

ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЛЬТРАКОРТОКБАЗОЙ ДЛЯ ПРИВЕДЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА К СТЫКОВОЧНОМУ МОДУЛЮ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-7-20-28

Филиппов Борис Иванович,
Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск, Россия,
filippov-boris@rambler.ru

Ключевые слова: совмещенная гидроакустическая навигационная система, стыковочный модуль, навигационные характеристики

Целью работы является разработка и исследование аппаратуры высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего действия по обеспечениюстыковки автономного подводного аппарата с носителем для гидроакустической навигационной системы (ГНС) с ультракороткой базой. Решение поставленной задачи предполагает создание высокоточной ГНС оценки местоположения подводного аппарата (ПА) с большой частотой траекторных отсчетов; создание гидроакустической системы связи между ПА и стыковочным модулем (СМ) с довольно интенсивным информационным обменом и малой вероятностью ошибок. Указанная задача может быть решена двумя способами: разработкой независимых систем навигации и передачи данных; разработкой совмещенной информационно-навигационной системы, в которой информационные сигналы являются одновременно навигационными. Достоинством первого способа является возможность выбора типа сигналов, наиболее подходящих для функционирования каждой из систем. Главный недостаток - увеличение объема оборудования и необходимость введения системы синхронизации. Второй способ свободен от смещения оценки углов прихода за счет наличия отражающих границ, но требует больших вычислительных затрат. Вопрос применимости этого метода может быть решен после детальной проработки аппаратно-программных затрат с учетом получения оценок навигационных характеристик в реальном времени. Этот способ наиболее предпочтителен в автономной ГНС. Если предполагается, что оценка местоположения ПА будет производиться в случаях, когда он будет находиться вблизи больших поверхностей с высоким когерентным коэффициентом отражения (например, затонувший корабль), то альтернативы этому способу определения навигационных характеристик может и не быть. В обоих способах влиянием переотражений от конструкций ПА и СМ на оценки навигационных характеристик в системе приведения можно пренебречь. Представленные в разделе количественные оценки навигационных характеристик в системе приведения являются приближенными. Для более точных оценок нужно иметь достаточно надежную статистику поверхностного и донного рассеяний в диапазоне частот 100-200 кГц.

Информация об авторе:

Филиппов Борис Иванович, Новосибирский государственный технический университет, к.т.н., доцент, доцент кафедры Защиты информации, г. Новосибирск, Россия

Для цитирования:

Филиппов Б.И. Построение гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой для приведения подводного аппарата к стыковочному модулю // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №7. С. 20-28.

For citation:

Filippov B.I. (2020) Building of hydroacoustic navigation system with ultrashort base for conversion of the underwater apparatus to the docking module. T-Comm, vol. 14, no.7, pp. 20-28. (in Russian)

Введение

Предварительно отметим, что недостатком гидроакустической навигационной системы (ГНС) с ультракороткой базой, в отличие от ГНС с короткой базой [1,2], является невозможность оценки наклонного расстояния до подводного аппарата (ПА) на основе анализа распределения фаз навигационного сигнала по элементам антенны системы приведения. Речь может идти только об оценке пеленга и угла места ПА, а расстояние до ПА должно находиться путем оценки времени распространения навигационного сигнала, полученной другими средствами, например, гидроакустической системой обмена данными между ПА и стыковочным модулем (СМ) [3-5]. В работах [6-8] предлагается для определения координат движущегося подводного объекта использовать видеинформацию полученную от сонаров. В частности, в [6] с целью уменьшения погрешности отслеживания подводного объекта предлагается совместное использование сонара, акустической антенны с ультракороткой базой и отслеживающий фильтр. Следует заметить, что при ограниченной прозрачности водной среды использование видеинформации с сонаров на расстояниях более 50 метров представляется проблематичным.

Принципы оценки пеленга в ГНС с ультракороткой базой достаточно подробно описаны [9,10]. Рассмотрим вопросы определения навигационных характеристик применительно к задаче приведения ПА к СМ.

Решение поставленной задачи предполагает:

- создание высокоточной ГНС оценки местоположения ПА с большой частотой траекторных отсчетов (малым временем обновления навигационных характеристик);
- создание гидроакустической системы связи между ПА и СМ с довольно интенсивным информационным обменом и малой вероятностью ошибок.

Указанная задача может быть решена двумя способами:

- разработкой независимых систем навигации и передачи данных;
- разработкой совмещенной информационно-навигационной системы, в которой информационные сигналы являются одновременно навигационными.

Решение задачи первым способом достаточно очевидно. Достоинство этого способа заключается в возможности выбора типа сигналов, наиболее подходящих для функционирования каждой из систем. Главный недостаток – увеличение объема оборудования и необходимость введения системы синхронизации, позволяющей осуществить обмен данными между ПА и СМ с использованием принципа временного разделения сигналов.

Второй способ предпочтительнее как по объему оборудования, так и по тактическому применению. Уменьшение объема оборудования очевидно. Выигрыш в тактическом применении заключается в том, что частота передачи информационных сообщений не связана с передачей отдельных сигналов ГНС и поэтому может быть сделана максимально возможной. При этом может быть максимально сокращен интервал траекторных отсчетов, что требуется для повышения точности оценки местоположения ПА.

В дальнейшем рассматривается возможность построения совмещенной информационно-навигационной системы приведения.

Для оценки погрешности угловых координат в ГНС с ультракороткой базой сделаем следующие допущения:

- источник навигационного сигнала является точечным;
- навигационный сигнал является узкополосным ($\frac{\Delta F}{f_0} \ll 1$), где ΔF есть полоса частот навигационного сигнала;
- фазо-частотные характеристики элементов антенны ГНС идентичны для заданной области направлений на источник навигационного сигнала (или, по крайней мере, точно известны);
- разность фаз навигационного сигнала на выходе элементов антенны ГНС зависит только от направления на источник и не зависит от расстояния до источника сигнала;
- помеха представляет собой аддитивный шум с гауссовским распределением;
- флюктуации фаз навигационного сигнала за счет распространения являются незначительными по апертуре антенны (вследствие ее малости) и их влиянием при определении разности фаз сигнала по элементам антенны можно пре-небречь.

Для получения конкретных результатов зададим следующие характеристики ГНС:

- максимальная относительная радиальная скорость ПА относительно СМ не более 3 м/с;
- ширина диаграммы направленности (ДН) элементов антенны ГНС составляет 50° ;
- максимальная дистанция, с которой начинается приведение, – 300 м;
- минимальная дистанция приведения – 1 м;
- диапазон рабочих частот системы приведения от 100 до 200 кГц;
- погрешность определения угловых координат ПА – $\pm 1^\circ$.

Принципы определения навигационных характеристик в ГНС с ультракороткой базой

Антенные модули ГНС с ультракороткой базой могут иметь разную конфигурацию. Антenna минимальной конфигурации содержит две пары элементов, расположенных перпендикулярно друг другу (одна пара в азимутальной плоскости, вторая пара – в угломестной). Эти две пары могут быть образованы тремя элементами (один элемент антенны является общим).

В ГНС с ультракороткой базой для оценки навигационных характеристик обычно используется фазовое распределение сигнала по элементам антенны [9, 10]. Принцип определения пеленга иллюстрируется рис. 1.

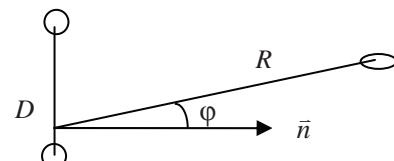


Рис. 1. К оценке пеленга в ГНС с ультракороткой базой

Для ГНС с ультракороткой базой выполняется неравенство $D \ll R$. Поэтому можно считать, что разность фаз $\Delta\phi$ навигационного сигнала на выходе элементов антенны будет определяться выражением:

$$\Delta\psi = 2 \cdot \pi \cdot \text{Sin}(\phi) \cdot \frac{D}{\lambda} = 2 \cdot \pi \cdot \text{Sin}(\phi) \cdot \frac{D \cdot f_0}{c},$$

где c – скорость звука в воде.

Пеленг ϕ на источник сигнала будет равен

$$\phi = \arcsin\left(\frac{\Delta\psi \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot D}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta\psi \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot f_0}\right) \quad (1)$$

Пеленг ϕ определяется однозначно для любого направления на источник сигнала (в пределах полуплоскости), если $D < \frac{\lambda}{2}$. При ограниченной ширине ДН элементов антенны ГНС α однозначность сохраняется при условии $D \cdot \text{Sin}(\frac{\alpha}{2}) < \frac{\lambda}{2}$.

Интерес представляет фазовая чувствительность антенны $K_{\Delta\psi}(\phi)$, равная производной $\Delta\psi$ по углу ϕ :

$$\frac{d(\Delta\psi)}{d\phi} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{\lambda} \cdot \text{Cos}(\phi). \quad (2)$$

При оценке угла ϕ по относительной задержке навигационного сигнала на выходах элементов антенны ГНС τ используются соотношения:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{D \cdot \text{Sin}(\phi)}{c}, \\ \phi &= \text{Arcsin}\left(\frac{c \cdot \tau}{D}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Реально пеленг рассчитывается в соответствии с соотношением (2) на основании оценки разности фаз навигационного сигнала $\Delta\psi$. При этом предполагается, что частота навигационного сигнала f_0 точно известна. Если истинное значение частоты отличается на величину δf , то рассчитанное значение пеленга будет смещено на величину $\delta\phi_d$:

$$\delta\phi_d = \frac{d\phi}{df} \cdot \delta f = -\text{tg}(\phi) \cdot \frac{\delta f}{f_0}. \quad (4)$$

С учетом того, что $\delta f / f = v / c$, где v есть радиальная относительная скорость ПА, величина смещения будет равна

$$\delta\phi_d = -\text{tg}(\phi) \cdot \frac{v}{c}.$$

Дополнительная погрешность оценки пеленга может быть связана с неточным определением скорости звука. Однако погрешность в оценке скорости звука обычно гораздо меньше, чем доплеровское смещение, поэтому в дальнейших расчетах эта составляющая погрешности в расчет не принимается. Оценка угла места θ проводится аналогично, но по вертикальной базе антенны ГНС.

Алгоритм оценки $\Delta\psi$ зависит от априорного знания характеристик навигационного сигнала. Для гармонического сигнала с точно известной частотой ω_0 имеет место оценка неизвестной фазы сигнала. В этом случае можно использовать алгоритм оценки фазы максимального правдоподобия [11], который применительно к ГНС с ультракороткой базой описан в [10]:

$$\psi_i = \arctg \frac{\int\limits_0^T x_i(t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) dt}{\int\limits_0^T x_i(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) dt}, \quad (5)$$

где $x_i(t)$ есть процесс на выходе i -го элемента антенны, ψ_i – оценка фазы сигнала на выходе i -го элемента антенны (относительно опорного сигнала).

Разность фаз $\Delta\psi_{ij}$ принятого i -м и j -м элементами антенны сигнала находится как разность оценок, определяемых зависимостью (5).

При использовании в качестве сигнала ГНС информационного сигнала такой подход неприемлем, так как структура сигнала априорно неизвестна. Кроме того, за счет эффекта Доплера центральная частота принимаемого сигнала может отличаться от частоты опорного сигнала. В этом случае за опорный может быть принят сигнал с выхода одного из элементов антенны. Ввиду малого размера антенны ГНС относительное смещение частоты принимаемых элементами антенны сигналов будет пренебрежимо мало.

Если информационный сигнал достаточно узкополосный, то его можно представить в виде

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t),$$

где огибающая $A(t)$ медленно меняется по сравнению с $\cos(\omega_0 t)$.

Оценка максимального правдоподобия разности фаз принимаемых элементами антенны сигналов может быть сделана на основе соотношения:

$$\Delta\psi_{oi} = \arctg \frac{\text{Im } B_{0i}(\tau)}{\text{Re } B_{0i}(\tau)}, \quad (6)$$

где $\Delta\psi_{oi}$ – разность фаз сигнала, принятого опорным (нулевым) и i -м элементом антенны; $B_{0i}(\tau)$ – комплексная функция взаимной корреляции (ФВК) сигнала на выходах элементов антенны.

Формирование оценки $B_{0i}(\tau)$ производится в соответствии с выражением:

$$B_{0i}(\tau) = \frac{1}{T} \int\limits_0^T [x_0(t) + x_{oc}(t)] \cdot [x_i(t-\tau) - x_{ic}(t-\tau)] \cdot dt, \quad (7)$$

где $x_0(t)$ и $x_i(t)$ есть реализации сигнала, принимаемого опорным и i -м элементами антенны; x_{0c} и x_{ic} – сопряженные по Гильберту сигналы; τ – относительная задержка сигналов на выходе элементов антенны.

Заметим, что оценка фазы предполагает оценку времени задержки τ . Если было бы возможно достаточно точно оценить τ , то не было бы необходимости в оценке фазы сигнала, так как угол Φ был бы однозначно определен из соотношения (3).

Как известно [11], точность оценки времени прихода (относительной задержки) сигнала определяется его функцией неопределенности. При узкой полосе частот функция неопределенности сигнала по времени задержки τ намного шире, чем само время относительной задержки, что не позволяет проводить прямую оценку малых τ . Однако, для этого случая оценка τ необязательна.

Действительно, для узкополосного сигнала функцию корреляции можно представить в виде [12]:

$$B(\tau) = \sqrt{B_c^2(\tau) + B_s^2(\tau)} \cdot \cos[\omega_0 \cdot \tau + \mu(\tau)], \quad (8)$$

где B_c и B_s есть сопряженные составляющие огибающей, а $\mu(\tau)$ определяется выражением:

$$\mu(\tau) = \operatorname{arctg} \frac{B_s(\tau)}{B_c(\tau)}.$$

Если спектр сигнала симметричный, то $B_s(\tau) = 0$, и

$$B(\tau) = B_c(\tau) \cdot \cos(\omega_0 \tau).$$

При симметричном спектре фаза сигнала в пределах $0 \div \pi$ однозначно определяется фазой центральной частоты и изменением огибающей можно пренебречь. Если спектр сигнала будет несимметричным, то в оценке фазы появится дополнительная погрешность, обусловленная составляющей $\mu(\tau)$, тем большая, чем больше τ . Для учета влияния этой составляющей на погрешность оценки фазы требуются дополнительные исследования с привлечением реальных характеристик приемо-передающих трактов ГНС.

В любом случае желательно использовать корректирующие цепи (или процедуры), симметрирующие спектр навигационного сигнала.

Предложения по выбору антенны ГНС

С точки зрения практической реализуемости рассматривается геометрия разреженной антенны ГНС, в которой возможно исключение неопределенности в оценке угловых координат источника сигнала. Предлагаемая геометрия антенны базируется на априорных сведениях о положении автономного модуля, получаемых по гидроакустическом каналу связи (ГАКС). Предлагаемая конфигурация антенны приведена на рис. 2.

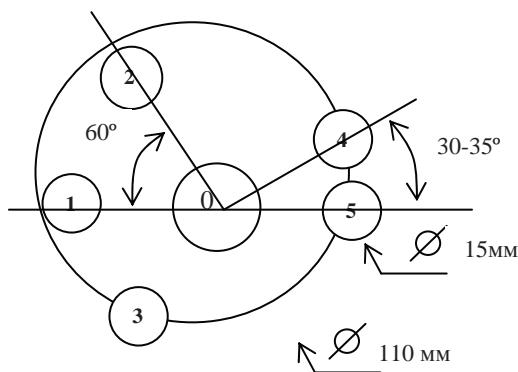


Рис. 2. Предлагаемая конфигурация антенны

Предложенная геометрия антенны ГНС базируется на следующих факторах:

- оценка угла места не зависит от пеленга в паре вертикально разнесенных элементов;

- угол места в процессе приведения может быть минимизирован с привлечением обмена по ГАКС данными о глубине места стыковочного модуля и автономного модуля по показаниям штатных приборов;

– наибольшее значение имеет оценка пеленга на источник сигнала.

С учетом этих факторов антenna имеет большее развитие в горизонтальном направлении, а расположение элементов 4 и 5 таково, что разность фаз сигналов этих элементов в заданном угле обзора менее π , что однозначно определяет пеленг на источник сигнала.

Внешний размер антенны соответствует размеру для сохранения установочных параметров. Уменьшение диаметра элементов антенны ГНС связано с необходимостью обеспечения углового положения ($30\text{--}35^\circ$) элемента 4.

Несимметричная конфигурация антенны позволяет исключить неоднозначность оценки пеленга источника сигнала в заданной зоне обзора. Уменьшение чувствительности элементов антенны не принципиально ввиду достаточного запаса мощности излучения [13].

Принципиальным является технологический разброс пространственных фазовых характеристик элементов антенны. Поскольку пространственные фазовые характеристики не могут быть скомпенсированы электрическими цепями, то предлагается электрическую компенсацию проводить только для пространственных углов пеленга ϕ и места θ , равных 0. Для остальных углов может быть на основании калибровочных испытаний составлена таблица поправок, записываемых в ЗУ устройства обработки сигналов. Однако калибровочные испытания являются весьма трудоемкими, поэтому можно обойти погрешности оценки углового положения тактикой привода, при которой эти погрешности не будут принципиальными.

Предложения по тактике приведения ПА

Фазовое распределение сигнала по элементам антенны, распределенным по плоскости, зависит как от пеленга ϕ , так и угла места θ . В общем случае решение относительно ϕ и θ с учетом погрешности оценок фазового распределения весьма сложно. Однако с учетом наличия связи между подводным аппаратом и стыковочным модулем можно минимизировать угол места θ , вследствие чего остается решение только относительно пеленга, что существенно проще.

Минимизация угла места достигается предварительным выводом ПА на горизонт источника сигнала. При этом тактика привода заключается в следующем.

При приходе подводного аппарата по его навигационным средствам в предполагаемую зону устойчивой связи со стыковочным модулем начинает работу базовый комплект стыковочного модуля подводного аппарата (БК-ПА).

По факту установления связи между стыковочным модулем и подводным аппаратом они обмениваются данными о глубинах своего погружения. При обмене данными также измеряется наклонное расстояние R между ними. По разности глубин и наклонному расстоянию оценивается ожидаемый угол места ϑg (расчетный геометрический угол места). На основании оценки ϑg рассчитывается ожидаемая разность фаз в элементах антенны 2 и 3, которая сравнивается с полученной ГНС. При этом устраняется неоднозначность в оценке угла места, рассчитываемого в аппаратуре ГНС. На предельных дистанциях и малых глубинах имеет смысл оценивать угол места только по показаниям глубиномеров вви-

ду возможного смещения оценок угла места за счет отражения от поверхности или дна.

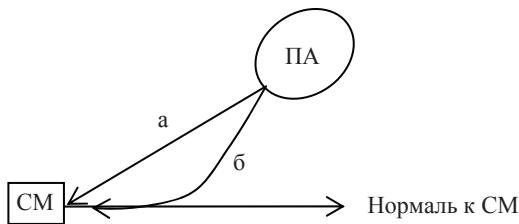
С учетом оценки угла места по измеренной разности фаз сигнала в элементах 4 и 5 оценивается пеленг ϕ . Аналогично на основании оценки разности фаз в элементах 1 и 5 с учетом оценки разности фаз в элементах 3 и 4 (для исключения неоднозначности при больших разностях фаз) уточняется пеленг на источник сигнала.

После получения оценок по ГАКС передается пеленг на ПА относительно стыковочного модуля (отсчитываемый от нормали к плоскости антенны СМ) для определения направления вектора нормали к стыковочному модулю (если необходимо обеспечить стыковку по нормали к стыковочному модулю).

По полученным по ГАКС данным о глубине стыковочного модуля и пеленге на ПА нужно вывести подводный аппарат на глубину стыковочного модуля и установить требуемый курс ПА. Здесь возможны два варианта действий в зависимости от требований к траектории привода. Если угол подхода ПА к СМ некритичен, то траектория привода может быть простой («а» на рис. 3).

При простой траектории курс ПА устанавливается по пеленгу на источник сигнала с выходом на горизонт источника. После выхода ПА на горизонт источника сигнала уточняется оценка пеленга и корректируется курс ПА. Далее управление курсом ПА выполняется для удержания совпадения курса с пеленгом на источник. Со стороны СМ при этом должен фиксироваться постоянный пеленг на ПА.

Если требуется привод ПА по нормали к СМ, то траектория привода становится сложной («б» на рис. 3). Для реализации такой траектории должно быть выполнено несколько дополнительных операций.



а) – траектория простого привода; б) – траектория привода по нормали к стыковочному модулю

Рис. 3. К тактике привода ПА к СМ

По полученным по ГАКС данным о глубине стыковочного модуля, пеленге на ПА и расстоянии R необходимо рассчитать курс ПА для выхода ПА на глубину СМ и нормаль к плоскости его антенны. При изменениях курса ПА необходимо проверять, чтобы антенны СМ и ПА находились в диаграмме направленности друг друга.

После выхода ПА на горизонт СМ уточняются пеленги и корректируется курс ПА. После выхода ПА на нормаль к СМ управление должно обеспечивать удержание курса ПА, совпадающего с пеленгом на источник сигнала (СМ). На стыковочном модуле при этом должен фиксироваться нулевой пеленг на ПА.

Принципиально может быть рассчитано кратчайшее расстояние для выхода на направление нормали с последующим поворотом на СМ. Однако при этом может быть потеря

связи, что грозит потерей контакта с ПА при ошибках в оценках пеленга.

При достижении заданного расстояния R параметры траектории корректируются для подхода подводного аппарата к точкестыковки под заданным углом относительно плоскостистыковки и относительно излучателя стыковочного модуля (если точкастыковки не совпадает с центром излучателя). Расстояние может быть задано исходя из конструкции стыковочного модуля и возможностей управления траекторией ПА.

Повышение точности оценки фазы сигнала

Повышение точности в оценке пеленга сигнала может быть достигнуто следующими способами:

- увеличением мощности сигнала;
- увеличением числа элементов антенны (за счет усреднения по множеству);
- увеличением времени накопления (длительности сигнала);
- увеличением фазовой чувствительности (увеличением размера D антенны).

Как указывалось в [4], наиболее перспективным является повышение фазовой чувствительности антенны. Однако при большом волновом размере D оценка фазы является неопределенной с точностью до $n \cdot 2\pi$.

Для устранения этой неопределенности антенна ГНС в каждой плоскости должна содержать несколько элементов (от трех и более), как, например, показано на рис. 4. При этом расстояние D_0 между наиболее близко расположеными элементами антенны должно быть не более $\lambda/(2 \cdot \sin\phi_m)$, где ϕ_m – максимальное значение пеленга ϕ , равное половине ширины ДН элементов антенны.

Структурная схема аппаратно-программного устройства оценки пеленга ϕ (или угла места θ) по алгоритму (6) при указанной конфигурации антенны показана на рис. 5.

На первом этапе обработки производится оценка разности фаз сигнала $\Delta\psi_{01}$ по базе D_0 (рис. 4) антенны, в соответствии с выражением (9), при $\tau = 0$. Полученная оценка $\Delta\psi_{01}$ пересчитывается в задержку τ_0 , которая должна быть введена в оценку разности фаз $\Delta\psi_{02}$ сигнала по большей базе антенны D , в соответствии с выражением (6), при $\tau = \tau_0$.

Введение задержки τ_0 позволяет устраниить неопределенность в оценке фазы при больших размерах D антенны, а также уменьшить влияние возможного перекоса спектра сигнала на оценку фазы, поскольку оценка B_{02} производится вблизи максимума функции корреляции. Вблизи максимума B_{02} составляющая $\mu(\tau)$ в соотношении (8) близка к 0. При выборе размера D необходимо иметь в виду, что оценка величины относительной задержки τ_0 должна быть проведена с точностью, исключающей аномальные ошибки.

Следовательно, погрешность в оценке τ_0 должна обеспечить невыход оценки $\Delta\psi_{02}$ за интервал π . На основании оценки $\Delta\psi_{02}$ производится расчет относительной задержки $\tau_{02} = \tau_0 + \Delta\psi_{02}/\omega_0$. По полученному значению τ_{02} рассчитывается пеленг ϕ в соответствии с зависимостью (3).

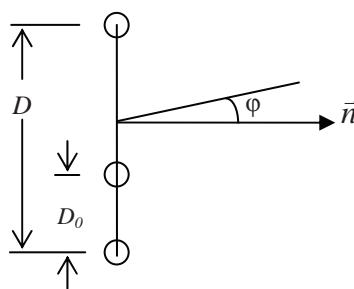
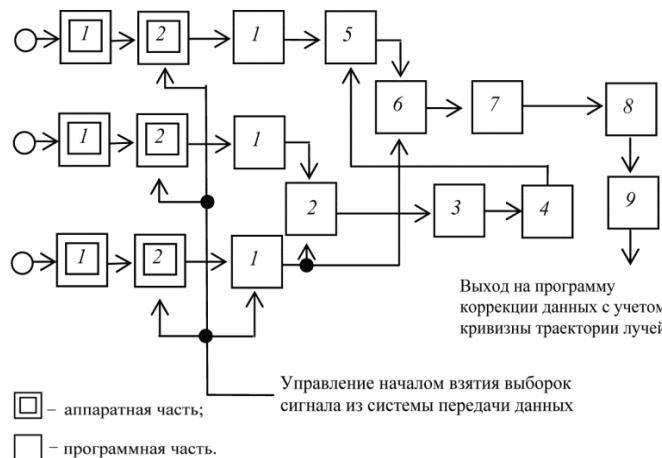


Рис. 4. К оценке пеленга в ГНС с трехэлементной антенной при $D > \lambda$

Заметим, что такой подход может быть реализован и для антенны с большим числом элементов и нарастающим расстоянием между элементами. При этом нужно обеспечить оценку угла прихода сигнала по каждой более короткой базе с точностью, обеспечивающей однозначный результат оценки по большей базе.

Оценка пеленга ϕ дополнителью может быть проведена по относительной задержке τ_{12} сигнала на выходе элементов антенны \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 (рис. 2). Для формирования оценки τ_{12} на выходе элемента \mathcal{E}_1 антенны должна быть включена задержка $\tau = \tau_{01} \cdot (D - D_0) / D_0$ и далее проводятся процедуры, описанные на рис. 5. Такой подход может быть использован при произвольном числе элементов антенны. Путем усреднения полученных оценок ϕ по множеству можно получить оценку пеленга с большей точностью (меньшей дисперсией оценки). Заметим, что такое усреднение должно производиться с весом, пропорциональным базе элементов антенны, поэтому такое усреднение не приведет к существенному выигрышу, особенно при наличии поверхностных и донных рассеяний сигнала.



- Аппаратная часть: 1 – усилитель-фильтр; 2 – АЦП.
Программная часть: 1 – преобразование Гильберта;
2 – оценка $B_{01}(\tau = 0)$; 3 – расчет $\Delta\psi_{01}$; 4 – расчет $\tau_{01} = \Delta\psi_{01}/\omega_0$;
5 – ввод задержки $\tau_0 = \tau_{01} \cdot D/D_0$; 6 – оценка $B_{02}(\tau = \tau_0)$;
7 – расчет $\Delta\psi_{02}|_{\tau=\tau_0}$; 8 – расчет $\tau_{02} = \tau_0 + \Delta\psi_{02}/\omega_0$;
9 – расчет пеленга по τ_{02} из (3).

Рис. 5. Устройство оценки пеленга в ГНС с трехэлементной антенной

Оценка пеленга θ в угломестной плоскости проводится аналогично. Однако нужно иметь в виду, что оценка угла места оказывается кажущейся оценкой, ввиду кривизны траектории распространения сигнала. На малых дистанциях (участки ближней и средней зон приведения) и при малых градиентах скорости звука в акватории кривизной траектории луча можно пренебречь.

На максимальной дистанции приведения разница между истинным и кажущимся углами места в $0,5^\circ$ (половина заданной погрешности оценки угловых координат) будет наблюдаться при градиенте скорости звука около 6 м/с . Максимальные градиенты скорости звука, порядка 15 м/с , могут наблюдаться летом на небольших глубинах во многих акваториях [10]. Если ГНС должна обеспечивать заданную погрешность оценки угловых координат в этих условиях, то кажущийся угол места должен быть пересчитан в истинный на основе характера лучевой картины для измеренного распределения скорости звука по профилю акватории.

Возможен и другой способ оценки фазы сигнала. Ввиду малости размеров антенны по сравнению с расстоянием до источника можно считать, что фронт волны сигнала является плоским.

Расположим координатную систему так, что элементы антенны были расположены в плоскости ZY, а ось X направлена параллельно оси диаграммы направленности элементов антенной решетки в сторону поля обзора из центра антенны. При таком выборе системы координат положение элементов антенной решетки определяется парами координат y_i, z_i .

Направление на источник определяется двумя угловыми координатами – углом места θ (угол между плоскостью XY и направлением на источник) и пеленгом ϕ (угол между проекцией направления на источник на плоскость XY и осью X). Определение угловых координат производится по оценке фазового распределения сигнала по элементам антенны, которое в случае плоской волны определяется разностью хода волны между ними. Разность хода волны между i -м и j -м элементами антенны может быть определена из соотношения

$$\Delta l_{ij} = (z_i - z_j) \cdot \sin\theta + (y_i - y_j) \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta. \quad (9)$$

Разности хода волны Δl_{ij} создают набег фаз ψ_{ij} :

$$\psi_{ij} = \frac{\Delta l_{ij}}{\lambda} \cdot 2 \cdot \pi. \quad (10)$$

Фазо-чувствительным элементом устройства обработки является квадратурный коррелятор, дающий однозначную оценку разностей фаз в паре элементов в пределах $\pm\pi$. Поскольку во всех заданных углах обзора при размерах антенны порядка 10λ величины Δl_{ij} могут быть существенно больше λ , то ψ_{ij} можно представить в виде

$$\psi_{ij} = \delta\psi_{ij} + k_{ij} \cdot 2 \cdot \pi, \quad (11)$$

где $\delta\psi_{ij}$ есть величина фазы, которая может быть оценена фазо-чувствительным элементом, а величина и знак k_{ij} могут быть определены на основании анализа оценок фаз по всем парам элементов в антенне.

Если решетка имеет N элементов, то общее число разностей хода волн между отдельными парами решетки определяется числом сочетаний C_N^2 .

С теоретической точки зрения на геометрию антенны ГНС накладывается только одно ограничение – оценки относительного фазового распределения сигналов по элементам антенны (с учетом фазовых набегов более 2π) должны обеспечивать однозначное решение относительно угловых координат источника сигнала. При этом координаты антенны должны выбираться с учетом того, чтобы выражения (9) для разных пар не были линейной комбинацией друг друга.

Практическая реализация антенн ГНС с желательной геометрией наталкивается на технологические трудности, связанные с конечным размером элемента антенны и ограниченной площадью антенны. Кроме того, в автономных аппаратах существуют ограничения на объем оборудования и потребляемую мощность, что требует минимизации числа элементов антенны. Полный расчет в соответствии с (9) по многим элементам антенны требует больших аппаратных и энергетических затрат. Поэтому имеет смысл рассмотреть упрощенные варианты с учетом специфики задачи.

Требуемая точность оценки разности фаз при ожидаемых отношениях сигнал/шум и заданной длительности информационного сигнала может быть получена в одной паре антенн при разносе ее элементов на расстояния 6-8 λ . Следовательно, для оценки угловых координат (пеленга ϕ и угла места θ) в полупространстве достаточно иметь две ортогональные пары элементов антенны, расположенных по вертикали и горизонтали. Разнос элементов антенны должен быть более 8 λ . Основной проблемой при этом является неоднозначность оценок фаз при большой базе элементов антенны. Однако неоднозначность оценок может быть устранена следующим образом.

В вертикальной паре антенн набег фазы зависит только от угла места (9). Поэтому для оценки угла места достаточно только устранить неоднозначность оценки разности фаз. Но эта однозначность легко устраняется, поскольку система имеет канал связи между излучателем и приемником, а также устройство измерения дистанции. Как стыковочный, так и автономный модули имеют устройства определения глубины. Значения глубин могут быть переданы по каналу связи одновременно с оценкой расстояния между СМ и АП. По разности глубин и известной дистанции может быть оценен угол места. На основании этого расчета устраняется неоднозначность в оценке угла места (с учетом кривизны луча) в вертикальной паре антенн. Следовательно, угол места может быть определен однозначно по измерениям в вертикальной паре антенн.

Оценка пеленга является более сложной задачей. Набег фазы в горизонтальной паре антенн зависит как от пеленга, так и от глубины места. Так как угол места определяется однозначно, то остается только устраниТЬ неоднозначность оценки фазы в горизонтальной паре антенн.

Неоднозначность оценки может быть устранена путем оценки фаз на разных частотах.

Как известно, набег фаз связан с величиной задержки сигнала очевидным соотношением

$$t_3 = \frac{\Delta\psi}{\Delta\omega}.$$

Следовательно, если измерить набег фазы ψ_1 на частоте ω_1 и набег фазы ψ_2 на частоте ω_2 , то можно оценить задержку пробега волны между элементами антенны: $t_{3ij} = \Delta\psi(\omega_1, \omega_2) / (\omega_1 - \omega_2)$, где $\Delta\psi(\omega_1, \omega_2)$ есть разность значений фаз на частотах ω_1 и ω_2 .

Так как $\Delta l_{ij} = t_{3ij} \cdot c$, где c есть скорость звука, то из (10) и (11) получим:

$$k_{ij} = \text{trunc}\left(\frac{t_{3ij} \cdot c}{\lambda}\right),$$

где $\text{trunc}(x)$ – операция взятия целой части от x .

При выборе частот ω_1 и ω_2 необходимо потребовать выполнения условия $\omega_1 - \omega_2 < \pi / t_{3\max}$, где $t_{3\max}$ есть максимально возможная задержка пробега волны между элементами антенны.

При оценке разности фаз $\psi_{1ij} - \psi_{2ij}$ возникает неопределенность в точках смены знака оценки фаз ψ_{ij} (в точках, близких к $\pm\pi$). На рисунке 6 показаны ожидаемые значения оценок разности фаз сигналов между элементами антенны на частотах $f_1 = 128\text{Гц}$ и $f_2 = 136\text{Гц}$ при базе элементов антенны 90 мм.

В области значений ϕ , где $\psi(\omega_1)$ и $\psi(\omega_2)$ имеют разные знаки, оценка $\Delta\psi(\omega_1, \omega_2)$ по простой разности значений фаз невозможна. Однако при условии, что $\omega_2 > \omega_1$, можно использовать следующий алгоритм оценки разности фаз.

Введем дополнительную переменную b :

$$\begin{cases} b = \text{signum}[\psi(\omega_1)] \cdot \text{signum}[\psi(\omega_2)], \text{ если } |\psi(\omega_1)| > 90 \\ b = 1, \text{ если } |\psi(\omega_1)| < 90 \end{cases}$$

Тогда

$$\Delta\psi(\omega_1, \omega_2) = \psi(\omega_2) - \psi(\omega_1), \text{ если } b > 0$$

$$\Delta\psi(\omega_1, \omega_2) = \psi(\omega_2) - \text{signum}[\psi(\omega_1)] \cdot 360 - \psi(\omega_1), \text{ если } b < 0.$$

Значения $\Delta\psi(\omega_1, \omega_2)$ на рис. 6 рассчитывались в соответствии с приведенным алгоритмом $\Delta\psi(\omega_1)$.

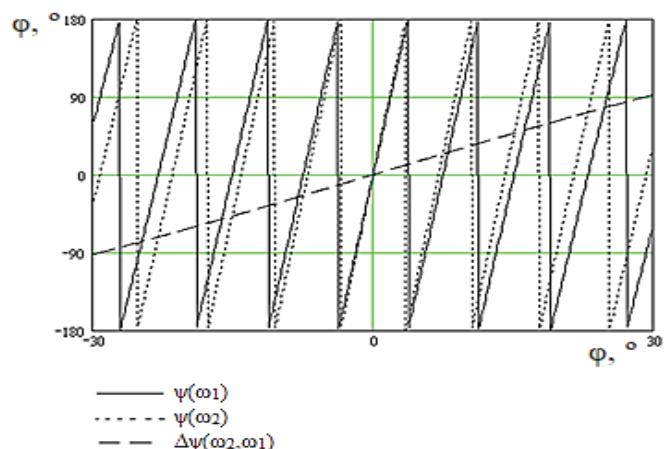


Рис. 6. Ожидаемое значение измеряемых фаз сигналов на двух частотах

Для уменьшения погрешности оценки пеленга можно потребовать малости угла места, что достигается выводом источника сигнала на горизонт приемника. При этом погрешность оценки θ мало сказывается на оценке ϕ .

Режим измерения на двух частотах достигается передачей, после информационного сигнала с центральной частотой ω_1 , дополнительного гармонического сигнала с частотой ω_2 . По оценке набегов фаз сигналов на этих частотах, в вертикальной и горизонтальной парах элементов антенны, рассчитываются угол места и пеленг на источник сигнала.

Конкретный выбор оценки фазы сигнала может быть сделан при натурных испытаниях.

Идея этой статьи принадлежит профессору СибГУТИ (г. Новосибирск) Г.А. Чернецкому. Мы обсуждали с ним эту работу ещё в 2004 г., но, к сожалению, в 2009 г. его не стало и эта работа – память о нем.

Заключение

По результатам предварительных оценок, можно сделать следующие общесистемные выводы.

1. В качестве навигационного сигнала в ГНС с ультракороткой базой могут быть использованы сигналы передачи данных, что позволяет создать совмещенную информационно-навигационную систему приведения.

2. Ожидается, что уровень навигационного сигнала в зоне приведения будет значительно превышать уровень шума среды. Поэтому в качестве помех будут выступать поверхностные и донные отражения. Для минимизации этих помех желательно глубину погружения СМ и ПА выбирать гораздо большей, чем минимальное расстояние приведения.

3. В ГНС с ультракороткой базой возможно использование двух способов получения оценок пеленга и угла места. В первом способе оценка навигационных характеристик производится на основе анализа ФВК навигационного сигнала на выходе элементов антенны ГНС при неизвестной форме навигационного сигнала. Во втором способе используются оценки, основанные на применении априорно известного навигационного сигнала по его функцией неопределенности.

4. Достоинством первого способа является простота получения оценок пеленга и кажущегося угла места. Недостатком способа является смещение оценок угла места при наличии отражающих границ. Однако путем выбора стратегии приведения влияние этого смещения может быть минимизировано.

5. Второй способ свободен от смещения оценки углов прихода за счет наличия отражающих границ, но требует больших вычислительных затрат. Вопрос применимости этого метода может быть решен после детальной проработки аппаратно-программных затрат с учетом получения оценок навигационных характеристик в реальном времени. Этот способ наиболее предпочтителен в автономной ГНС. Если предполагается, что оценка местоположения ПА будет про-

изводиться в случаях, когда он будет находиться вблизи больших поверхностей с высоким когерентным коэффициентом отражения (например, затонувший корабль), то альтернативы этому способу определения навигационных характеристик может и не быть. В обоих способах влиянием переотражений от конструкций ПА и СМ на оценки навигационных характеристик в системе приведения можно пре-небречь.

6. Представленные в разделе количественные оценки навигационных характеристик в системе приведения являются приближенными. Для более точных оценок нужно иметь достаточно надежную статистику поверхностного и донного рассеяний в диапазоне частот 100-200 кГц.

Литература

1. Филиппов Б.И. Архитектура гидроакустической навигационной системы с короткой базой для приведения подводного аппарата к стыковочному модулю // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 3. С. 152-161.
2. Пат. 2712799 Российская Федерация. Гидроакустическое навигационное устройство с четырехэлементной короткобазной антенной / Б.И. Филиппов, М.М. Бабичев. Приоритет от 20.05.2019.
3. Филиппов Б.И. Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестник РГРТУ. 2016. № 55. С. 33-40.
4. Филиппов Б.И., Чернецкий Г. А. Принципы аппаратурной реализации системы измерения дальности в гидроакустических каналах // Радиотехника. 2017. № 3. С. 40-49.
5. Arkhipov Mikhail. A Coordinate Determination Algorithm for USBL Systems // 2nd WSEAS Int. Conf. on CIRCUITS, SYSTEMS, SIGNAL and TELECOMMUNICATIONS (CISST'08) Acapulco, Mexico, January 25-27, 2008. P. 50-55.
6. Filip MandiT, Ivor RenduliT, NikolaMiškoviT, and Yula NaZ. Underwater Object Tracking Using Sonar and USBL Measurements // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Sensors. 2016. Article ID 8070286. P. 1-10.
7. M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre, and J. F. Vasconcelos. Embedded vehicle dynamics aiding for USBL/INS underwater navigation system // IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 22, no. 1. 2014 P. 322-330.
8. M. Li, H. Ji, X. Wang, L. Weng, and Z. Gong. Underwater object detection and tracking based on multi-beam sonar image processing // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO '13). Shenzhen, China. December 2013. P. 1071-1076.
9. Евтуров А. П., Митько В. Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1981. 256 с.
10. Матвиенко Ю.В. Гидроакустический комплекс навигации подводного робота. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Владивосток. 2004. 35 с.
11. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 2. М.: Советское радио, 1975. 392 с.
12. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 3. М.: Советское радио, 1976. 288 с.
13. Филиппов Б.И. Энергетический расчет гидроакустических линий связи // Вестник АГТУ. Серия Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 3. С. 81-91.

BUILDING OF HYDROACOUSTIC NAVIGATION SYSTEM WITH ULTRASHORT BASE FOR CONVERSION OF THE UNDERWATER APPARATUS TO THE DOCKING MODULE

Boris I. Filippov, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, filippov-boris@rambler.ru

Abstract

The purpose of the work is the development and research of the equipment of the high-frequency hydroacoustic system of transformation of short-range providing docking of autonomous submarine apparatus with a carrier for a hydroacoustic navigational system (HNS) with an ultrashort base. A decision supposes creation of high-precision HNS of estimate of location of the submarine apparatus (SA) and creation of the hydroacoustic system of communication between SA and the docking module (DM) with quite intensive exchange of information and small probability of mistakes. The specified task can be decided by two ways: 1. development of independent systems of navigation and communication of data; 2. development of the combined information and navigation system, where information signals are at the same time navigation. The advantage of the first way is the possibility to select the type of signals, the most suitable for functioning of each of systems. A main disadvantage is an increase of volume of equipment and need of introduction of system of synchronization allowing carry out data exchange between SA and DM with use of the principle of temporary division of signals. The second way is preferable both on equipment volume, and on tactical application. The win in the tactical application is that frequency of transmission of information messages is not connected to the transmission of separate signals of HNS and therefore can be made maximum. At the same time the interval of trajectory counts can be reduced, it is required for the increase of exactness of estimation of location of SA. Further the possibility of creation of the combined HNS is considered. It is possible to draw the following system-wide conclusions by results of preliminary estimates: 1) signals of transfer of data can be used as a navigation signal in HNS with an ultrashort base, it will allow to create the combined information navigation system of transformation; 2) level of a navigation signal considerably is exceeded level of noise environment in a transformation zone. Superficial and ground reflections will be acted as hindrances. It is desirable to choose depth of immersion of DM and SA much bigger, than the minimum distance of transformation for minimization of these hindrances; 3) in HNS with ultrashort base it is possible to use two ways of receiving estimates of a bearing and a corner of the place. In the first way estimate of navigation characteristics is made on the basis of the analysis CCF of a navigation signal at the exit of elements of the HNS antenna at an unknown form of a navigation signal. In the second way the used estimates are based on application of a priori known navigation signal on his function of uncertainty. A final choice of a way can be made during realization of natural tests.

Keywords: combined hydroacoustic navigation system, underwater apparatus (SA), the docking module (DM), navigation characteristics.

References

1. Filippov B.I. (2019). Arhitektura gidroakusticheskoi navigacionnoi sistemy c korotkoi bazoi dlya podvodnogo apparata k stukovochnomy moduly (Architecture of a hydroacoustic navigation system with a cotton basis for conversion of the underwater apparatus to the docking module. *Mekatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. Vol 20, no. 3. P. 152-161.
2. Pat 2712799 (RU). Gidroakusticheskoi navigacionnoi ystroistvo s chetirexelementnoi korotkobasnoi priemnoi antennoi / B.I. Filippov, M.M. Babichev. Prioritet ot 20.05.2019.
3. Filippov B.I. (2016). Opredelenie naklonnoj dal'nosti mezhdu sudnom i donnoj stanciej (Determination of the inclined range between the vessel and the bottom station). *Vestnik RGRTU*. no. 55. P. 33-40.
4. Filippov B.I., Cherneckij G. (2017). A Principy apparaturnoj realizacii sistemy izmerenija dal'nosti v gidroakusticheskikh kanalah (Principles of hardware implementation of the range measurement system in hydroacoustic channels). *Radio engineering*, no. 3. P. 40-49.
5. Arkhipov Mikhail. (2008). A Coordinate Determination Algorithm for USBL Systems. *CISST'08 Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Signal and Telecommunications*. Acapulco, Mexico, January 25-27. P. 50-55.
6. Filip Mandic, Ivor Rendulic, NikolaMiskovic, and Dula Nad. (2016). Underwater Object Tracking Using Sonar and USBL Measurements. *Hindawi Publishing Corporation. Journal of Sensors*. Article ID 8070286. P. 1-10.
7. M. Morgado, P. Oliveira, C. Silvestre, and J. F. Vasconcelos. (2014). Embedded vehicle dynamics aiding for USBL/INS underwater navigation system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 22. no. 1. P. 322-330.
8. M. Li, H. Ji, X. Wang, L. Weng, and Z. Gong. (2013). Underwater object detection and tracking based on multi-beam sonar image processing // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO '13). Shenzhen. China. December 2013. P. 1071- 1076.
9. Evtjutov A.P., Mit'ko V.B. (1981). Primery inzhenernyh raschetov v gidroakustike (Examples of engineering calculations in hydroacoustics). L.: Sudostroenie. 256 p.
10. Matvienko Ju. V. (2004). Gidroakusticheskij kompleks navigacii podvodnogo robota (Hydroacoustic complex of underwater robot navigation). // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehnicheskikh nauk. Vladivostok. 35 p.
11. Levin B.R. (1975). Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. (Theoretical foundations of statistical radio engineering). Moscow: Sovetskoe radio. Vol 2. 392 p.
12. Levin B.R. (1976). Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. (Theoretical foundations of statistical radio engineering). Moscow: Sovetskoe radio. Vol 3. 288 p.
13. Filippov B.I. (2016). Energeticheskij raschyt gidroakusticheskikh linij svyazi (Energy calculation of hydroacoustic communication lines). *Vestnik ASTU*. Series: Management, Computer Science and Informatics. No. 3. P. 81-91.

Information about author:

Boris I. Filippov, Novosibirsk State Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Department of Information Protection, Novosibirsk, Russia