.

дится регистрация двух его квадратурных компонент. Преобразованные сигналы после гетеродинирования поступают далее на фильтр низкой частоты и записываются на магнитную ленту, параллельно данная информация регистрируется на ленте трехкоординатного самописца. Полученная информация обрабатывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП), проходит через специальное программное обеспечение и выводится в форме томографического образа на монитор ПЭВМ.

Используя возможности такой антенны, можно реализовать три направления ее применения при пространственно-временной (томографической) обработке принимаемой информации [3]. При этом классической томографии, где строго когерентный сигнал облучает объект, смешивается с объектной волной, а затем по интерференционной картине выявляются параметры объекта, в наших дальнейших рассуждениях присутствовать не будет. Речь пойдет о модуляции излученного сигнала низкочастотными составляющими возмущенной области водной среды, созданной движущимся ПО. Изменения основных характеристик излученного сигнала и будут анализироваться при формировании томографических образов.

Первое направление. На рис. 2 отображен способ направленного суммирования результатов обнаружения при лоцировании движущегося ПО тональным высокочастотным сигналом, когда применяются один излучатель и один (несколько) горизонтальный приемник. Это традиционный способ облучения водного пространства. Сумма амплитуд отсчетов, взятых с ленты самописца просветной системы наблюдения в координатах (x, t) вдоль линии суммирования, заданной наклоном ρ и временем на нулевом удалении τ , определяет значение интенсивности (амплитуды) поля в точке $\tau - \rho$ -плоско-

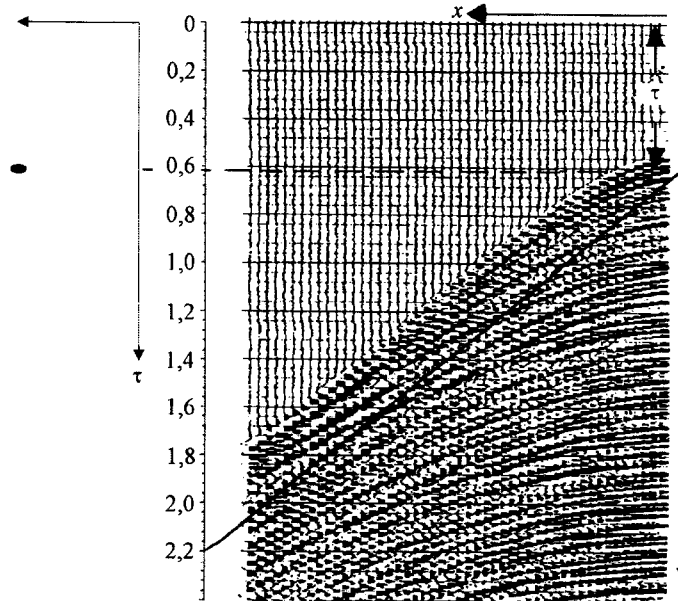


Рис. 2. Томографическое обращение гидроакустической информации сверточным методом (восстановление по отфильтрованным проекциям), совпадающее с обратным $\tau - \rho$ -преобразованием

сти. Это направленное суммирование по ленте самописца дает точку на плоскости $\tau - \rho$. (t – время лоцирования водного пространства.)

Второе направление. Способ направленного суммирования при лоцировании подвижного ПО тональным высокочастотным сигналом, когда применяется вся вертикальная гирлянда излучателей и приемников.

Для данного случая t представляет собой не время наблюдения, а вторую пространственную глубинную координату. Излучатели расположены по вертикали на различных глубинах t с осью, проходящей через точку $x = 0$, а возбужденные этими излучателями колебания регистрируются приемниками в вертикальной плоскости при $x = x_{\max}$.

Если поле в координатах (x, t) определяет значения «медленности» ($1/\text{скорость}$) акустических волн в области между двумя вертикальными гирляндами излучателей и приемников, то результат направленного суммирования с параметрами τ, ρ в данном случае дает время пробега вдоль луча, идущего из точки $(\tau, x = 0)$ в точку $(\rho, x_{\max} + \tau, x_{\max})$.

Третье направление. Для случая создания томографического образа ПО, лоцированного низкочастотной акустической волной, проводится и другая аналогия с вышеизложенным. Количество излучателей равно 1 при движущемся ПО [4]. Конфигурация поля возмущенной области в разные моменты времени будет иметь свою объемную структуру, и приходящие в определенный момент дискретно снимаемые сигналы на приемники будут иметь свои отличительные качественные параметры. Используя в данном случае особенности не лучевой теории распространения акустических сигналов, а волновой и вертикально-горизонтальную многоэлементную приемную антенну, получаем на самописце результат, аналогичный обычной сейсмограмме. А отображение поля в координатах (x, t) на плоскость τ, ρ будет соответствовать по определению преобразованию Радона.

Количественно результат обнаружения объекта может быть представлен и фазовыми изменениями спектральных характеристик сигналов, применяемых при лоцировании ПО.

Итак, пусть $u(x, t)$ – амплитуда акустических колебаний на приемнике, где x – расстояние от источника, а t – время регистрации. Запишем выражение для преобразования Фурье по пространственной координате x :

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\kappa_{\min}}^{\kappa_{\max}} \hat{u}(\kappa) e^{i\kappa x} d\kappa. \quad (1)$$

Поскольку $p = t/x$, положим $\kappa = |\omega| \rho$. Тогда $d\kappa = |\omega| d\rho$ и выражение (1) принимает вид

$$u(x) = \frac{|\omega|}{2\pi} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \hat{u}(\rho) e^{i\omega \rho x} d\rho. \quad (2)$$

Для двумерного преобразования Фурье получим

$$u(x, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \hat{u}(\omega) |\omega| \exp[-i\omega(t - px)] d\rho d\omega =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \dot{u}(t - \rho x, \rho) * (\mathcal{R}^{-1}|\omega|) d\rho, \quad (3)$$

где \mathcal{R}^{-1} – обратное одномерное преобразование Фурье; $\dot{u}(t - \rho x, \rho)$ – преобразование Радона от $u(x, t)$. Интеграл $\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} \dot{u}(t - \rho x, \rho)$ соответствует суммированию значений поля в координатах (τ, ρ) вдоль прямой с угловым коэффициентом $d\tau/d\rho = -x$, пересекающей ось τ в точке $\tau = t$.

Таким образом, обратное преобразование от координат (τ, ρ) к (x, t) очень похоже на прямое. Единственное отличие состоит в том, что в обратном преобразовании перед суммированием выполняется свертка по координате τ с фильтром, имеющим частотную характеристику $|\omega|$.

Отсюда происхождение термина «восстановление изображений ПО по отфильтрованным проекциям». В акустической томографии плоскость изображения – это искомое поле скоростей или коэффициентов поглощения, а пространство проекций есть наблюдаемые значения времен пробега или амплитуд, полученные в ограниченном диапазоне направлений лучей.

В результате рассуждений появился следующий алгоритм обработки полученной информации на приемных элементах антенны. Переход от плоскости изображения к пространству проекций осуществляется с помощью преобразования Радона, потому что в случае направленного суммирования плоскость изображения – это данные на ленте самописца горизонтально-вертикальной (вертикальной) гирлянды приемников системы наблюдения, а пространство проекций есть $\tau - \rho$ -преобразование или суммограмма. Наконец, непосредственный переход от пространства проекций к плоскости изображения реализуется путем обратного преобразования Радона, т. е. восстановления по отфильтрованным проекциям [5].

На рис. 3, а – с представлен модельный пример процедуры обращения. Весь процесс смоделирован на компьютере без учета реальных условий распространения гидроакустического просветного сигнала. На левой границе (см. рис. 3, а) находится излучатель (облучаемый объект движется), а на правой – вертикальная гирлянда с приемниками. Стрелками показаны максимальный (ρ_{\max}) и минимальный (ρ_{\min}) наклоны, под которыми лучи пересекают водную среду.

Как и ожидалось, вертикальные границы L -образного ПО оказываются нечеткими, поскольку в наборе пересекающих водное пространство рассчитываемых акустических лучей отсутствуют вертикальные и даже близкие к вертикальным. В случае неполного набора углов лучей изображение «размазывается» в направлении, по которому плотность лучей максимальна. При проведении реальных экспериментов в бассейне по первому и второму направлениям с учетом водной среды, коэффициентов рассеяния и затухания сигналов данный процесс показал неплохие результаты, близкие к компьютерному моделированию. Морские эксперименты по этим двум направлениям успеха не имели. Переход в более низкий диапазон частот лоцирования водного пространства и применение пространственно-временной (томографической) обработки принятой информации положительных результатов тоже не дали. Причин, из-за которых был получен отрицательный результат,

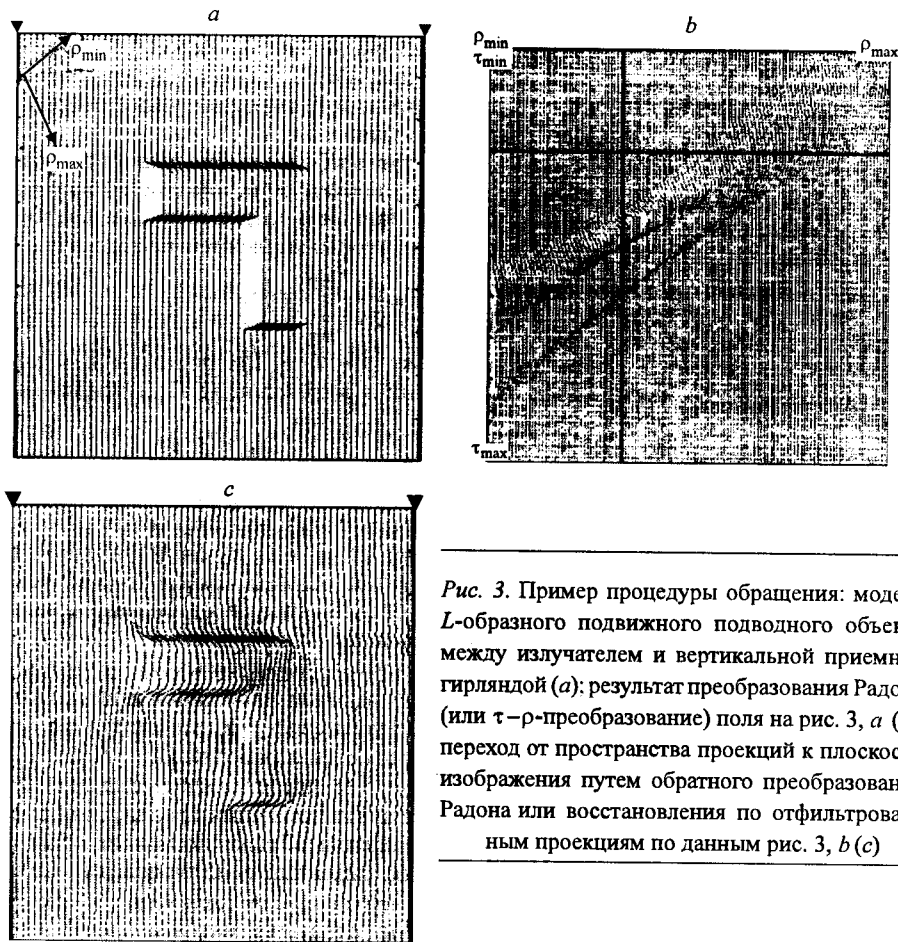


Рис. 3. Пример процедуры обращения: модель L-образного подвижного подводного объекта между излучателем и вертикальной приемной гирляндой (а); результат преобразования Радона (или τ - ρ -преобразование) поля на рис. 3, а (b); переход от пространства проекций к плоскости изображения путем обратного преобразования Радона или восстановления по отфильтрованным проекциям по данным рис. 3, б (с)

было много, и главная из них – это невозможность учета в полной мере среды распространения гидроакустического сигнала.

В связи с этим пространственно-временная обработка сигналов была заменена частотно-фазовой. При этом ни теоретически, ни экспериментально это решение не было обосновано. Единственно, как показала практика проводимых экспериментов, фаза более устойчива к среде распространения гидроакустического сигнала. За основу излучаемого низкочастотного сигнала взят фазомодулированный сигнал (ФМ) [6]:

$$U_{\text{ФМ}}(t) = U_m \cos[\omega_0 t + m \sin \Omega(t)], \quad (4)$$

где m – индекс фазовой модуляции, представляющий собой девиацию фазы сигнала, выраженную в радианах,

$$m = \Delta\omega/\Omega. \quad (5)$$

При $m \ll 1$ в спектре сигнала с такой модуляцией содержатся несущее колебание и две боковые составляющие (верхняя и нижняя) на частотах $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$. Индекс m играет здесь такую же роль, как коэффициент амплитуд-

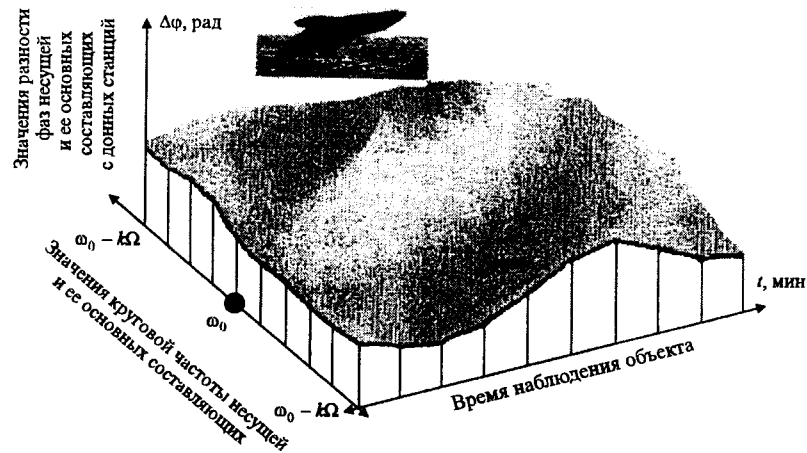


Рис. 4. Реконструируемый образ скоплений биологических объектов по значениям разности фаз несущей и ее составляющих низкочастотного сигнала, принятого на две кабельные донные станции

ной модуляции M . Спектр ФМ в общем случае содержит бесконечное число составляющих, частоты которых равны $\omega_0 \pm k\Omega$.

С помощью двух кабельных донных станций осуществлялся прием такого низкочастотного сигнала. Записанные сигналы пропускались через АЦП. С выхода АЦП снимались квадратурные компоненты исследуемого низкочастотного сигнала. Модуль и фаза введенного сигнала определялись по формулам

$$Z^2(t) = \text{Im}^2 Z(t) + \text{Re}^2 Z(t), \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \text{arctg}(\text{Im}Z(t)/\text{Re}Z(t)).$$

Фаза, определяемая с помощью ПЭВМ по формулам (6), давала только главные значения тангенсов, т. е. была измерена в области $\pm\pi/2$, а на границе этой области терпит разрыв.

При анализе полученных результатов расчетов фазы выявлена очень интересная особенность. Численные значения фазы несущей и ее составляющих низкочастотных сигналов, приходящих на дальнюю по расстоянию от излучателя базу, больше, чем сигналов, приходящих на ближнюю базу, с момента входа ПО в сектор облучения и до момента пересечения им осевой линии исследуемой акватории. Затем этот процесс меняет свой знак на противоположный. Если рассчитать разницу фаз несущей и ее составляющих низкочастотных сигналов с двух кабельных донных станций, то получается трехмерный график. После изучения этого процесса появились и теоретические доказательства. Они связаны с порядком формирования возмущенной области водного пространства движущимся ПО. При проведении численного моделирования данную область условно можно представить двумя усеченными конусами и цилиндром. На рис. 4 [6] в качестве примера представлен реконструируемый по разности фаз принятых сигналов образ скоплений биологических объектов.

Заключение. Насколько объективно с точки зрения признаков распознавания полученное изображение соответствует определенному классу реальных морских объектов, ответить достаточно сложно, но проведенные масштабные исследования других аналогичных записей подтверждают факт присутствия такого физического явления.

Дальнейший процесс синтеза подобных изображений и анализ их отличительных параметров позволили сформировать базу признаков распознавания. Сам подход получил название «метода фазовых изменений». Но простота получения изображений вызывает сомнения, связанные с учетом среды распространения низкочастотных сигналов и их взаимодействия с возмущенной областью водного пространства, созданного движущимся объектом. Используя двусторонний метод низкочастотного лоцирования водного пространства с обязательным применением элементов сверточных методов или элементов восстановления объектов по отфильтрованным проекциям, такие сомнения можно снять. В данном случае будет полностью учтена среда распространения сигналов и появится возможность сравнения изображений, полученных на разных границах обследуемой акватории разными подходами.

В отличие от методов, применяемых в современной акустической томографии, предложенный подход не требует многофункциональной информации об объекте, точного знания среды распространения и определяет свою объективность только путем выработки блока соответствующих информационных признаков, присущих каждому объекту.

Все это подтверждает простоту и практическую доступность его реализации при создании низкочастотной томографической системы широкомасштабного мониторинга океанской среды с применением низкочастотных просветных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пауэрс Дж., Лондри Дж., Уэйд Г. Восстановление изображений по фазовым и амплитудным голограммам: Акустическая голография: Пер. с англ. /Под ред. В. Г. Прохорова. Л.: Судостроение, 1975. С. 132.
2. Стародубцев П. А. Результаты проведения натурных и экспериментальных исследований по основным элементам системы томографического мониторинга океанской среды. С.-Пб., 2002. 117 с. Деп. в ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова 25.11.2002, № 3877.
3. Харкевич А. А. Влияние вида модуляции. Борьба с помехами. М.: Радиосвязь, 1965. С. 50.
4. Стародубцев П. А., Мироненко М. В. Метод низкочастотной гидроакустической томографии и измерительная система контроля морских акваторий // Вестн. Оренбург. Гос. ун-та. Естественные науки. 2003. № 2. С. 69.
5. Мироненко М. В., Стародубцев П. А. Проблемы разработки метода низкочастотной томографии морской среды и нетрадиционные пути их решения // Сб. статей. Владивосток: ТОВМИ, 2001. Вып. 21. С. 117.
6. Стародубцев П. А., Стародубцев Е. П. Низкочастотная акустическая томография движущейся возмущенной области подводных объектов по методу согласованной невязимости // <http://zhurnal.apec.relam.ru/articles/2003/108.pdf>

*Тихоокеанский военно-морской институт
имени С. О. Макарова,
E-mail: starodubcev@msun.ru*

*Поступила в редакцию
21 января 2003 г.*