

УДК 551.463.621.391

ЛОКАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ЛЧМ ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ

В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2018 г.

Аннотация: Рассмотрен метод локального позиционирования подводных аппаратов гидроакустической системой с ЛЧМ зондирующими сигналами. Метод основан на измерении дальности до объекта и вычислении углов прихода эхо-сигналов на две или более разнесенные антенны. Для увеличения энергетики и помехозащищенности применены сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Экспериментально показана возможность практического использования данного метода для высокоточного измерения пространственного положения подводного буксируемого или автономного аппарата относительно надводного судна и, соответственно, возможность географической привязки получаемых подводным аппаратом акустических изображений и профилограмм морского дна. Представлены результаты натурных испытаний экспериментальной системы позиционирования.

Ключевые слова: гидроакустические системы, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, системы локального позиционирования.

Abstract. We consider the method of local positioning of underwater vehicles by a hydroacoustic system with chirp probing signals. The method is based on the measurement of the distance to the object and calculating the angles at which the echo signals arrive at two or more separately placed antennas. To increase power and noise immunity, we apply linear frequency modulated (chirp) signals. We have experimentally shown the possibility of the practical use of this method for high-precision measurement of the spatial position of an underwater towed or autonomous vehicle relative to a surface vessel and, accordingly, the possibility of geo-referencing

acoustic images and profilograms of the seabed obtained by the underwater vehicle. The article presents the results of the field tests of an experimental positioning system.

Key words: sonar systems, interferometric side-scan sonar, local positioning systems.

1. Введение

При проведении гидрографических изысканий проблема высокоточного картирования морского дна решается с помощью гидролокационных комплексов, включающих в себя различные типы эхолотов и гидролокаторов бокового обзора, устанавливаемых на борту гидрографических судов. В открытом море для позиционирования гидролокационного комплекса и определения его географического положения, как правило, используются глобальные навигационные системы ГЛОНАСС / GPS. При хорошей видимости спутников и использовании алгоритмов коррекции дифференциального режима погрешность определения координат гидрографического комплекса составляет 1-2 метра, что на небольших глубинах (до 200 метров) обеспечивает при картировании дна необходимую точность определения координат подводных объектов. На больших глубинах для получения детальных изображений морского дна гидролокационные комплексы приближаются ко дну путем установки на буксируемые за судном или автономные подводные аппараты (ПА). При этом возникает проблема определения пространственного положения аппаратуры съемки относительно буксирующего или сопровождающего судна. Для этих целей используются акустические системы подводного позиционирования на основе различных систем – подводные акустические маяки, судовые системы подводного позиционирования на основе интерферометрических систем с различной базой для пеленгации сигналов акустического ответчика, установленного на подводном аппарате. Коммерческие системы подводного позиционирования обычно используют тональные импульсные посылки. Это ограничивает возможность их

применения в сложной помеховой обстановке и на больших дальностях из-за ограниченной энергетики и возможных амплитудных ограничений в приемных трактах. Известно [1,2], что применение сигналов со сложной модуляцией и оптимальных методов обработки принимаемых сигналов существенно улучшают надежность работы локационных систем.

В работе проведено исследование возможностей и некоторых особенностей пеленгования ПА с установленным на нем маяком-ответчиком с ЛЧМ сигналом, запускаемым по команде с буксирующего или сопровождающего судна по кабелю либо акустическому каналу. Приводятся результаты экспериментальных измерений по пеленгованию подводного аппарата, находящегося вблизи дна, при высоком уровне помех от сигналов, рассеянных дном.

2. Назначение и принцип работы

В основе работы рассматриваемой системы позиционирования лежит принцип определения координат маяка - ответчика по измерениям дальности до него от двух (или более) разнесенных антенн, установленных на буксирующем судне. Как показано на рис. 1, пространственное положение акустического маяка может быть определено путем решения стандартной задачи триангуляции. Дополнительными данными при картировании дна является информация, получаемая от установленных на ПА датчиков заглубления H_1 , крена, дифферента и курса, а также результаты эхолотных измерения глубины под аппаратом H_2 . При наличии измерений дальности от маяка до двух или более приемных антенн расчетным путем находятся угловые координаты объекта относительно буксирующего судна и по ним, с учетом измерений судовых спутниковых навигационных систем, вычисляется его положение, привязанное к географическим координатам.

На рис.1 приведен рассмотренный в работе вариант системы локального позиционирования, представляющий собой двухантенный A_1 и A_2 интерферометр с короткой базой d . В её состав также входит буксируемый

акустический маяк с ненаправленным акустическим излучателем, компьютер и специальное программное обеспечение по управлению работой комплекса. Измерение расстояний R_1 и R_2 от буксируемого аппарата до антенн проводится по акустическому каналу.

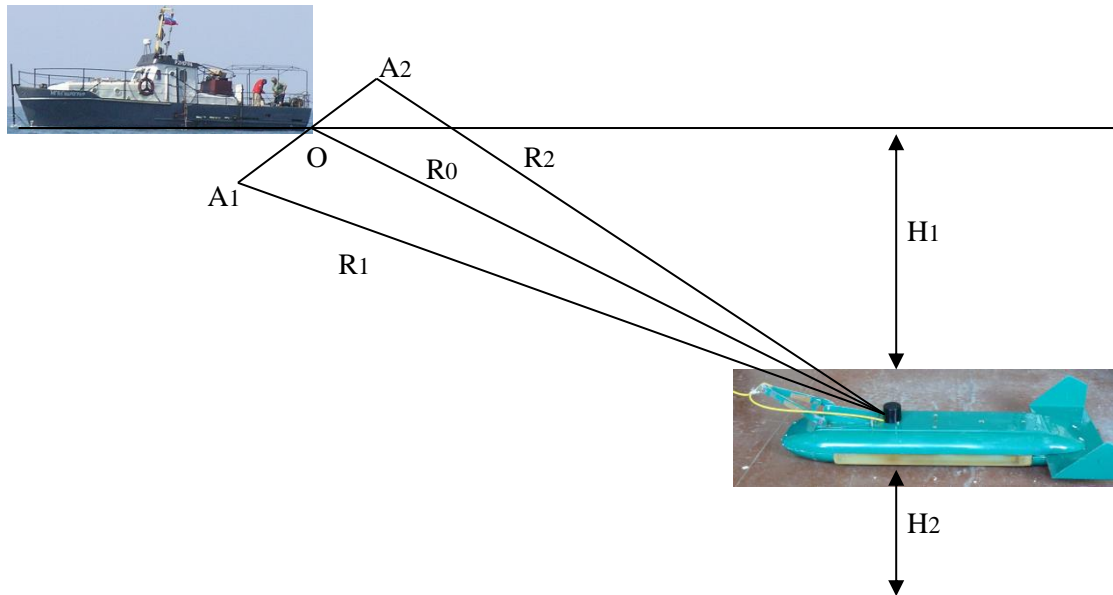


Рис. 1. Схема движения подводного аппарата с маяком-ответчиком и размещение двухантенного акустического интерферометра на буксирующем судне. База интерферометра: $d = A_1 A_2$

Для повышения дальности в рассматриваемой системе позиционирования применяются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и специальные методы их обработки. Для наглядности рассмотрим метод, позволяющий преобразовать эхосигналы от акустического маяка ПА и сигналы, рассеянные дном в частотную область. Суть метода поясняется на рис 2.

Преобразование эхосигналов S_1 и S_2 из временной в частотную область осуществляется их умножением на гетеродинный ЛЧМ сигнал S_0 , имеющий ту же скорость изменения частоты, что и эхосигналы, но большую длительность, соответствующую интервалу времени приема всех эхосигналов. Если произвести перемножение сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ с гетеродином $s_0(t)$, то после низкочастотного фильтра получим разностный низкочастотный сигнал,

представляющий собой сумму радиоимпульсов, длительностью τ , отличающихся по частоте на ΔF . Если записать закон изменения частоты ЛЧМ посылок, как $f = f_0 + bt$, где b – скорость изменения частоты, а сам сигнал, соответственно, $s(t) = \exp(j(\omega_0 + bt^2/2))$, то выполняется соотношение $\Delta F = \Delta t b$. В общем случае, сигналы на выходе приемных устройств интерферометра представляют собой сумму квазигармонических радиоимпульсов, частоты которых сдвинуты относительно начальной частоты сигнала f_0 на величины, пропорциональные задержкам распространения и скорости перестройки частоты b , а амплитуды определяются мощностью сигналов маяка и рассеянных дном, в направлении приемников.

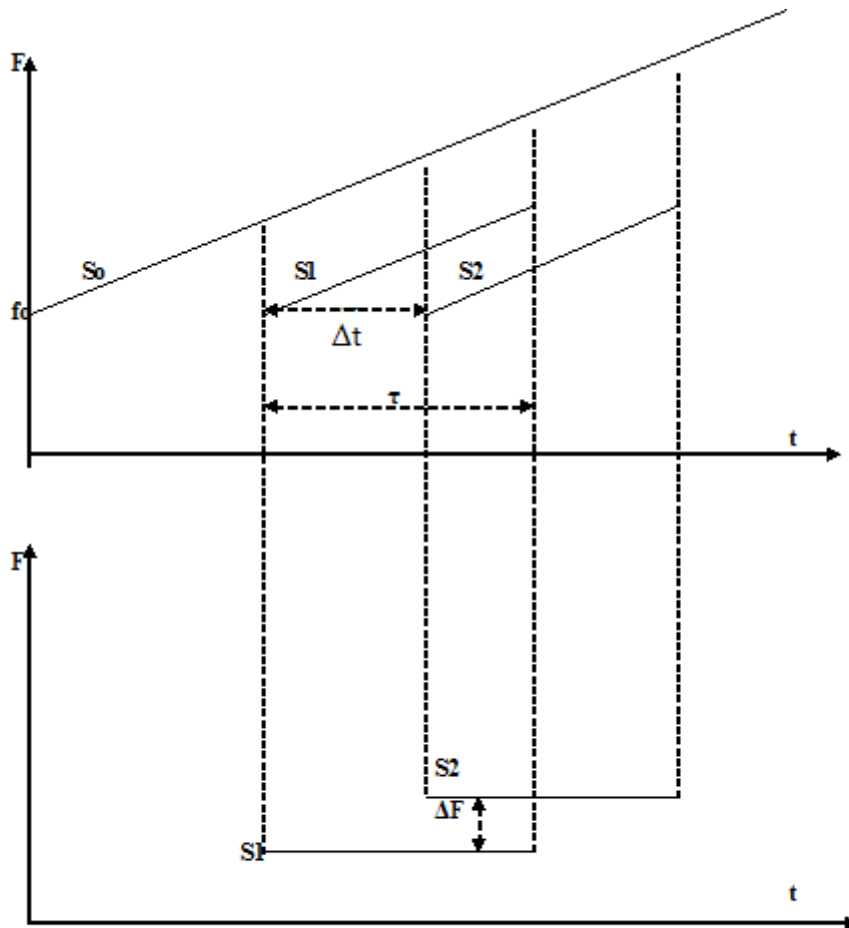


Рис 2. Преобразование ЛЧМ эхосигналов S_1 и S_2 длительностью τ , смещенных по времени на Δt из временной области в низкочастотный спектр. Сигналы оказываются разнесенными по частоте на ΔF .

Устройство обработки разностного сигнала осуществляет узкополосную фильтрацию по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Спектры радиоимпульсов S_1 и S_2 в идеальном случае имеют вид $\sin(x)/x$, где $x = \Omega\tau/2 = 2\pi F\tau/2$. Для оценки разрешения между двумя спектральными максимумами можно взять первый нуль функции $\sin(x)/x$: $(2\pi F\tau)/2 = \pi$, то есть точность измерения частоты зависит от длительности ЛЧМ посылки и составляет $\sim 1/\tau$, соответственно, по дальности $\sim cb/\tau$, где c - скорость звука в воде. Учитывая, что $b = F_m/\tau$ где F_m – частотная девиация, получим: c/F_m - то же значение, что и при корреляционной обработке ЛЧМ сигналов [2]. Отметим, что при больших соотношениях сигнал/шум можно применять дополнительную обработку эхосигналов с использованием алгоритмов сверхразрешения спектральных составляющих и, соответственно, существенно улучшить разрешение по дальности.

3. Тестирование системы позиционирования

Экспериментальная проверка работы системы локального позиционирования проводилась с использованием аппаратуры комплекса, блок-схема которого приведена на рис. 3. В аппаратуре использованы модули и программное обеспечение, описанные в [3].

Для оценки возможности практического применения предложенной системы позиционирования было выполнено ее тестирование при работах в прибрежной зоне небольшого водоема. В ходе испытаний гидроакустические антенны комплекса размещались стационарно вблизи берега, а радиоуправляемый катер [4] перемещался по обследуемой акватории параллельно линии A_1A_2 и буксировал антенну акустического маяка. База интерферометра составляла 1.5 метра. Для синхронизации работы аппаратуры на берегу с аппаратурой на катере применялась связь по радиоканалу.

Зондирующий сигнал маяка–ответчика излучался на частоте 240 кГц с девиацией ЛЧМ полосой 25 кГц. Его пространственное положение вычислялось по измерениям дальностей R_1 и R_2 до гидроакустических антенн.

Точность этих измерений была около 5 см. Полученная информация регистрировалась и в дальнейшем подвергалась цифровой когерентной обработке.

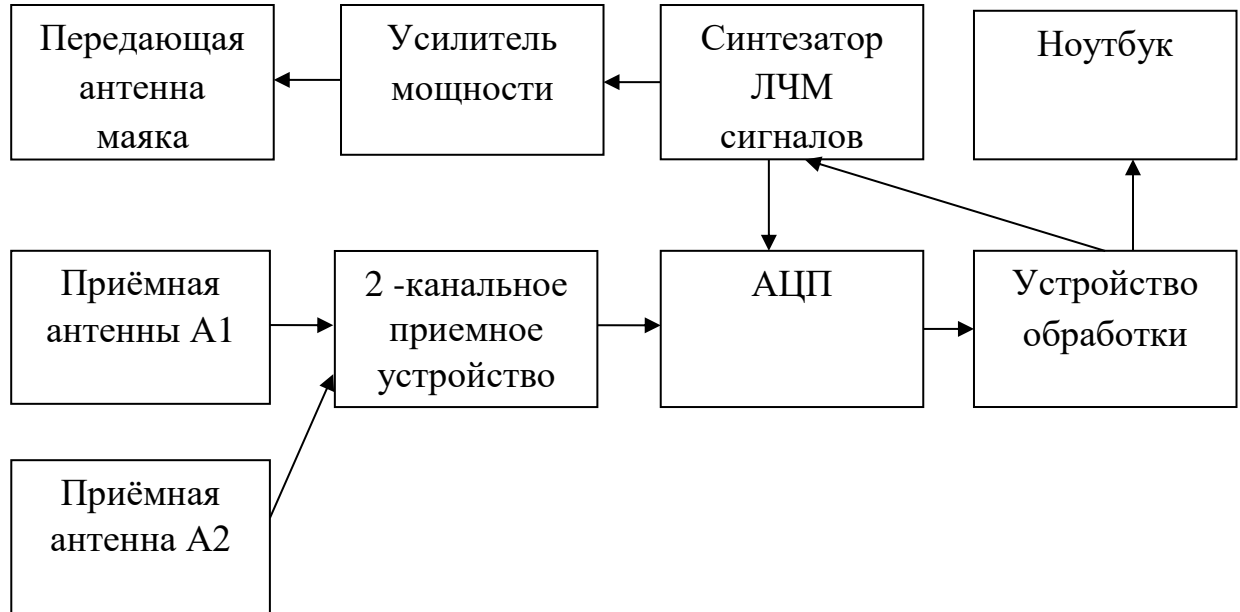


Рис. 3. Структурная схема аппаратуры комплекса.

На рис. 4, для примера, показан результат обработки - выведенное на экран монитора компьютера яркостное изображение акустических сигналов от маяка ПА и эхосигналов, отраженных от дна и поверхности воды и принятых антеннами комплекса А1 (слева) и А2 (справа). По горизонтальной оси отложена дальность, а по вертикальной оси номер импульса излучения маяка-ответчика.

Поскольку расстояние от маяка до приемников интерферометра меньше расстояний, проходимых эхосигналами, то первый слева сигнал соответствует дальности до маяка, далее справа выделяются сигналы маяка, отраженные от поверхности воды, и эхосигналы, рассеянные дном. Такие акустические изображения характерны при малых глубинах водоемов, буксировании ПА вблизи дна и малом заглублении антенн интерферометра. Однако мощность сигналов маяка существенно превышает мощность эхосигналов, что позволяет выделить их при обработке с большой точностью.



Рис. 4. Сигналы маяка-ответчика подводного аппарата и эхосигналы, принимаемые антеннами комплекса А1 (слева) и А2 (справа).

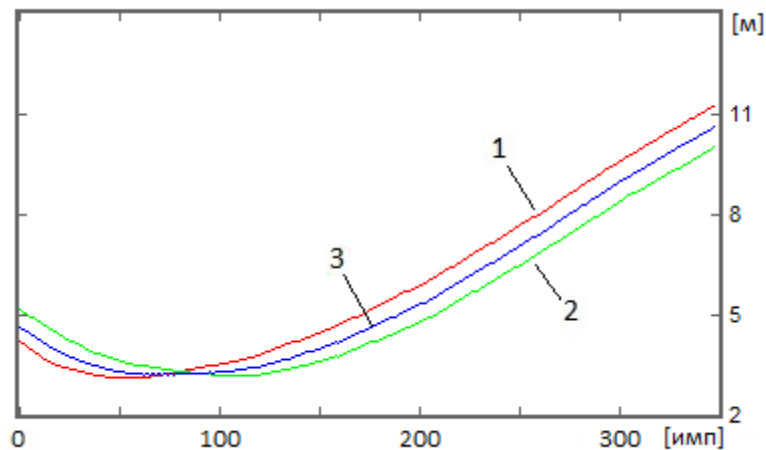


Рис. 5. Расстояния, измеренные при движении катера параллельно базе интерферометра: 1, 2 от маяка-ответчика до антенн A_1 и A_2 и 3- расстояние, вычисленное до точки О.

На рис. 5 приведены результаты вычислений по данным, приведенным на рис. 4, расстояний от маяка-ответчика до приемных антенн, а на рис. 6 – изменение углового положения маяка ответчика, буксируемого радиоуправляемым катером параллельно линии базы интерферометра.

На точность определения углового положения маяка-ответчика, как видно на рис. 6, в значительной степени влияет его ориентация по отношению к

приемным антеннам. Из графика следует, что наилучшая точность наблюдается в направлении, перпендикулярном базе интерферометра. В диапазоне $\pm 45^\circ$ относительно этого направления погрешность измерения углового положения объекта увеличивается незначительно. В направлениях вдоль базовой линии определение углового положения объекта становится практически невозможным. Очевидно, что точность измерения угла повышается с увеличением расстояния между антеннами A1 и A2. Для решения задач, где требуется точное пеленгование ПА при углах 0-360 градусов, необходимо применение большего числа антенн, разнесенных по плоскости по крайней мере на углы 90 градусов.

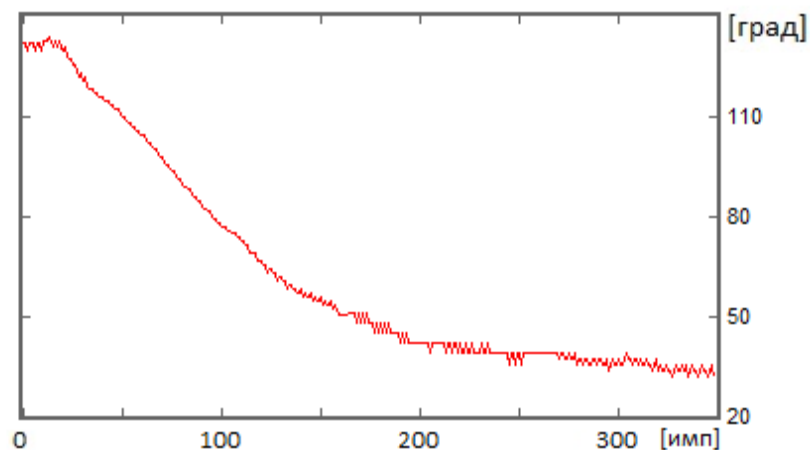


Рис. 6. Изменение углового положения маяка-ответчика при движении катера. База интерферометра $d=1.5$ метра.

Полученные результаты измерения дальности и углового положения маяка-ответчика относительно интерферометра позволяют с высокой точностью вычислять его пространственное положение относительно судна, а с учетом данных судовых спутниковых навигационных систем - и его географические координаты.

4. Заключение

Испытания предложенной системы локального позиционирования показали возможность ее применения для определения местоположения ПА с точностью, достаточной для обеспечения картографической съемки морского

дна гидролокационными комплексами площадной съемки, устанавливаемыми на подводные аппараты [5]. Система обладает существенными преимуществами по энергетическому потенциалу и помехозащищенности по сравнению с существующими системами позиционирования, использующими тонально импульсные зондирующие сигналы акустических маяков. С учетом того, что позиционирование ПА в основных практических случаях осуществляется по «точечному» источнику акустического излучения, эффективность системы может быть существенно повышена применением алгоритмов сверхразрешения спектрального оценивания.

Литература

1. 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.
2. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я.Д. Ширмана. Москва. Советское радио. 1970. 560 с.
3. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны Арктических морей // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf>.
4. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Дистанционно управляемый катер с гидролокатором бокового обзора для картографирования дна малых водоемов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 10. С.80-91.
5. «Стандарты МГО на гидрографические съемки». Специальная публикация № S-44, Международная гидрографическая организация, 5-е издание, Монако, 2008.

Для цитирования:

В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе. Локальное позиционирование подводных аппаратов гидроакустической системой с ЛЧМ зондирующими сигналами. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/14/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.11.14