

Б. А. КАСАТКИН, Н. В. ЗЛОБИНА, С. Б. КАСАТКИН, Д. В. ЗЛОБИН, Г. В. КОСАРЕВ

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПЕЛЕНГОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРИЕМНИКОВ

В статье рассматривается возможность пеленгования и определения координат источника акустического сигнала, излучаемого надводным или подводным движущимся объектом в инфразвуковом диапазоне частот. С этой целью используются гидроакустические комбинированные приемники. В ходе первого эксперимента получены оценки систематической составляющей погрешности пеленгования при излучении источником тонального или полигармонического сигнала, проведена процедура усреднения результатов пеленгования по набору частот. Полученные результаты использованы во втором эксперименте для оценки погрешности определения координат излучателя полигармонического сигнала, состоящего из трех комбинированных приемников, образующих распределенную в горизонтальной плоскости навигационную базу.

Ключевые слова: пеленгование малозумных источников звука, инфразвуковой диапазон частот, комбинированный акустический приемник, спектральный анализ акустических сигналов.

Введение

Обнаружение малозумных источников звука на фоне помехи в морской среде и определение координат и параметров движения цели относятся к наиболее важным и сложным задачам прикладной гидроакустики. Эта проблема значительно усложняется при работе приемной системы в условиях мелкого моря в нижнем звуковом и инфразвуковом диапазонах частот, когда возможности формирования направленности бортовых приемных систем с использованием когерентных методов обработки сигналов существенно ограничены. В этих условиях особое значение приобретает использование для таких целей гидроакустических комбинированных приемников (КП), измеряющих скалярно-векторные характеристики звукового поля. Комбинированный приемник, оставаясь точечным, измеряет звуковое давление в канале и три компоненты вектора колебательной скорости (или три компоненты вектора

Касаткин Борис Анатольевич. Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток).

Злобина Надежда Владимировна. Доктор технических наук, ученый секретарь, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН.

Касаткин Сергей Борисович. Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН.

Злобин Дмитрий Владимирович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН.

Косарев Георгий Валерьевич. Старший научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН.

градиента давления, пропорционального вектору колебательного ускорения) в векторных каналах. В свою очередь, измеренные первичные величины при использовании мультипликативных алгоритмов обработки сигналов позволяют вычислять три компоненты вектора интенсивности. Принципы работы комбинированного приемника, варианты конструктивного исполнения, математическое описание измеряемых величин и способы метрологической аттестации подробно описаны в монографиях [1–4]. Совокупная скалярно-векторная информация дает возможность успешно решать проблему как обнаружения, так и пеленгования источника сигнала, а при наличии 2-3 комбинированных приемников можно не только определять координаты источника сигнала, но и оценивать погрешность определения координат. К сожалению, в известных монографиях [1–4], посвященных многолетним исследованиям КП, а также в специализированных работах [5–8] основное внимание уделено только оценкам их помехоустойчивости. Как правило, конкретные оценки погрешности, подтвержденные экспериментальными исследованиями в типичных для использования и наиболее сложных условиях мелкого моря и низких частот, отсутствуют. Определенный интерес представляет теоретическая оценка погрешности пеленгования с использованием одиночного КП и ее зависимость от отношения «сигнал–помеха», приведенная в [9–10], однако она получена для модельных условий свободного пространства.

В работах [11–12] описываются алгоритмы и оценки, позволяющие повысить помехоустойчивость КП и, соответственно, точность решения более сложных навигационных задач, которые играют важную роль в общей проблеме обнаружения и определения координат надводного или подводного движущегося источника акустических сигналов. В обзорных статьях [13, 14] приведены теоретические оценки погрешности определения координат источника сигнала с помощью одиночного КП (векторного гидрофона) или антенной решетки, состоящей из набора КП. Вместе с тем описанные в этих работах модельные эксперименты также были проведены в условиях, соответствующих условиям свободного пространства и стационарным условиям проведения.

В настоящей статье выполнена экспериментальная оценка погрешности решения навигационных задач с использованием КП в наиболее сложных условиях мелкого моря в звуковом поле движущегося подводного источника акустических сигналов нижнего звукового и инфразвукового диапазонов. Основная проблема пеленгования движущегося источника акустического сигнала заключается в отсутствии резерва времени для полноценного статистического анализа помехи и проведения усредняющих процедур, уменьшающих ее дисперсию, в отсутствии априорных данных о самой помехе, а также в неэффективности алгоритмов усреднения в условиях интерференционной изменчивости звукового поля в мелком море на низких частотах. С учетом этого интерес представляют методы экспериментального определения погрешности пеленгования и координат с использованием КП. Для оценки погрешности пеленгования и определения координат источника сигнала с применением КП были поставлены два эксперимента в Уссурийском заливе, в ходе которых использовалась приемная система, разработанная в ИПИМТ ДВО РАН. Система содержала три КП, которые могли быть установлены либо в одной точке на разных горизонтах, либо на одном горизонте в разных точках, образующих распределенную в пространстве навигационную базу.

Оценка погрешности пеленгования

В первом эксперименте, выполненном на участке акватории Уссурийского залива с достаточно ровным дном, была получена оценка погрешности пеленгования источника сигнала. Кроме того, была предложена методика устранения систематической составляющей погрешности пеленгования путем сравнения результатов пеленгования с «эталонными», в качестве которых использовались данные, полученные с использованием GPS. В этом эксперименте приемные модули были установлены на горизонтах 15, 25, 35 м. Катамаран с излучателем дрейфовал вдоль трех трасс в режиме тишины, излучая за счет автономного источника питания полигармонический сигнал на частотах 53, 64, 90, 137, 153 Гц.

На первой трассе излучатель располагался на горизонте первого приемного модуля 15 м, на второй трассе – на горизонте второго модуля 25 м, на третьей – на горизонте третьего модуля 35 м. Глубина моря на трассах распространения сигналов плавно менялась в пределах 43–47 м. Расстояние между приемной системой и излучателем варьировалось в пределах 3–5 км. Схема маневрирования катамарана с источником на трех трассах приведена на рис. 1.

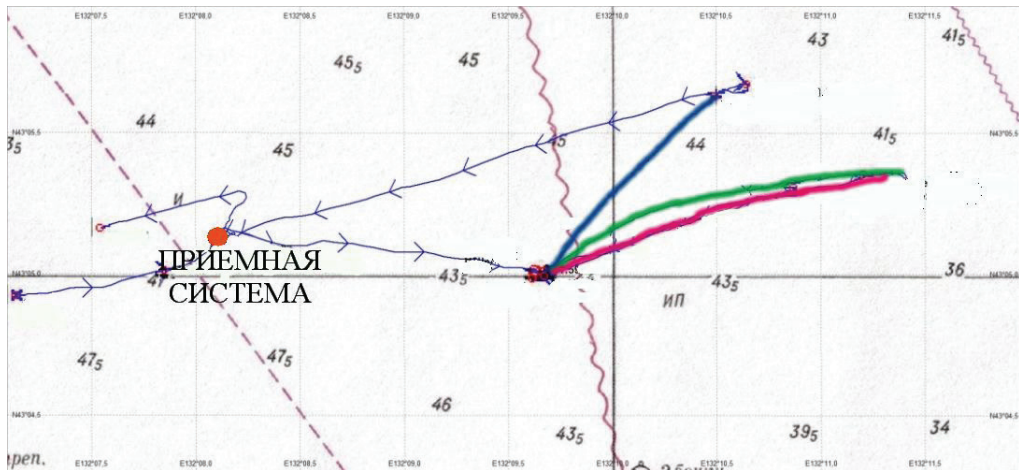


Рис. 1. Схема маневрирования катамарана с излучателем относительно приемной системы КП

Обработка акустических сигналов состоит из следующих этапов:

- спектрального анализа акустических сигналов в канале звукового давления и векторных каналах в рабочем диапазоне частот;
- вычисления проходных характеристик для квадрата звукового давления и компонент вектора интенсивности для суммарного случайного процесса «сигнал плюс помеха», с использованием алгоритмов усреднения с помощью окна Хэмминга длительностью 50 с;
- вычисления проходных характеристик для квадрата звукового давления и компонент вектора интенсивности для помехи, выделенной из суммарного процесса в реальном масштабе времени с использованием алгоритмов усреднения с помощью окна Хэмминга длительностью 50 с;
- вычисления отношения «сигнал–помеха» в канале звукового давления и векторных каналах с последующей предварительной оценкой вероятности правильного обнаружения источника сигнала;

- определения текущих значений пеленга на источник сигнала на рабочих частотах полигармонического сигнала для каждого КП;
- определения систематической составляющей погрешности измерения пеленга с использованием данных GPS и усредненных по набору рабочих частот значений пеленга, измеренных КП;
- определения среднеквадратичной составляющей погрешности измерения пеленга.

Определение координат приемной системы, катамарана и соответствующих значений пеленга выполнялось с помощью приемника GPS-MAP 60Сх фирмы GARMIN с погрешностью не более 10 м. Можно полагать, что погрешность всех измерительных процедур будет в существенной мере зависеть от отношения «сигнал–помеха» S/N , которое при известном уровне излученного сигнала определяется фоновой шумовой помехой акватории и помехой, создаваемой шумами ближнего судоходства. Фоновые шумы имеют достаточно стабильные характеристики, слабо зависящие от конкретных условий эксперимента, тогда как шумы ближнего судоходства в акватории, открытой для судоходства, изменялись в значительных пределах за время проведения эксперимента. Наименьший уровень шумовой помехи ближнего судоходства наблюдался на второй трассе. На рис. 2 приведены проходные характеристики для отношения $(S+N)/N$ (дБ), вычисленного в канале звукового давления (верхняя строка) и в векторных каналах x, y, z , для второй трассы на частоте 53 Гц, для которой отношение «сигнал–помеха» было наилучшим.

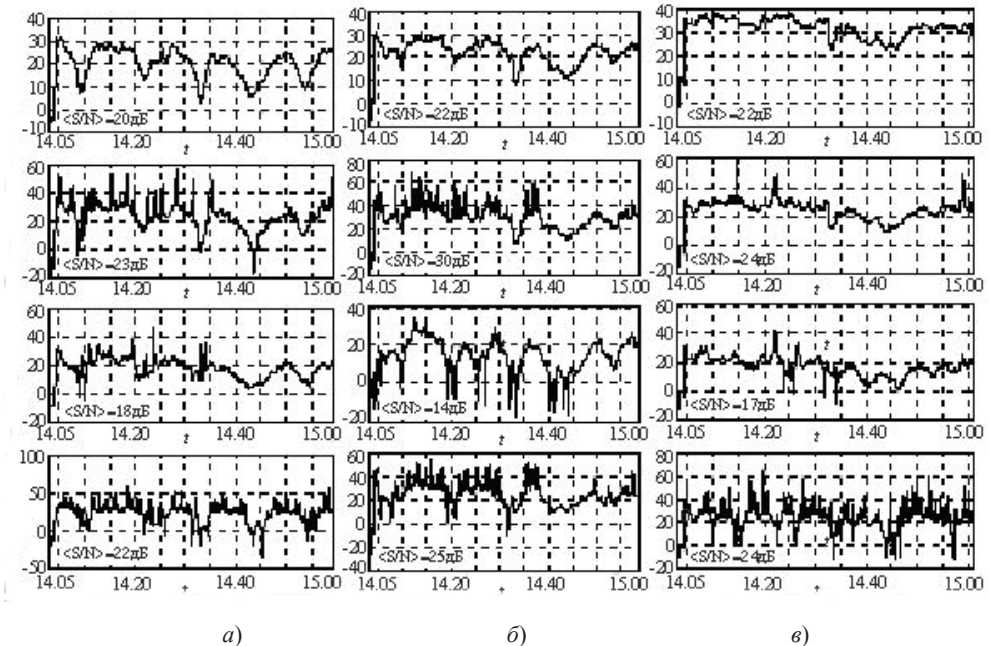


Рис. 2. Проходные характеристики для отношения $(S+N)/N$ в канале звукового давления и в векторных каналах x, y, z : а – первый приемник, б – второй приемник, в – третий приемник

Под уровнем сигнала S в каждом канале, скалярном или векторном, понимается логарифмический уровень звукового давления или логарифмический уровень компоненты вектора колебательной скорости излучаемого (модельного) тонального сигнала, который выделяется из суммарного процесса «сигнал плюс помеха» $S+N$ методами узкополосного спектрального анализа. Величина S определяется соотношениями:

$$S(\text{дБ}) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 20 \log \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

где p , ϑ , I – давление, колебательная скорость и интенсивность, измеряемые комбинированным приемником; p_0 , ϑ_0 , I_0 – давление, колебательная скорость и интенсивность, соответствующие нулю дБ.

Под помехой N понимается вся остальная часть суммарного процесса, под уровнем помехи – среднеквадратичный уровень звукового давления или компонент вектора колебательной скорости, усредненный в полосе частот посредством процедуры «отбеливания».

Можно отметить, что во всех каналах КП и для всех КП отношение S/N принимает довольно высокое значение порядка 20-25 дБ, что способствует уменьшению погрешности измерений при определении координат и параметров движения цели, а также при поддержании акустического контакта с целью. Усредненные по трассе значения этой величины приведены на рис. 2. Следует, однако, отметить также значительную вариабельность этого важнейшего параметра, влияющего на погрешность измерений, связанную как с интерференционной изменчивостью звукового поля в мелком море на низких частотах, так и с процессами локальной компенсации потоков мощности в векторных каналах КП. Процессы локальной компенсации векторных потоков мощности, а также локальной инверсии горизонтальных потоков мощности подробно исследованы в работе [15].

В случае если процессы локальной компенсации имеют место в поле векторной помехи, искомое отношение $(S+N)/N$ в векторных каналах увеличивается на 15-25 дБ относительно среднего значения. Если процессы локальной компенсации имеют место в суммарном поле «сигнал плюс помеха», искомое отношение $(S+N)/N$ в векторных каналах уменьшается на 15-25 дБ относительно среднего значения, что хорошо видно на рис. 2. Именно эти процессы играют негативную роль при решении навигационных задач в мелком море, но не учитываются при модельных исследованиях в натуральных условиях.

Рассмотрим теперь алгоритмы пеленгования источника сигнала с использованием векторных каналов КП и последующую оценку погрешности пеленгования. При определении пеленга на источник звука использовались следующие соотношения:

$$\varphi = \alpha_0 - \alpha, \quad \alpha = \arctg \left(\frac{I_y \cdot v_x}{I_x \cdot v_y} \right), \quad (1)$$

где α – курсовой угол на источник относительно оси x локальной системы координат, связанной с КП; α_0 – показание датчика углов (компаса), регистрирующего положение оси x КП в географической системе координат; φ – пеленг на источник в географической системе координат; v_x , v_y – чувствительность каналов x , y КП; I_x , I_y – горизонтальные компоненты вектора интенсивности.

Следует отметить, что формула (1) справедлива только для условий свободного пространства, когда вектор интенсивности содержит одну лишь потенциальную составляющую, направленную всегда от источника в точку приема. В звуковом поле мелкого моря вектор интенсивности приобретает вихревую составляющую, которая

изменяет значение суммарного вектора вплоть до явления инверсии горизонтального потока мощности [14].

Результаты пеленгования показаны на рис. 3 для второй трассы при излучении набора частот 53, 64, 90, 137, 153 Гц в дрейфе в режиме тишины на катамаране. По данным GPS пеленг на источник для этой трассы изменялся линейно со временем в пределах $\varphi_2 = 96,0 - 84,0^\circ$. На рисунках частотам 53, 64, 90, 137, 153 Гц соответствуют синий, черный, красный, зеленый, бордовый цвета. Можно отметить высокий уровень суммарной погрешности в зонах интерференционных минимумов звукового поля для отдельных дискретных составляющих сигнала и значительную по величине систематическую составляющую погрешности.

Особый интерес представляет достаточно редкое в экспериментальной практике, но весьма характерное изменение пеленга на 360° в окрестности седловой точки в 14 ч 08 мин на частоте 53 Гц (рис. 3, а), что служит прекрасным подтверждением наличия вихревой структуры поля вектора интенсивности. Идентификация этой точки как седловой подтверждается и данными, приведенными для компонент вектора интенсивности на рис. 2, а. Теоретическому исследованию вихревых структур и аномальных особенностей (дислокаций фазового фронта) типа узловых и седловых точек посвящено большое число публикаций, среди которых отметим [16, 17]. Экспериментальное исследование вихревых структур в мелком море выполнено в [18].

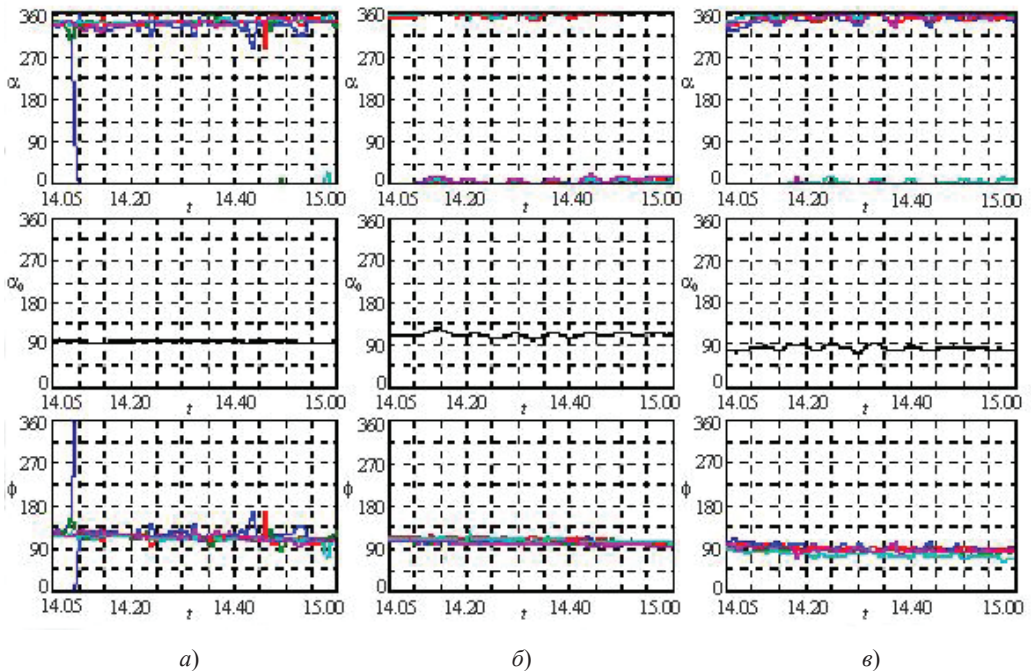


Рис. 3. Пеленг на источник звука: а – первый приемник, б – второй приемник, в – третий приемник

Экспериментальное обнаружение самих дислокаций происходит достаточно редко и только при возникновении определенных соотношений между амплитудами и фазами интерферирующих мод, формирующих суммарное звуковое поле в волноводе [17]. Как следует из [17], дислокации образуют периодические пространственные структуры, искажающие фазовую структуру звукового поля.

Тем не менее аномальные особенности вихревых полей важны и при оценке погрешности пеленгования с использованием КП, так как именно они отличают поле вектора интенсивности точечного источника в мелком море от аналогичного поля в свободном морском пространстве, которое не содержит вихревой составляющей. По этой причине оценки погрешности пеленгования, выполненные для модельных условий свободного пространства в [9, 12, 13], следует рассматривать как весьма оптимистические, требующие экспериментальной проверки. На рис. 4 представлены результаты пеленгования с усреднением по набору рабочих частот (сплошная линия) для второй трассы и результаты пеленгования по данным GPS (штриховая линия).

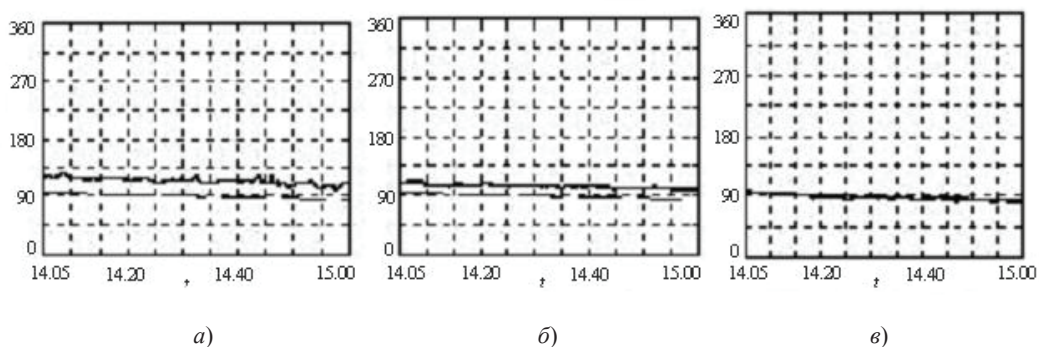


Рис. 4. Усредненный пеленг: *а* – первый приемник, *б* – второй приемник, *в* – третий приемник

Сравнение пеленгов, обнаруженных с использованием КП, с данными, полученными с использованием GPS, позволяют вычислить систематическую составляющую погрешности пеленгования: 30° , 20° , 10° для приемников 1–3 соответственно. Эта составляющая может быть связана с неучтенным магнитным склонением в районе проведения эксперимента. Для ее устранения проводилась калибровка компаса после его установки в приемный модуль, собственная погрешность компаса (НМС 5883L) составляла 3° . Погрешность пеленгования может быть также обусловлена горизонтальной рефракцией звуковых лучей в нерегулярном по глубине мелком море, которая в отличие от вертикальной рефракции связана с зависимостью эффективной лучевой скорости распространения от глубины нерегулярного многомодового волновода. После исключения систематической составляющей среднеквадратичная составляющая погрешности пеленгования при отношении «сигнал–помеха» порядка 20 дБ оказалась в пределах $1\text{--}5^\circ$. Во втором эксперименте была получена оценка погрешности определения координат движущегося источника акустического сигнала.

Оценка погрешности определения координат

Для определения координат источника сигнала необходимо использовать как минимум два разнесенных в пространстве КП, географические координаты которых определяются в момент установки с помощью GPS и в дальнейшем считаются известными. Погрешность определения координат источника сигнала зависит от двух факторов: обычно достаточно малой погрешности определения координат КП и погрешности, обусловленной базовым расстоянием между КП, погрешностью обнаружения пеленга каждым из приемников и геометрией расположения источника сигнала относительно КП.

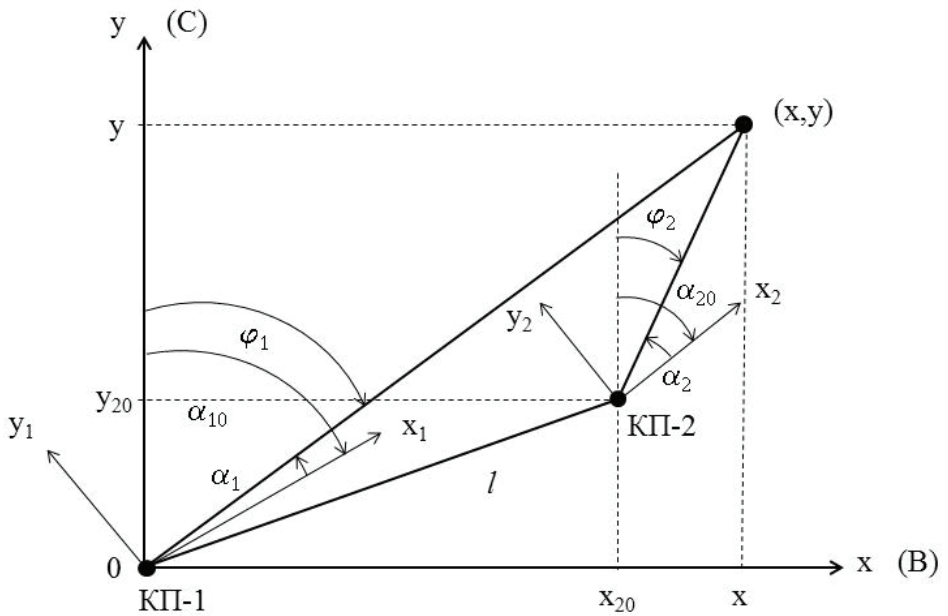


Рис. 5. Схема определения координат источника сигнала с помощью пары КП

Целью второго эксперимента было определение погрешности решения навигационных задач с использованием КП. Рассмотрим основные соотношения при определении координат и оценке погрешности с помощью пары КП. Схема расположения приемников (КП-1 и КП-2) и источника сигнала показана на рис. 5: x_1, y_1 и x_2, y_2 – локальные координатные системы КП-1 и КП-2 соответственно, x, y – географическая система координат, ось которой ориентирована на север. Остальные обозначения соответствуют формулам (1). Координаты x, y источника сигнала определяются соотношениями:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x}{y}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x - x_{20}}{y - y_{20}}, \quad y = \frac{x_{20} - y_{20} \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad x = y \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где x_{20}, y_{20} – координаты КП-2 в географической системе координат с началом в месте расположения приемника КП-1, φ_1, φ_2 – пеленги на источник сигнала, измеряемые КП-1 и КП-2 соответственно, l – базовое расстояние. Погрешности определения координат $\Delta x, \Delta y$ определяются соотношениями:

$$\Delta y = - \frac{y_{20}(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_{20}) \cos^2 \varphi_1 + (x_{20} - y_{20} \operatorname{tg} \varphi_2)(\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1)}{(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)^2 \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \Delta \varphi, \quad (3)$$

$$\Delta x = \operatorname{tg} \varphi_1 \Delta y + \frac{x_{20} - y_{20} \operatorname{tg} \varphi_2}{(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1} \Delta \varphi,$$

где $\Delta \varphi$ – погрешность пеленгования.

Полагая в формулах (3) для простоты анализа $y_{20} = 0$, $x_{20} = l$, получаем, не теряя общности, упрощенные выражения для погрешностей:

$$\Delta x = \frac{l}{2} \frac{\sin 2\varphi_1 - \sin 2\varphi_2}{\sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)} \Delta\varphi, \quad \Delta y = l \frac{\cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2}{\sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)} \Delta\varphi. \quad (4)$$

С использованием формулы (4) можно получить важные оценки в некоторых частных случаях:

$$1) \quad x = \frac{l}{2}, \quad \varphi_2 = \pi - \varphi_1, \quad (5)$$

$$\Delta x = \frac{l\Delta\varphi}{\sin 2\varphi_1}, \quad \Delta y = 0, \quad (\Delta x)_{\min} = l\Delta\varphi;$$

$$2) \quad \varphi_1 \rightarrow \varphi_2 \rightarrow 0, \quad (6)$$

$$\Delta x = \frac{l\Delta\varphi}{|\varphi_1 - \varphi_2|}, \quad \Delta y = \frac{l(\varphi_1 + \varphi_2)}{2|\varphi_1 - \varphi_2|} \Delta\varphi \gg \Delta x.$$

Из соотношений (5, 6) следуют некоторые оценочные выводы относительно погрешности определения координат с помощью пары КП:

- погрешность определения координат пропорциональна базовому расстоянию l и погрешности пеленгования $\Delta\varphi$;
- погрешность достигает минимального значения в направлении, перпендикулярном базовому отрезку, проходящему через его середину, на расстоянии $l/2$ от него;
- погрешность растет в окрестности базовой линии или в перпендикулярном направлении вдали от нее.

Эти выводы, качественно справедливые для любой длиннобазисной антенны, оказались верными и в случае использования точечных приемных систем на основе КП. Полагая оценку минимальной погрешности пеленгов $\Delta\varphi = 1-5^\circ$, подтверждаемую экспериментальными данными, получаем оценку минимальной погрешности определения координат $\Delta x_{\min} \leq 0,1l$.

Экспериментальная проверка возможности определения координат с помощью трех КП была выполнена на акватории Уссурийского залива, глубина моря изменялась в пределах 30-45 м. Близость береговой черты и нерегулярность изменения глубины моря на трассах проведения эксперимента не исключали, по всей видимости, влияния горизонтальной рефракции на погрешности пеленгования и определения координат. По этой причине оценка систематической составляющей погрешности была взята из предыдущего эксперимента, выполненного в том же диапазоне рабочих частот без переустановки оборудования, но в условиях минимального изменения рабочих глубин на трассах эксперимента. Схема эксперимента показана на рис. 6.

КП, расположенные на глубине 20 м, были разнесены в горизонтальной плоскости. Катамаран с излучателем удалялся последовательно на расстояния 12, 8, 4 км от центра приемной системы и ложился в дрейф, на борту соблюдался режим тишины.

Излучатель, опущенный на горизонт 20 м, излучал набор рабочих частот в диапазоне 53–153 Гц. Ниже приводятся результаты пеленгования для второй трассы, расположенной на расстоянии 8 км от приемной системы. После усреднения пеленгов по набору частот получаем сглаженные результаты пеленгования, которые поясняются рис. 7.

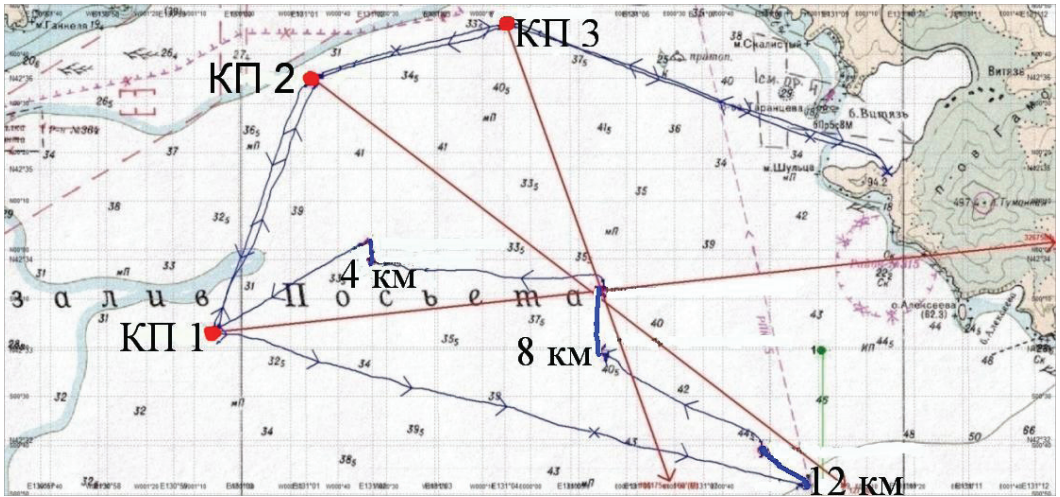


Рис. 6. Пеленги на источник сигнала и треугольник невязки, трасса 2

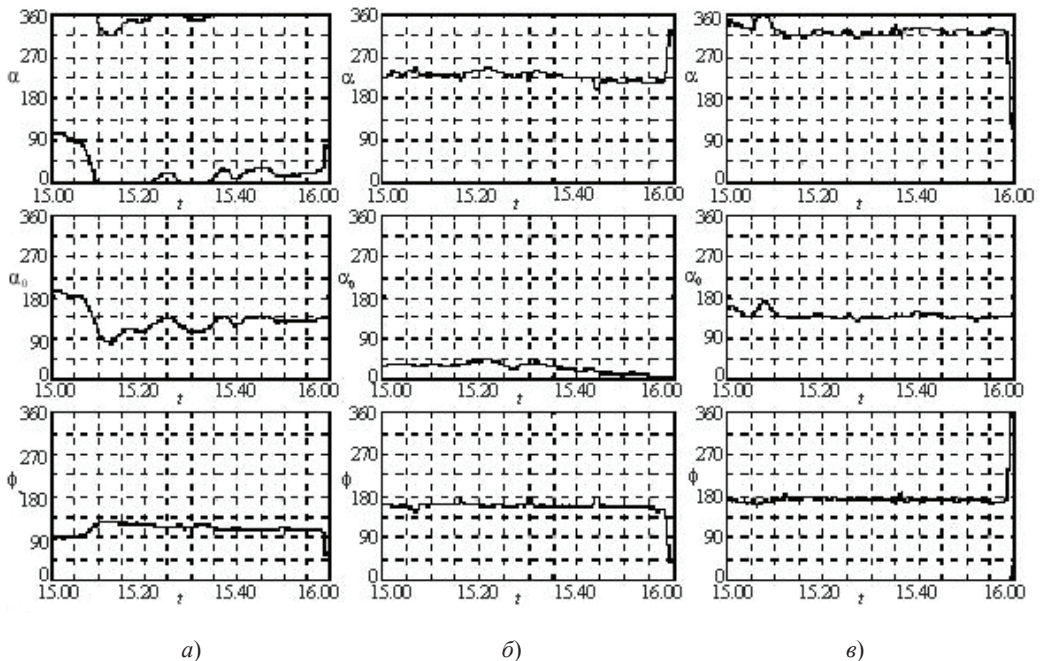


Рис. 7. Усредненный пеленг: а – первый приемник, б – второй приемник, в – третий приемник

Результаты пеленгования источника сигнала с помощью трех КП приемной системы (после устранения ранее определенной систематической составляющей погрешности) в сравнении с данными GPS сведены в таблицу с указанием среднеквадратич-

ной погрешности пеленгования $\Delta\varphi$. Рис. 6 поясняет соответствующие графические построения для определения координат источника сигнала для второй трассы. На рисунках экспериментально определенные пеленги изображены красным цветом, а пересечение трех пеленгов образует треугольник невязки, размер которого является мерой погрешности определения координат таким способом. Оценки усредненной погрешности определения координат ΔR для источника сигнала также сведены в таблицу. Здесь под погрешностью определения координат понимается расстояние между средней точкой трассы и «центром тяжести» треугольника невязки, который, в свою очередь, определяется как точка пересечения медиан. Экспериментальные оценки погрешности определения координат соответствуют качественно теоретическим оценкам (5), (6).

Т а б л и ц а

R, км	12		8		4	
	Система КП	GPS	Система КП	GPS	Система КП	GPS
КП-1	105	102	84	87	55	60
КП-2	130	129	127	128	165	161
КП-3	145	148	160	162	215	213
$\Delta\varphi$, град.	1–3		1–3		2–5	
ΔR , км	0,2–0,6		0,13–0,39		0,13–0,33	

Выводы

Получены экспериментальные результаты и количественные оценки погрешностей пеленгования и определения координат источника акустического сигнала с использованием гидроакустических комбинированных приемников, образующих распределенную в горизонтальной плоскости навигационную базу. Экспериментальные результаты были получены в наиболее сложных условиях мелкого моря в звуковом поле движущегося подводного источника акустических сигналов низких звуковых и инфразвуковых частот, когда другие методы определения координат источника сигнала оказываются неэффективными.

Показано, что для уменьшения погрешности пеленгования, связанной с интерференционной изменчивостью звукового поля и его вихревой структурой в мелком море, целесообразно использование в спектре сигнала ряда дискретных составляющих с последующим усреднением результатов пеленгования по набору рабочих частот. При выполнении перечисленных условий усредненная погрешность пеленгования изменяется в пределах 1–5°, погрешность определения координат составляет 2–10% от базового расстояния.

Авторы благодарят всех сотрудников ИПМТ ДВО РАН, принимавших участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.

3. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 479 с.
5. Гордиенко В. А., Гордиенко Е.Л., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. Помехоустойчивость гидроакустических приемных систем, регистрирующих поток акустической мощности // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 774–785.
6. Смартышев М.Д. О помехоустойчивости комбинированного акустического приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 558–559.
7. Смартышев М.Д. Сравнительная оценка помехоустойчивости антенн, состоящих из комбинированных приемников, в анизотропном поле помех // Гидроакустика. 2006. Вып. 6. С. 18–24.
8. Шендеров Е.Л. О помехоустойчивости приемной антенны, состоящей из приемников звукового давления и приемников колебательной скорости // Гидроакустика. 2002. Вып. 3. С. 24–40.
9. Гордиенко В.А., Илюшин Я.А. О флуктуации угла пеленга сосредоточенного источника, определяемого векторным приемником в поле шумов океана // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 365–370.
10. Машошин А.И. Возможные области применения комбинированных приемников гидроакустических сигналов // Гидроакустика. 2018. Вып. 35 (3). С. 24–36.
11. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 38–47.
12. Злобин Д.В., Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. Некоторые результаты исследований скалярно-векторных звуковых полей в инфразвуковом диапазоне частот // Гидроакустика. 2017. Вып. 31(3). С. 65–78.
13. Martin, K.T., *Eigenvalue Pairing for Direction Finding with Vector Sensor Array*, University of Rhode Island, 2013. 72 p.
14. Li Nan-Song, Song Hai-Yan, High resolution DOA of coherent sources based on single acoustic vector hydrophone, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 389–396.
15. Щуров В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С., Иванова Г.Ф., Черкасов А.В. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 58–67.
16. Жуков А.Н., Иванников А.Н., Кравченко Д.И., Павлов В.И. Особенности тонкой энергетической структуры звукового поля // Акуст. журн. 1989. Т. 35. Вып. 4. С. 634–638.
17. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Дислокации фазового фронта в океаническом волноводе и их проявление в акустических измерениях // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 2. С. 260–265.
18. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.

Kasatkin, B.A., Zlobina, N.V., Kasatkin, S.B., Zlobin, D.V., Kosarev, G.V. (Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia)
Estimation of Signal Source Direction-Finding and Position Error Using Combined Hydroacoustic Receivers, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2019, vol. 27, no. 4 (107), pp. 117–129.

Abstract. The paper considers the possibility of direction finding and determining the coordinates of a source of acoustic signal emitted by a surface or underwater moving object in the infrasonic frequency range. For this purpose, combined hydroacoustic receivers are used. In the first experiment, the estimates of the systematic component of the bearing error were obtained for a source emitting a tonal or polyharmonic signal, and the procedure of averaging the direction finding results over a set of frequencies was carried out. The obtained results were used in the second experiment to estimate the error of coordinates determined for a polyharmonic emitter consisting of three combined receivers which form a navigation base distributed in the horizontal plane.

Key words: direction finding for low-noise sound sources, infrasonic frequency range, combined acoustic receiver, spectral analysis of acoustic signals.

REFERENCES

1. **Gordienko, V.A., Ilyichev, V.I., and Zakharov, L.N.**, Vektorno-fazovye metody v akustike (Vector-Phase Methods in Acoustics), Moscow: Nauka, 1989.
2. **Schurov, V.A.**, Vektornaya akustika okeana (Vector Acoustics of the Ocean), Vladivostok: Dal'nauka, 2003.
3. **Dzyuba, V.P.**, Skalyarno-vektornye metody v akustike (Scalar-Vector Methods in Acoustics), Vladivostok: Dal'nauka, 2006.
4. **Gordienko, V.A.**, Vektorno-fazovye metody v akustike (Vector-Phase Methods in Acoustics), Moscow: Physmatlit, 2007.
5. **Gordienko, V.A., Gordienko, E.L., Krasnopistsev, N.V., and Nekrasov, V.N.**, Noise immunity of hydroacoustic receivers detecting acoustic power flow, *Akusticheskii zhurnal*, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 774–785.
6. **Smaryshev, M.D.**, Noise immunity of combined acoustic unit, *Akusticheskii zhurnal*, 2005, vol. 51, no. 4, pp. 558–559.
7. **Smaryshev, M.D.**, Comparative evaluation of noise immunity of antennas consisting of combined receivers, in anisotropic interference field, *Gidroakustika*, 2006, no. 6, pp. 18–24.
8. **Shenderov, E.L.**, Noise immunity of receiving aerial consisting of sound pressure hydrophones and velocity hydrophones, *Gidroakustika*, 2002, no. 3, pp. 24–40.
9. **Gordienko, V.A. and Ilyushin, Ya.A.**, Fluctuation of bearing angle of lumped source defined by vector receiver in the ocean noise field, *Akusticheskii zhurnal*, 1996, vol. 42, no. 3, pp. 365–370.
10. **Mashoshin, A.I.**, Possible applicability of combined receivers of sonar signals, *Gidroakustika*, 2018, vol. 35, no. 3, pp. 24–36.
11. **Kasatkin, B.A., Kasatkin, S.B.**, Experimental estimate of noise immunity of combined receiver in infrasonic frequency range, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 38–47.
12. **Zlobin, D.V., Zlobina, N.V., Kasatkin, B.A., Kasatkin, S.B., and Kosarev, G.V.**, Selected results of examining scalar-vector acoustic fields in infrasonic frequency range, *Gidroakustika*, 2017, vil. 31, no. 3, pp. 65–78.
13. **Martin, K.T.**, Eigenvalue Pairing for Direction Finding with Vector Sensor Array, University of Rhode Island, 2013.
14. **Li Nan-Song, Song Hai-Yan**, High resolution DOA of coherent sources based on single acoustic vector hydrophone, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 389–396.
15. **Schurov, V.A., Lyashkov, A.S., Scheglov, S.G., Tkachenko, E.S., Ivanova, G.F., and Cherkasov, A.V.**, Local structure of shallow sea interference field, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 58–67.
16. **Zhukov, A.N., Ivannikov, A.N., Kravchenko, D.I., and Pavlov, V.I.**, Specific features of fine energy structure of acoustic field, *Akusticheskii zhurnal*, 1989, vol. 35, no. 4, pp. 634–638.
17. **Zhuravlev, V.A., Kobozev, I.K., and Kravtsov, Yu.A.**, Dislocations of phase front in the ocean waveguide and their appearance in acoustic measurements, *Akusticheskii zhurnal*, 1989, vol. 35, no. 2, pp. 260–265.
18. **Schurov, V.A., Kuleshov, V.P., and Cherkasov, A.V.**, Cyclonic properties of acoustic intensity vector in shallow sea, *Akusticheskii zhurnal*, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 837–843.

Материал поступил 06.06.2019