



Диагностика подводных переходов. Многолучевые эхолоты.

Многолучевые эхолоты выполняют измерения глубины в поперечном направлении в обе стороны от акустической антенны. По мере того, как судно движется, поперечный профиль зарегистрированных значений глубин образует полосу измерений на дне, формируя в результате движения сплошную полосу акустического покрытия дна, состоящую из множества акустических лучей.

Ширина полосы покрытия может задаваться либо фиксируемым углом обзора (угол между крайними лучами), либо физической шириной, которая является переменной величиной, и изменяется с глубиной. Выбором междугалсового расстояния можно добиться совмещения или даже перекрытия смежных полос и таким образом обеспечить так называемую «площадную» съёмку дна.

В отличие от однолучевого эхолота, многолучевой эхолот измеряет не глубины, а наклонные дальности от дна до приёмной антенны и угловое отклонение оси каждого луча от вертикали. На основе этих данных и вычисляется глубина по каждому лучу. Современные многолучевые эхолоты способны измерять ещё и интенсивность отражённого сигнала по каждому лучу и на основе этой информации создавать геометрически правильное акустическое изображение участка дна в виде гидролокационного снимка. Этот снимок является координатно – привязанным непрерывным растровым изображением дна, аналогом гидролокационной «мозаики».

Передающая и приемная антенные решетки многолучевого эхолота, предназначенные для создания двух вееров лучей, имеют конфигурации в виде латинской буквы «L» или «Т» – так называемый «крест Миллса». Каждая антенная решетка состоит из множества одинаковых преобразователей, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга по одной линии. Антенны могут быть криволинейными (сферическими) или плоскими (рисунок 1).

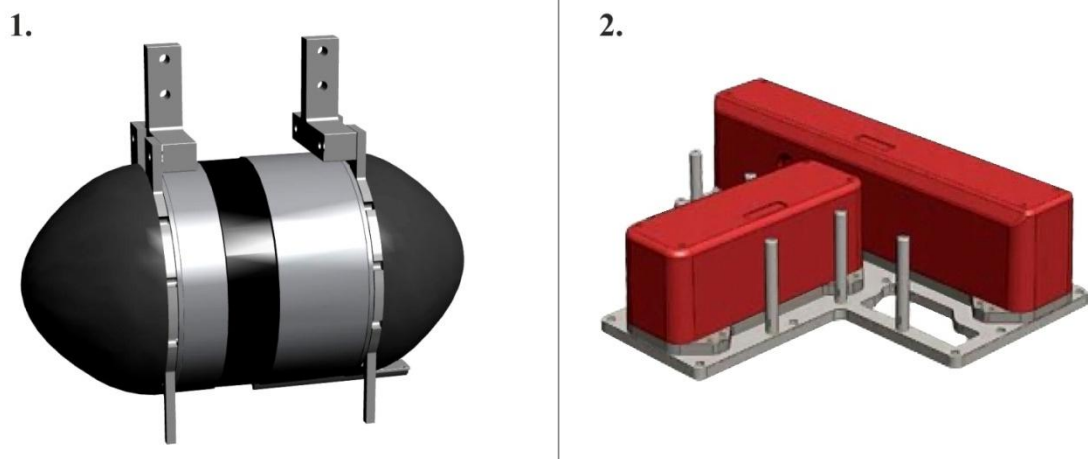


Рисунок 1 – Сферическая антенна многолучевого эхолота Reson Seabat 7101 (1) и плоская антенна эхолота Kongsberg Simrad EM2040 (2)

Каждая из антенных решеток создает сложный основной лепесток диаграммы направленности, узкий в направлении продольной оси антенной решетки. Пересечение лепестков диаграмм направленности передающей и приемной антенных решеток создает узкий «луч». Испускаемый луч имеет большую угловую ширину поперек направления движения и малую вдоль направления движения; и наоборот, многочисленные лучи, формируемые во время приема, являются широкими вдоль направления движения и узкими в поперечном направлении. Пересечение этих лучей на дне представляют собой акустически освещенные области, называемые «пятна акустического контакта» к центрам которых и проецируются вычисляемые глубины (рисунок 2).

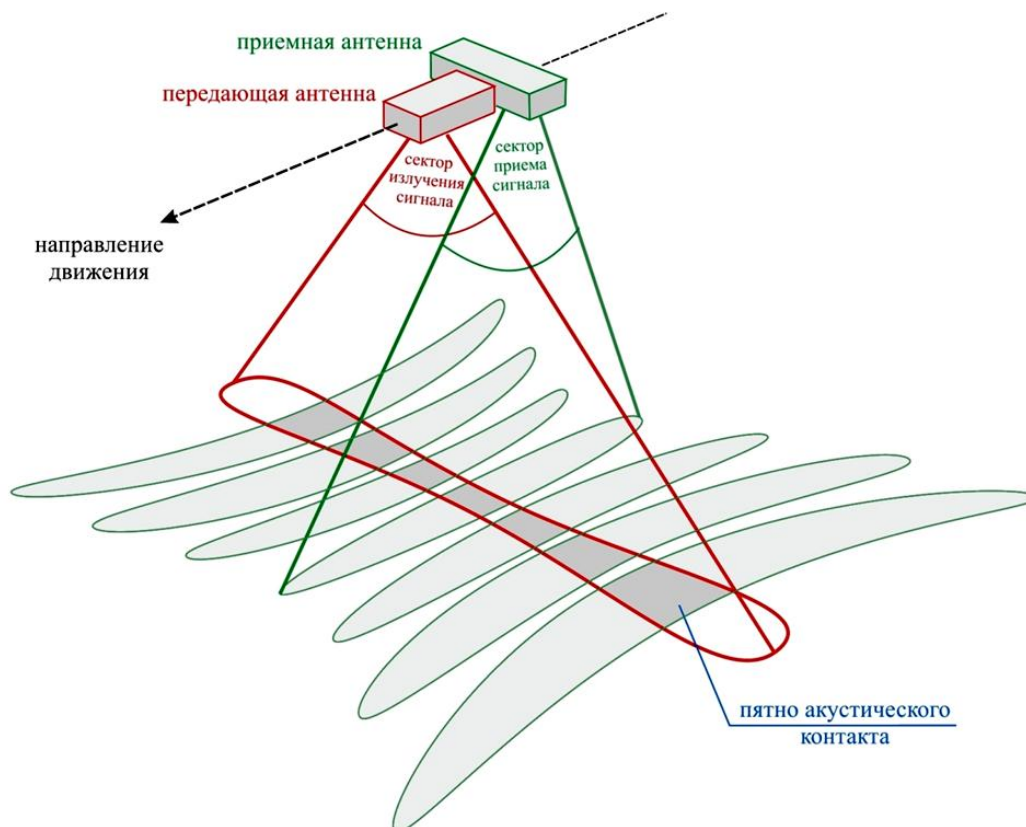


Рисунок 2 – Схема излучения и приёма акустических импульсов системой многолучевого эхолота

Пятна акустического контакта, сформированные центральными лучами, наиболее малы, и имеют правильную форму а пятна контакта на крайних лучах увеличиваются. Соответственно, точность и разрешающая способность при измерениях многолучевым эхолотом линейно уменьшается от центра полосы обзора к ее краям. По этой причине, как правило, накладываются ограничения на использование внешних лучей, что сокращает ширину полосы обзора.

Все многолучевые эхолоты используют единый подход при определении глубин: производится акустическое освещение полосы обзора на основе эхосигналов по наклонным лучам с известными углами приема и таким образом рассчитываются глубины. Время распространения акустического сигнала по каждому лучу пересчитывается в наклонную дальность, а затем с учетом угла луча и данных профиля скорости звука рассчитываются глубина центра пятна луча и его горизонтальное расстояние от центра антенны.

Наклонные дальности определяются с использованием амплитудного или фазового метода. Амплитудное детектирование основывается на определении времени, когда передний фронт сигнала встретится с дном. Обычно такое определение основывается на расчете центра тяжести огибающей сигнала или на методе согласованной фильтрации. Фазовое детектирование основывается на нахождении времени нулевой фазы с использованием двух и более подсекций приемной антенны. Амплитудное детектирование, как правило, используется на внутренних лучах (от 0° до 45° от вертикали), а фазовое детектирование обычно применяется на внешних лучах.

Многолучевые системы съемки обычно создаются с таким расчетом, чтобы между соседними лучами оставались промежутки от 0.5° до 3° . В соответствии с физической природой, достижимый промежуток между лучами пока не может быть менее 0.5° при сохранении приемлемых портативных габаритов гидроакустических антенн.

Качество данных многолучевого эхолота зависит от рабочей частоты, ширины диаграмм излучаемых и принимаемых лучей, а также алгоритма, используемого для детектирования дна. Аналогично однолучевому эхолоту, чем меньше угол луча, тем лучше система способна определить истинную глубину и получить высокое разрешение объектов на дне. Измерения наклонных дальностей и углов лучей в многолучевой системе являются более сложными, чем в однолучевом эхолоте. Но имеются многочисленные факторы, вносящие дополнительные погрешности в измерения. Необходимо учитывать: величину угла луча, угол падения луча на дно, угловую ширину излученного и принятого лучей, точности определения пространственных углов (крена и дифферента) и вертикального перемещения, алгоритм детектирования дна и профиль вертикального распределения скорости звука в воде.

Разрешением многолучевого эхолота является функция длительности импульса и размеров пятна акустического контакта. Пятно контакта для лучей, близких к вертикальному, достаточно мало, поэтому разрешение выше, чем у однолучевого эхолота. К примеру, у однолучевого эхолота, имеющего угол луча в 8° , площадь пятна контакта на дне будет в 28 раз больше, чем у вертикального луча многолучевого эхолота Kongsberg Simrad EM3002 с углом $1,5^\circ$.

Поскольку измерения наклонных дальностей производятся с судна, имеющего шесть степеней свободы (три поступательные и три вращательные), то для расчета глубин и их планового положения необходимы точные данные о широте, долготе, вертикальных перемещениях, а также углах крена, дифферента и курса. Поэтому, использование многолучевого эхолота невозможно без его сопряжения с системой датчиков, поэтому правильнее говорить о системе на базе многолучевого эхолота. Многолучевая система, кроме эхолота, должна включать следующее оборудование:

1) Датчик пространственной ориентации (ДПО), для измерения пространственных углов (крен, дифферент, курс) и вертикального перемещения носителя;

2) Датчик курса – также может быть интегрирован в ДПО, однако, оптимальным и более точным решением особенно для малых судов является использование курса, выработанного специальными системами позиционирования с двумя антеннами, устанавливаемым вдоль диаметральной плоскости судна. Результатом применяемой в них технологии является также возможность обеспечения высокоточного определения местоположения;

3) Зонд – профилограф скорости звука – для измерения профиля скорости звука в воде. Система многолучевого эхолота требует возможно более точного определения

профиля скорости звука в воде, чем однолучевой эхолот, поэтому при работе в сложных гидрологических условиях необходимо непрерывное измерение скорости звука.

4) Спутниковая система позиционирования – должна быть согласована с датчиком курса. Для этого используется спутниковая GPS (GNSS) аппаратура в режиме дифференциальной коррекции, режиме кинематики в реальном времени (RTK) или использующая спутниковый дифференциальный сервис.

Частоту многолучевого эхолота выбирают, исходя из предполагаемого использования оборудования, главным образом глубинного диапазона работы и требуемой разрешающей способности: чем выше рабочая частота, тем более ограничена глубина и лучше разрешающая способность.

В глубоководных многолучевых эхолотах, выполняющих измерения на глубинах до нескольких километров используется частотный диапазон от 12 до 50 кГц. Эхолот Kongsberg Simrad EM122, с частотой 12 кГц способен производить измерения в диапазоне «полных океанических глубин», до 11 000 м.

Многолучевые эхолоты, работающие в среднем глубинном диапазоне, до 1500 м, выполняют измерения на частотах в пределах 50 – 200 кГц.

Многолучевые эхолоты, имеющие рабочую частоту от 200 до 455 кГц являются наиболее мелководными устройствами, обладающими сравнительно невысокой мощностью, но имеют наибольшую разрешающую способность и точность измерений. Такие системы являются готовыми инструментами не только для точного картографирования рельефа дна, но и позволяют выполнять инспекцию подводных объектов, как с борта судна, так и с установкой на подводных телеуправляемых аппаратах. Частота 300 кГц является универсальной для выполнения работ по контролю за строительством и реконструкцией трубопроводов и других подводных сооружений, а также для контроля дноуглубительных работ, в условиях наличия большого количества взвешенных частиц в воде. Частота 400 кГц предпочтительна для инспекции трубопроводов и других подводных объектов с высоким разрешением. Этот режим позволяет получать разрешение по глубине менее 1 см, что обеспечивает максимальную детализацию исследуемых объектов.

Для обеспечения увеличенной полосы покрытия, некоторые системы многолучевого эхолота могут быть укомплектованы двумя гидроакустическими антеннами (рисунок 3).

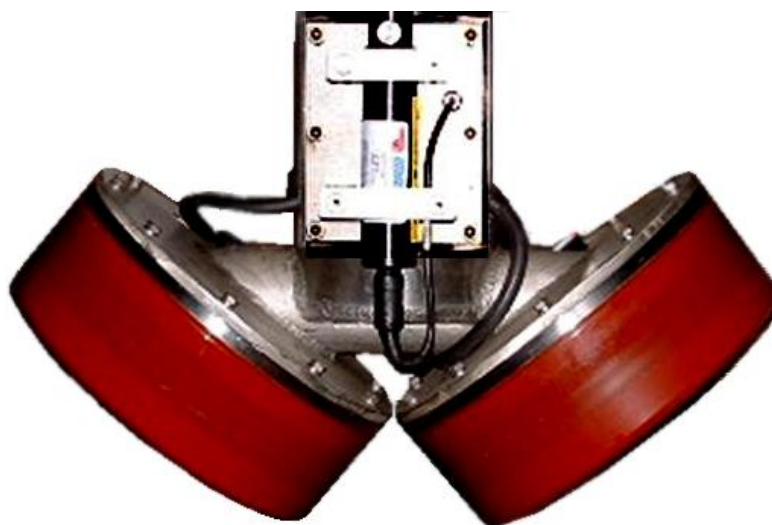


Рисунок 3 – Спаренная антенна многолучевого эхолота Kongsberg Simrad EM3002

Для выполнения работ по диагностике подводных переходов и морских подводных трубопроводов целесообразно использовать многолучевые эхолоты с рабочей частотой от 300 кГц и выше. Кроме того, они наиболее компактны, что позволяет монтировать их на небольшие суда. В таблице 1 приведены сравнительные характеристики некоторых многолучевых эхолотов, наиболее подходящих для задач диагностики подводных объектов.

Таблица 1 – Технические характеристики высокочастотных многолучевых эхолотов

	Reson Seabat 8125	Kongsberg EM3002	R2Sonic 2024	Kongsberg EM2040
Год начала производства	1999	2003	2009	2009
Рабочая частота	455 кГц	300 кГц	200–400 кГц	200, 300, 400 кГц
Возможность одновременной работы на двух частотах	–	–	Нет	Да
Максимальная частота посылок	40 Гц	40 Гц	60 Гц	50 Гц
Максимальный угол обзора	120°	130°	160°	140°
Максимальное количество лучей в одной посылке	512	254	256	800
Максимальная наклонная дальность излучения	120 м	250 м	500 м	500 м
Минимальная ширина луча	1,0° x 0,5°	1,5° x 1,5°	1,0° x 0,5°	1,0° x 0,5°
Разрешение по глубине	0,6 см	1 см	< 1 см	0,2 см
Стабилизация бортовой качки	Нет	Да	Да	Да
Стабилизация килевой качки	Нет	Да	Нет	Да
Вес антенны в воздухе	40 кг	25 кг	16 кг	35 кг

Подробность батиметрической съёмки является, важным критерием, так как при недостаточной подробности данных, есть вероятность пропуска ответственных участков, требующих детального изучения. При съёмке с использованием однолучевого эхолота основным фактором увеличения подробности является сгущение сетки съёмочных галсов.

При использовании многолучевого эхолота мы имеем полное покрытие дна акустическими импульсами в направлении поперек движения судна, в отличие от однолучевого эхолота, где имеем высокую плотность покрытия вдоль галса, и низкую – поперек. Кроме того, расчет глубины в пятне контакта многолучевого эхолота чрезвычайно сложнее, чем у однолучевого эхолота и включает в себя несколько сотен итераций, что обуславливает более тщательное детектирование подводных объектов. К тому же, количество полученных значений глубин у многолучевого эхолота больше, чем количество физических лучей и позволяет получать несколько значений глубины от одного пятна контакта.

Для выполнения работ по обследованию подводных переходов и морских трубопроводов необходимо соотносить размер объекта (диаметр трубопровода) с размером пятна акустического контакта на дне, который зависит от ширины диаграммы

направленности лучей эхолота и глубины нахождения объекта. Например, у эхолота Kongsberg Simrad EM3002, с шириной луча $1,5^\circ \times 1,5^\circ$, диаметр пятна акустического контакта на дне по центральному лучу при глубине 20 метров составит 0,52 м.

Степень покрытия дна акустическими сигналами многолучевого эхолота зависит также от ширины диаграммы направленности, угловых расстояний между лучами в направлении поперек движения, частоты посылок, скорости судна, а также величин углов рыскания, крена и дифферента. Для того, чтобы достигнуть полного покрытия дна необходимо, чтобы освещаемые области последовательных посылок перекрывались так, чтобы каждая точка дна освещалась хотя бы одним акустическим импульсом.

В Стандарте на гидрографические съемки SP-44 Международной гидрографической организации (МГО) при задании критериев обнаружения объектов, размер пятна контакта на дне не оговаривается, однако, это очень важный параметр от которого напрямую зависит возможность обнаружения подводных целей. Мировой практический опыт свидетельствует о том, что объект может быть уверенно распознан в случае его облучения единичным пятном контакта не менее 70 % от общей площади. В гидрографическом стандарте LINZ, уверенное распознавание объекта должно быть обеспечено не менее чем тремя акустическими контактами.

Отсюда, при выполнении площадных батиметрических съёмок инженерных объектов, к которым относятся подводные трубопроводы, целесообразно регламентировать минимальный размер (диаметр) объекта, который должен быть выявлен, и линейные параметры которого должны быть измерены (рисунок 4).

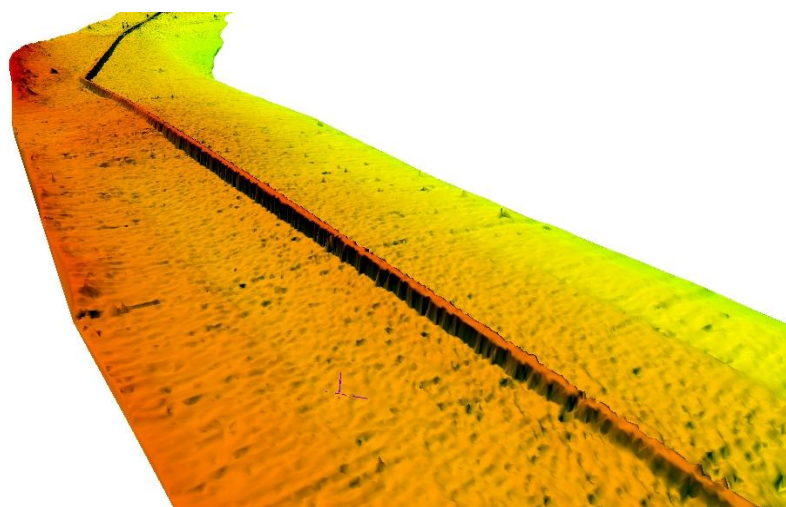


Рисунок 4 – Эхолот EM3002. Подводный трубопровод диаметром 530 мм, глубина 8 м

Нельзя не отметить также устройства, имеющие в последнее время все большую популярность и составившие некоторую конкуренцию многолучевым эхолотам в области съемок мелководных участков и внутренних водоемах. Речь идет о батиметрических ГБО с интерферометрической обработкой сигнала, или интерферометрах. Эти устройства используют фазовую составляющую сигнала для измерения угла фронта отраженной волны. Такой принцип отличается от реализованного в многолучевых эхолотах, где набор лучей на прием и детектирование дна осуществляется по каждому лучу амплитудным либо фазовым методом с целью обнаружения сигнала и расчета наклонных дальностей внутри полосы обзора.

В отличие от обычных гидролокаторов бокового обзора, интерферометры производят одновременно не только измерение наклонного расстояния, но и направления

на точку отражения акустического сигнала, что позволяет, как и в многолучевом эхолоте, вычислить положение точки относительно антенны. Интерферометрический метод измерений может обеспечивать большое количество измерения наклонных дальностей (до 1024), имеет высокую разрешающую способность и обладает очевидными преимуществами, которые не могут быть достигнуты другими известными методами:

- угол обзора может достигать 240°, а ширина покрытия – до 12 значений глубины;
- одновременное получение батиметрических данных и гидролокационной мозаики;
- стабильное и устойчивое определение направления внешних лучей;
- простое управление лучами при компенсации угловых перемещений антенны;
- малый вес и компактные размеры антенны (рисунок 5).

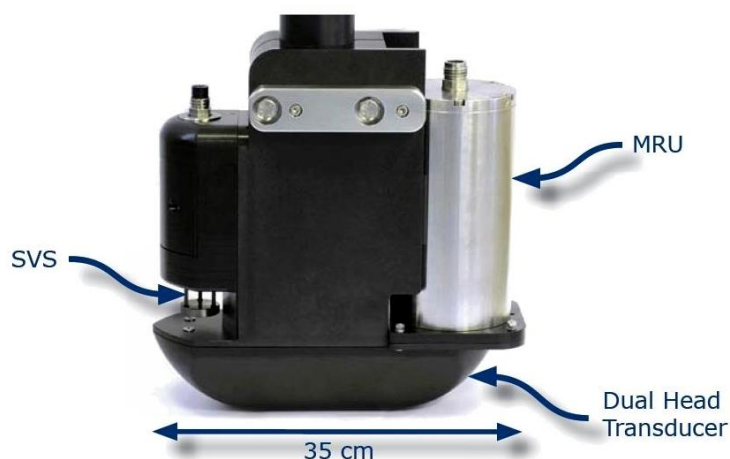


Рисунок 5 – Блок антенн батиметрического гидролокатора GeoSwath Plus Compact производства компании GeoAcoustics

К основным недостаткам интерферометрической системы относятся нестабильная работа на сложном и расчлененном рельефе, связанная с фазометрическими схемными решениями и низкое качество данных непосредственно под гидроакустической антенной. Несмотря на это, батиметрические гидролокаторы продолжают активно развиваться и уже составляют достойную конкуренцию многолучевым системам, как в области гидрографии, так и в области диагностики подводных переходов трубопроводов.

Автор статьи:

Гринь Григорий Анатольевич, заместитель директора ПТФ «Возрождение»

Список источников:

Фирсов, Ю.Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров / Ю.Г. Фирсов. – СПб.: Нестор–История, 2010. – 303 с.

Freddy Pøhner. Improved Object Detection with new Generation of Multibeam Echo Sounders / Kongsberg Maritime AS. – 2004.

Hydrographic MBES Survey Standards / TH Standard 23 Version 2.2, 2000. – 26 pp.

IHO Standards for Hydrographic Survey. Special Publication SP-44, 5th Edition. Monaco, 2008. – 28 pp.

IHO Manual on Hydrography / International Hydrographic Bureau, Publication M-13, 1-st Edition Monaco, 2005. – 511 pp.

IHO Standards Of Competence For Hydrographic Surveyors / International Hydrographic Organisation. Publication M-5. Ninth Edition, updated – 2007. – 57 pp.