

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА.

**В.И. КАЕВИЦЕР, А.И. ЗАХАРОВ**

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: kvi@ire.rssi.ru

*Рассматриваются вопросы применения сложных сигналов с линейной частотной модуляцией и когерентных методов обработки эхо сигналов в гидролокационных системах картирования морского дна. Проанализированы получаемые результаты подводного видения различными комплексами, возможности классификации рельефа и грунта морского дна, а также малоразмерных объектов. Рассмотрены перспективы развития технических средств и методик картирования дна.*

В настоящее время акустические гидролокационные системы когерентного зондирования стали основным инструментом для получения акустических изображений и измерений рельефа морского дна, а также определения структуры донных отложений. Для этих целей используются гидролокаторы – интерферометры бокового обзора, эхолоты и профилографы, многолучевые эхолоты.

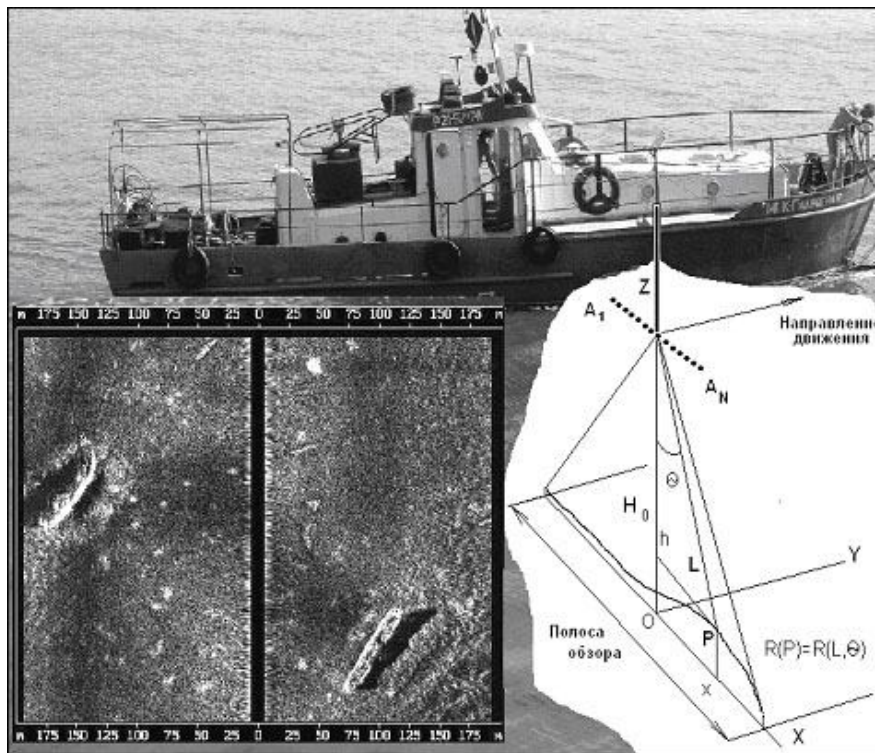
Гидролокаторы бокового обзора используют последовательное формирование данных о морском дне при движении судна (рис.1). Импульс, излученный передающей антенной, последовательно отражается от отдельных элементов дна на разной дальности. Отраженные эхо сигналы принимаются одной или несколькими приемными антеннами. Цикл, состоящий из передачи и приема, образует одну реализацию (одну горизонтальную строку акустического изображения на рис.1., профиль рельефа для одной строки показан ниже). 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 рис. 1 приведен фрагмент акустического изображения участка дна с двумя затонувшими судами. Полоса обзора определяется диаграммой направленности приемных элементов, энергетическими характеристиками, формой рельефа морского дна, задается обычно в глубинах  $H_0$  "под собой" и составляет 4 – 10  $H_0$ . Использование антенн с узкими диаграммами направленности в боковом направлении обеспечивает определенную двухмерность измерений в плоскости бокового обзора. Морское дно рассматривается как пространственная среда с коэффициентом обратного рассеяния, зависящим от дальности  $L$  и угла  $\theta$  между вертикалью и направлением прихода в плоскости бокового обзора  $R = R(L, \theta)$ . Рассматривая коэффициент отражения  $R = R(u, \tau)$  как функцию двух параметров: углового  $u = \sin \theta$  и задержки  $\tau$  принятый сигнал на отдельной антенне  $Z_n(t)$  многоэлементной системы записывается в виде [3]

$$Z_n(t) = \iint R(u, \tau) S_0(t - \tau - \tau_n u) du \cdot d\tau, \quad u = \sin \theta.$$

Дальность  $L$  связана со временем распространения (задержкой)  $\tau$  соотношением  $\tau = 2L/C$ ,  $C$ -скорость звука, зависящая от многих параметров водной среды. Дополнительная задержка  $\tau_n = l_n/C$  обусловлена геометрической разностью путей прихода эхо сигналов на различные элементы антенны и определяется координатой  $l_n$  отдельного элемента в системе координат, связанной с антенной.

Для тональных сигналов интервал корреляции (область, где  $|K_0(\tau)|$  значимо отличен от нуля) определяется длительностью импульса  $T_0$ . Главное преимущество применения ЛЧМ зондирующих сигналов определяется тем, что за счет внутриимпульсной модуляции интервал

корреляции уменьшается до величины  $T_i/B$ , где  $B$  – база сигнала. Это позволяет сочетать высокий энергетический потенциал с высоким, порядка долей сантиметров разрешением.



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

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 при использовании этого класса систем для исследования относительно плоских районов морского дна, поиска малоразмерных предметов, деталей рельефа типа борозд, траншей, камней (рис.2). Для получения угловой избирательности применяются ГБО с интерферометрическими каналами [1,2,3,4]. Основным недостатком интерферометрических систем – отсутствие в некоторых условиях однозначности при селекции принимаемых сигналов с одинаковым запаздыванием по углу прихода, что приводит к ограничениям при их использовании в условиях многолучевости, сложного рельефа и т.д. [3]. Многоэлементные системы свободны от этих ограничений и позволяют разделять сигналы с нескольких направлений (параметрический подход) или с высоким угловым разрешением (непараметрическими методами).

Особенность применения таких приборов – это высокое разрешение по дальности при уменьшающемся разрешением вдоль линии пути от удаленности до отражающего участка. Существующие методы динамического сжатия мало эффективны, а классический синтез апертуры в водной среде связан с проблемами распространения и рассеяния водной средой. В последнее время появились сообщения о реализации и экспериментальных исследованиях в этом направлении.

Существующие в классических системах ограничения на параметры зондирующего сигнала и условия проведения съемки, вызваны необходимостью соразмерять ширину полосы доплеровских частот с частотой повторения зондирующих импульсов, и накладывают ограничения на ширину снимаемой полосы, или полосы захвата.

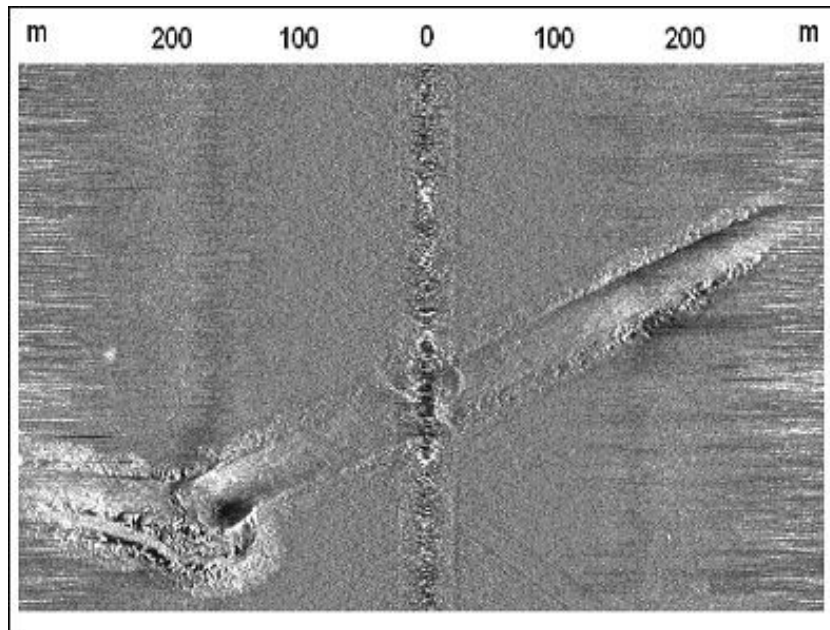


Рис.2 Фрагмент акустического изображения дна с ледовой экзарацией.

Усложнение антенной системы, приемной аппаратуры и системы обработки дает возможность снять упомянутое выше принципиальное ограничение. На рис.3 ниже приведена схема формирования узкого луча при помощи приема отраженного сигнала антенной решеткой.

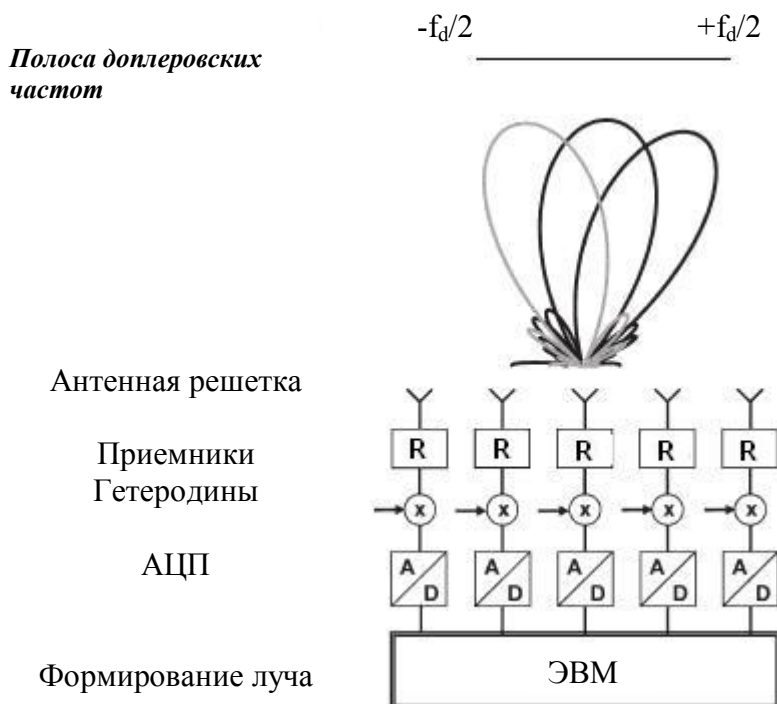


Рис. 3. Схема формирования узкого луча антенной решеткой.

Ширина полосы доплеровского спектра  $f_d$  в пределах освещенного передающей антенной пятна на поверхности, определяется диаграммой передающей антенны и задает предельную длину синтезируемой апертуры, а также минимальную частоту повторения зондирующих импульсов. При съемке широкой полосы поверхности, с целью согласования ширины доплеровского спектра при приеме с частотой повторения зондирующих импульсов, может

возникнуть необходимость сужения ширины диаграммы при приеме эхо-сигнала. Это может быть обеспечено применением узконаправленной антенны на приеме или использованием антенной решетки с дальнейшим синтезированием узкой диаграммы. Поскольку время наблюдения узким лучом выбранного участка поверхности снижается, для формирования исходного по времени интервала когерентного накопления необходимо выполнять электронное сканирование синтезированного луча во время прохода носителя около цели. Данный современный способ зондирования, за счет аппаратных усложнений, позволяет снять противоречие между полосой доплеровских частот эхо-сигнала и шириной снимаемой полосы поверхности.

Другим из одноканальных приборов, где ЛЧМ сигналы широко используются в экспериментальных образцах, являются акустические линейные профилографы. На рис. 4 приведен фрагмент профилирования морского дна в ледовых условиях Чукотского моря. Глубина примерно 70 метров. Результат профилирования показывает высокую помехозащищенность прибора, позволившую реализовать высокое разрешение донных отложений. Применение методов синтеза апертуры позволяет существенно повысить разрешение по трассе [5]. Однако существующие методы ненадежны и не дают прямых измерений акустических свойств среды распространения сигнала, таких, как скорость звука в грунте.

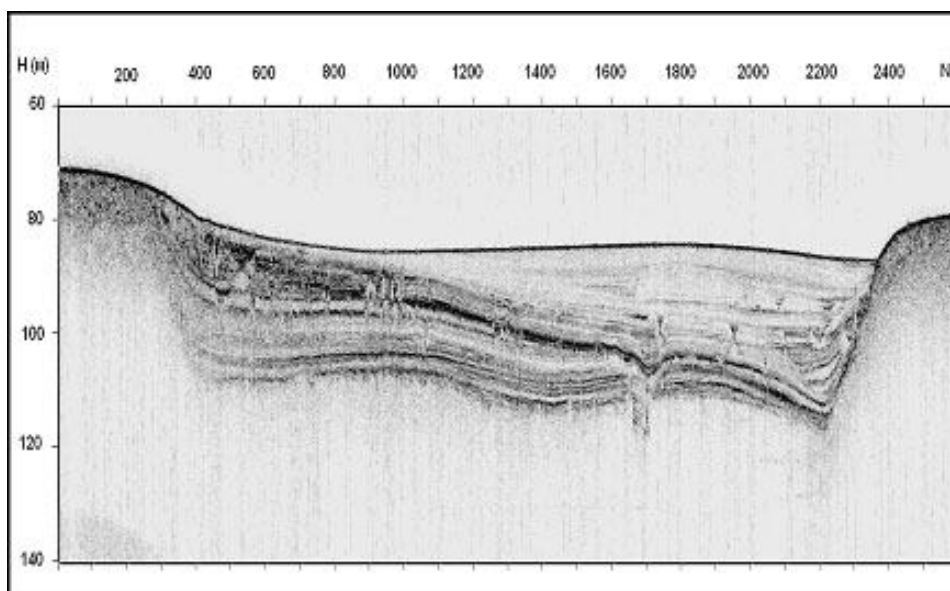
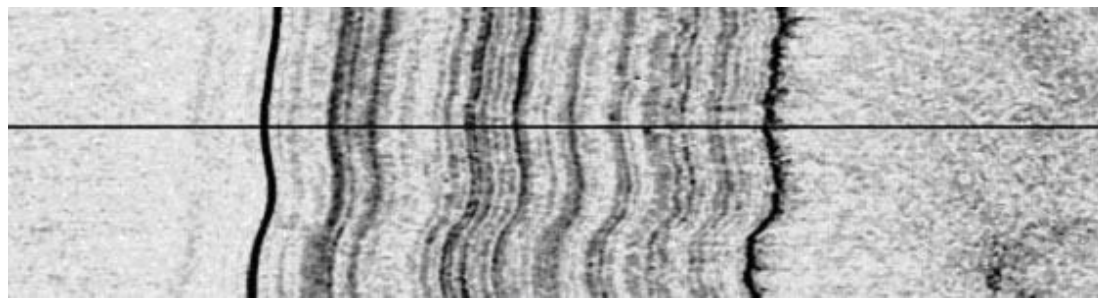


Рис.4. Профиль рельефа дна и осадочных пород (Чукотское море). Древнее русло реки.

Фазовые измерения эхолот-профилографа дают возможность дистанционного измерения вариаций акустических свойств донного грунта. Указанная задача решается на основе экспериментально обнаруженного при использовании низкочастотных эхолотов эффекта, заключающегося в том, что при узкой диаграмме направленности антенны и невысоком уровне возмущений фазы сигнала на неоднородностях водной среды отражения от слоев донного грунта становятся когерентными, а распределение начальной фазы отсчетов сигнала по дальности оказывается неслучайным.

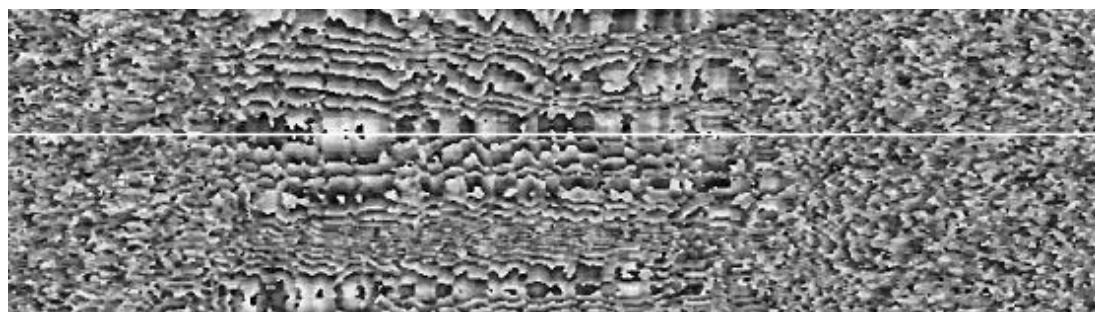
Информативность фазовых измерений проиллюстрируем данными эхолот-профилографа разработки ФИРЭ РАН на примере изображения на рис. 5. Наблюдаемые на фазовой картине (рис. 6) вариации фазы по строке и от строки к строке можно связать с вариациями акустических свойств грунта по методике из [6]. Значения коэффициента преломления в слоях, полученные представленным способом, лежат в диапазоне от 0.9 до 1.2, и не является случайной величиной. Такие значения коэффициента преломления являются характерными для донного грунта. Таким образом, данные вариации фазы эхо-сигналов при акустическом профилировании дна являются основой для непосредственного измерения коэффициента

преломления или скорости акустических волн в донном грунте, что является дополнительным признаком для дистанционной классификации донных отложений.



100m

Рис. 5. Фрагмент амплитудного изображения, полученного эхолот-профилографом.



100m

Рис. 6. Фрагмент фазовой картины, полученной эхолот-профилографом.

Подводя итог, следует отметить, что методы когерентной обработки получили широкое применение в гидролокации, а развитие фазовых методов на приеме и на этапе обработки информации расширяет возможности традиционных решений и подходов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Costnel C., Yoos L.T. Test and Evaluation of Interferometric Sonar Technology//Sea Technology, March 2007.
2. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М, Смольянинов И.В., Жуков А.В. Акустическое зондирование морского дна сигналами с линейной частотной модуляцией//Радиотехника, 2004, № 1, стр.42-46.
3. Каевицер В.И., Разманов В.М., “Измерение рельефа морского дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора//Радиотехника, № 12, 2005.
4. Разманов В.М., Кривцов А.П., Долотов С.А. Особенности измерений рельефа морского дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора//Радиотехника и электроника, Т. 51, № 1, 2006.
5. Разманов В.М. Применение методов синтеза апертуры в низкочастотных акустических профилографах/X Международная н.-т. конференция “Современные методы и средства океанологических исследований”, Москва, 2007, часть II, стр. 59.
6. Гуляев Ю.В. Захаров А.И., Каевицер В.И. Дистанционные измерения вариаций скорости звука в донных отложениях по данным акустического профилирования//ДАН.- Т.413. - № 2. – С.207 - 210.