

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.8

УДК 551.463, 621.391

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ЭХО-СИГНАЛОВ В МНОГОЛУЧЕВОМ ЭХОЛОТЕ С ЛЧМ ЗОНДИРУЮЩИМ СИГНАЛОМ

А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
РАН, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2020 г.

Аннотация. Рассмотрен алгоритм подавления сигналов, проходящих по боковым лепесткам многолучевого эхолота (МЛЭ), ориентированный на использование в эхолотах с цифровой системой формирования диаграммы направленности антенной решетки (АР). Алгоритм основан на использовании данных площадной съемки получаемых МЛЭ в процессе гидролокационного зондирования донной поверхности. Приведен пример применения алгоритма для коррекции углового спектра эхо-сигнала в многолучевом эхолоте с ЛЧМ зондирующим сигналом.

Ключевые слова: гидроакустические системы, многолучевой эхолот, ЛЧМ зондирующий сигнал, подавление боковых лепестков.

Abstract: The algorithm for suppressing signals passing through the side lobes of a multibeam echosounder is developed. This algorithm is intended for use in sounders with a digital system of generating an antenna array pattern. The algorithm is based on the use of area survey data obtained by multibeam echosounder in the process of sonar sounding of the bottom surface. An example of using this algorithm for correcting the angular spectrum of echo signal in multibeam echosounder with a linear frequency modulated (chirp) sounding signal is given.

Key words: sonar systems, multibeam echosounder, chirp sounding signal, suppression of side lobes.

1. Введение

Многолучевые эхолоты находят широкое применение в современных комплексах картографирования морского дна, позволяя вычислять глубины и

одновременно получать акустические изображения донной поверхности в широкой полосе обзора. Возрастающие требования к качеству обработки данных, применение в МЛЭ сложных зондирующих сигналов диктуют необходимость создания новых вычислительных методов и алгоритмов обработки гидроакустической информации. В настоящей работе рассмотрен способ подавления сигналов, проходящих по боковым лепесткам многолучевого эхолота, ориентированный, в том числе, и на применение ЛЧМ зондирующих сигналов в эхолотах с цифровой системой формирования диаграммы направленности антенной решетки. Рассматриваемый алгоритм, использующий в своей работе данные дистанционного зондирования донной поверхности, является доработанной версией алгоритма подавления боковых лепестков, описанного в [1].

2. Алгоритм подавления боковых лепестков

Принцип работы алгоритма подавления сигналов, проходящих по боковым лепесткам, рассмотрим в рамках лучевого приближения. Пусть $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$ – эхо-сигналы, приходящие с направлений формирования лучей многолучевого эхолота, задаваемых углами прихода $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ (см. Рис. 1). Здесь t - время прихода сигнала, n - число лучей.

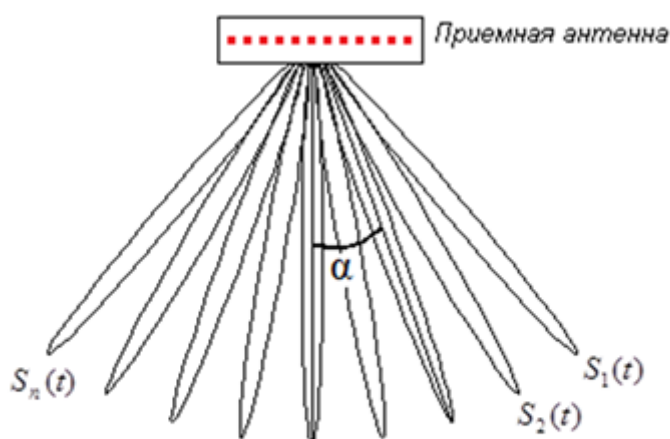


Рис. 1. Векор лучей многолучевого эхолота

При формировании главного луча антенной решетки в направлении α_1 сигнал $P_1(t)$, регистрируемый с данного направления, может быть записан в виде суммы:

$$P_1(t) = k_{11}S_1(t) + k_{12}S_2(t) + \dots + k_{1n}S_n(t) \quad (1)$$

где k_{11} – коэффициент прохождения эхо-сигнала с главного направления α_1 , а k_{12}, \dots, k_{1n} – коэффициенты, определяющие прохождение эхо-сигналов по боковым лепесткам с направлений, задаваемых углами $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$. Выписав аналогичные соотношения для сигналов, регистрируемых с других направлений, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} P_1(t) = k_{11}S_1(t) + k_{12}S_2(t) + \dots + k_{1n}S_n(t) \\ P_2(t) = k_{21}S_1(t) + k_{22}S_2(t) + \dots + k_{2n}S_n(t) \\ \dots \\ P_n(t) = k_{n1}S_1(t) + k_{n2}S_2(t) + \dots + k_{nn}S_n(t) \end{cases} \quad (2)$$

Здесь k_{ij} – коэффициенты, определяющие уровень прохождения сигнала с направления α_j при формировании главного лепестка антенной решетки в направлении α_i ; $P_i(t)$ – сигнал как функция времени, регистрируемый в процессе гидролокационной съемки с направления α_i .

При известных параметрах МЛЭ и условиях гидролокационного зондирования все коэффициенты k_{ij} могут быть вычислены теоретически [2-4]. В этом случае, решая систему линейных уравнений (2) относительно $S_i(t)$, получаем искомый набор “чистых эхо-сигналов” с направлений обзора α_i .

В реальных условиях гидролокационной съемки теоретическое вычисление коэффициентов k_{ij} затруднено из-за изменчивости характеристик водной среды. Поэтому для их расчета было предложено использовать итерационный алгоритм вычисления коэффициентов непосредственно по данным гидролокационного зондирования донной поверхности. Описание этого алгоритма рассмотрим на примере вычисления коэффициентов k_{1j} для первого

уравнения системы уравнений (2). Принцип работы алгоритма базируется на отыскании минимума следующей функции:

$$F(k_{11}, \dots, k_{1n}) = \sum_{l=1}^L [P_1(t_l) - k_{11}S_1(t_l) - \dots - k_{1n}S_n(t_l)]^2 \quad (3)$$

Здесь $P_1(t_l)$ - оцифрованные эхо-сигналы, регистрируемые МЛЭ с направления, задаваемого углом α_1 в моменты времени t_l . Суммирование в (3) ведется по данным одного цикла излучения и приема сигнала. L - число отсчетов сигнала в массиве данных. На первом шаге итерационного алгоритма в качестве отсчетов $S_i(t_l)$ следует взять отсчеты $P_i(t_l)$.

Набор коэффициентов k_{11}, \dots, k_{1n} , минимизирующих функцию (3), находим путем решения системы уравнений:

$$\frac{\partial F}{\partial k_{1j}} = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{cases} a_{11}k_{11} + a_{12}k_{12} + \dots + a_{1n}k_{1n} = b_1 \\ a_{21}k_{11} + a_{22}k_{12} + \dots + a_{2n}k_{1n} = b_2 \\ \dots \\ a_{n1}k_{11} + a_{n2}k_{12} + \dots + a_{nn}k_{1n} = b_n \end{cases} \quad (5)$$

где

$$a_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L S_i(t_l)S_j(t_l); \quad b_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L P_i(t_l)S_i(t_l) \quad (6)$$

Система уравнений (5) содержит n уравнений и столько же неизвестных. Как видно из (6), матрица $\|a_{ij}\|$ линейной системы представляет собой корреляционную матрицу входных сигналов. Элементы столбца свободных

членов b_i являются собой множество значений взаимокорреляционной функции отсчетов полезного отклика (приходящего сигнала $S_i(t)$) и отсчетов регистрируемого сигнала $P_i(t)$. Решение этой системы относительно k_{1j} определяет набор искоемых коэффициентов.

Применяя описанный способ вычисления коэффициентов для других уравнений системы (2) находим полный набор коэффициентов k_{ij} , необходимых для работы алгоритма подавления боковых лепестков на первом этапе. Решая систему уравнений (2), вычисляем набор эхо-сигналов $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$, приходящих с направлений формирования лучей многолучевого эхолота. Далее, при необходимости, на второй итерации используем полученные значения $S_i(t)$ для вычисления уточненных коэффициентов k_{ij} с помощью системы уравнений (5). Полученные таким образом значения коэффициентов k_{ij} используются в дальнейшем для коррекции сигналов многолучевого эхолота.

Чтобы уменьшить влияние флуктуационной составляющей, расчеты коэффициентов k_{ij} следует проводить по данным гидролокационной съемки донной поверхности с простым и ровным рельефом. Непосредственно используемые в алгоритме подавления боковых лепестков коэффициенты находятся путем статистического усреднения этих величин, полученных по множеству обработанных строк данных. Отметим также, что при практическом применении весь набор коэффициентов должен периодически пересчитываться из-за изменения гидрологических условий съемки.

Таким образом, процедура обработки данных многолучевого эхолота с применением алгоритма подавления боковых лепестков проводится в следующей последовательности. Сначала цифровыми методами формируются выходные сигналы МЛЭ $P_i(t)$ с направлений обзора α_i . Далее сформированный веер лучей корректируется алгоритмом подавления боковых лепестков с помощью заранее вычисленных коэффициентов k_{ij} . Полученный после

коррекции веер лучей используется на последующих этапах обработки для извлечения полезной информации.

3. Пример применения алгоритма подавления боковых лепестков

Проверка работы алгоритма была выполнена на данных многолучевого эхолота, разработанного в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, в состав которого входила 32-элементная линейная приемная антенна, устройство формирования и излучения ЛЧМ сигналов и многоканальный малошумящий цифровой приемник диапазона 30 кГц с интерфейсом ввода на базе платы L-Card L783 [5]. В процессе работы излучаемый зондирующий сигнал после отражения от морского дна принимался линейной антенной решеткой с независимой регистрацией квадратурных компонент эхо-сигналов по каждому из 32-х каналов. Таким образом, регистрируемые данные для каждого канала представляли собой массив (строку) оцифрованных отсчетов Re и Im компонент принятого сигнала в функции от времени прихода. Каждая строка соответствует одному циклу излучения и приема сигнала. Далее цифровыми методами формировались 32 независимых луча в виде эхо-сигналов, принимаемых с заданных направлений по углу места (угол α - в плоскости, проходящей через линию расположения элементов решетки см. Рис. 1). Обзор пространства в перпендикулярном направлении осуществлялся за счет движения судна-носителя гидролокационной системы.

Для синтеза многолучевой диаграммы направленности и формирования выходных сигналов антенной решетки применялся алгоритм, использующий быстрое преобразование Фурье. В соответствии с этим алгоритмом в каждом цикле излучения и приема проводится вычисление пространственных спектров эхо-сигналов. Отсчеты спектральных составляющих представляют собой сигналы на выходе АР, принятые с направлений, определяемых соотношением:

$$\sin(\alpha_i) = -\frac{(i-1)\lambda}{nd} \quad (7)$$

где α_i - угол прихода эхо-сигнала, i - номер спектральной составляющей, λ - длина волны зондирующего сигнала, d - расстояние между соседними элементами решетки ($d \approx \lambda/2$), n - число элементов решетки.

На Рис. 2 показаны спектры одного и того же эхо-сигнала, полученные с использованием двух вариантов обработки. По вертикальной оси на каждой картинке отложен номер луча i ($-15 \leq i \leq 16$), связанный с углом прихода эхо-сигнала соотношением (7). По горизонтали – время прихода сигнала. Более яркие участки соответствуют большей мощности принятого сигнала. Таким образом, на рисунках в яркостном виде показаны выходные сигналы 32-канальной АР, синтезированные для 32-х направлений прихода эхо-сигнала.

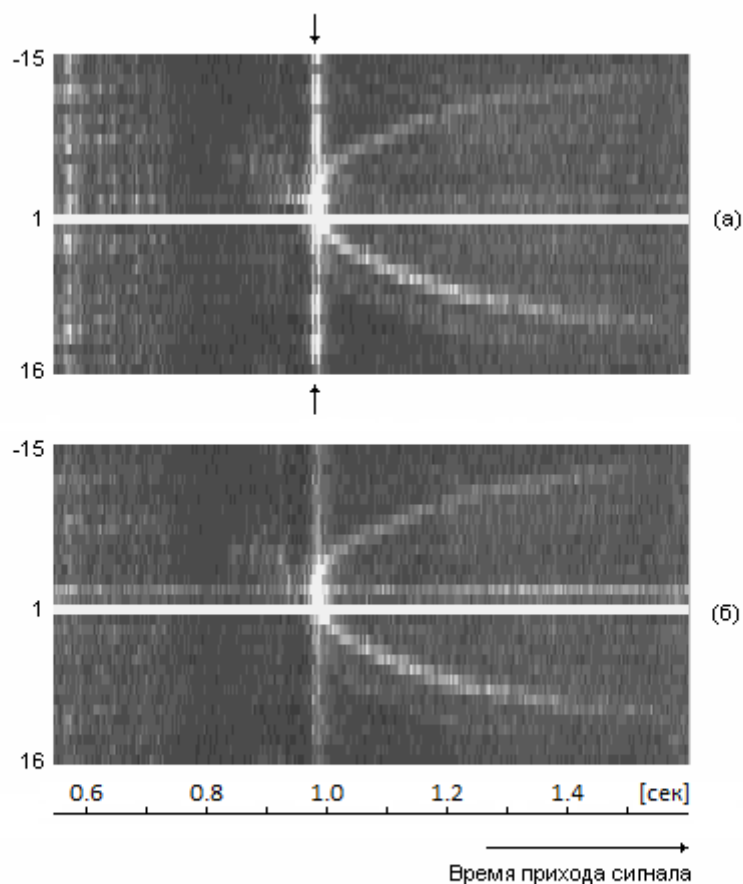


Рис. 2. Пространственные спектры сигнала многолучевого эхолота для одного цикла излучения и приема сигнала (разные варианты обработки).

Представленные спектры получены для сигнала, отраженного от ровного дна на глубине около 700 метров. На Рис. 2а формирование лучей выполнено с

прямоугольным амплитудно-фазовым распределением по раскрыву АР. В обработке данных, показанных на Рис.2б, также применялось прямоугольное окно, но была выполнена дополнительная коррекция спектров алгоритмом подавления боковых лепестков. Полезный сигнал, несущий информацию о рельефе и отражательных свойствах донной поверхности, проявляется на рисунках в виде параболы. Вершина параболы приходится на луч, сформированный в направлении первого прихода эхо-сигнала. Смещение вершины параболы от направления $\alpha = 0^\circ$, что соответствует лучу с номером $i = 1$, объясняется креном носителя эхолота во время гидролокационной съемки.

На Рис. 2а стрелками сверху и снизу обозначены сигналы, проходящие по боковым лепесткам антенной решетки с направления первого прихода сигнала (угол $\alpha \approx 0^\circ$). Такая картина обычно наблюдается в случае ровного и плотного грунта, когда существует сильный отраженный от донной поверхности эхо-сигнал по вертикали. Как видно на Рис. 2б, коррекция данных позволила заметно уменьшить уровень этих мешающих сигналов, оставляя при этом почти без изменений сигналы, приходящие по главным лепесткам АР с других направлений.

В качестве замечания отметим, что моделирование и более детальный анализ представленного алгоритма показали, что он лучше работает тогда, когда формируемые цифровыми методами лучи антенной решетки близки к ортогональным. Если ортогональность пространственных диаграмм направленности отдельных лучей не соблюдается, то наряду с подавлением боковых лепестков наблюдается и ослабление сигналов, проходящих по главным лепесткам, причем тем больше, чем больше нарушена взаимная ортогональность лучей.

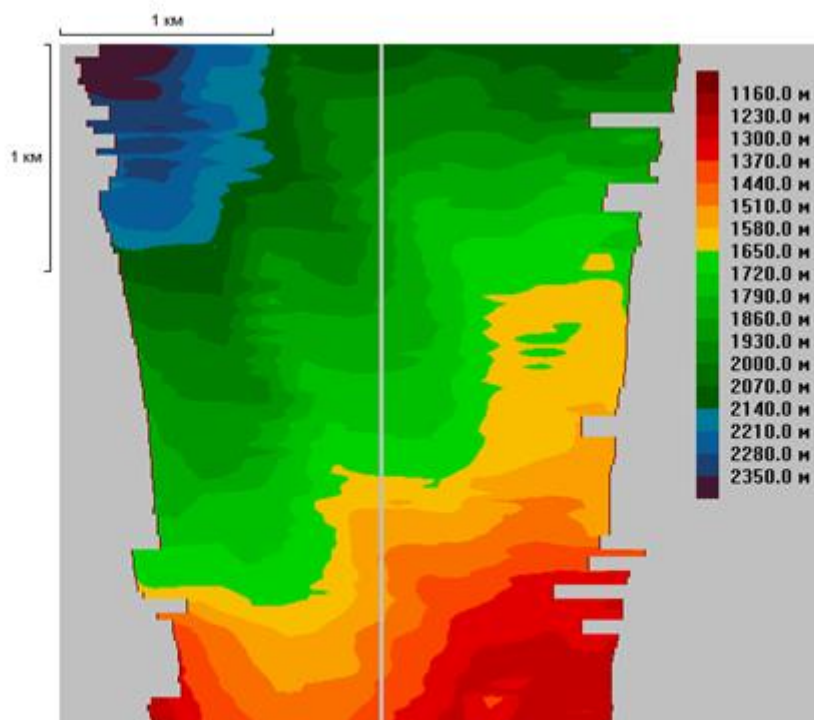


Рис. 3. Батиметрическая карта участка морского дна с крутым склоном.

На Рис. 3 для примера представлен в яркостном виде фрагмент батиметрической карты участка морского дна с крутым склоном, построенный по данным гидролокационной съемки многолучевого эхолота в Японском море. В процессе обработки данных сформированный цифровыми методами веер лучей корректировался рассмотренным выше алгоритмом подавления боковых лепестков. Вычисление коэффициентов k_{ij} было выполнено заранее на одном из сравнительно ровных участков морского дна.

4. Заключение

Рассмотренный в настоящей работе алгоритм относится к классу адаптивных алгоритмов, выполняющих настройку параметров обработки данных для компенсации и подавления помех, проходящих по боковым лепесткам МЛЭ. Алгоритм ориентирован на применение в эхолотах с цифровой системой формирования диаграммы направленности антенной решетки. Необходимые для адаптивной пространственной обработки коэффициенты

формируются на основе данных площадной съемки и, при необходимости, могут пересчитываться из-за изменения условий гидролокационного зондирования. Проверка работы алгоритма на экспериментальных данных показала его эффективность для снижения уровня помех, проходящих по боковым лепесткам многолучевого эхолота.

Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Литература

1. Кривцов А.П. Алгоритм коррекции углового спектра эхо-сигнала в многолучевом эхолоте с ЛЧМ зондирующим сигналом // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, Москва, 26-30 октября 2009 г., с. 969-973.
2. Проектирование фазированных антенных решеток, Под ред. Д.И. Воскресенского. Москва. Радиотехника. 2003. 632 с.
3. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Москва. Сайнс-пресс. 2002. 232 с.
4. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Москва. Техносфера. 2012. 560 с.
5. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // Радиотехника. 2008. № 8. С. 35-42.

Для цитирования:

Кривцов А. П., Смольянинов И. В. Алгоритм коррекции эхо-сигналов в многолучевом эхолоте с ЛЧМ зондирующим сигналом. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/8/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.8