

Ю. В. МАТВИЕНКО

ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКИ ДОСТИЖИМОЙ ТОЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗОЙ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Предложен метод построения гидроакустических навигационных систем с ультракороткой базой (ГАНС УКБ), и показана возможность их применения для навигационной поддержки подводных роботов. Представлены оценки используемых антенн и навигационных сигналов для определения их потенциальной точности. Отмечено, что высокая точность угловых измерений достижима в случае применения разреженных антенн. Описана математическая модель расчета случайной составляющей погрешности для различных многоэлементных антенн. Проанализированы источники систематических погрешностей, возникающих в реальных антеннах, и изложена методика градуировки точности ГАНС УКБ, основанная на точном измерении дальности, а также на данных бортовой навигационной системы подводного робота и судовых средств навигации. Приведен пример обработки реальных данных, полученных во время работы системы в глубоком море. Сделан вывод о возможности построения высокоточных ГАНС УКБ при применении круговых осесимметричных антенн с небольшим числом элементов и статистических методов обработки сигналов.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая навигация, пеленгование навигационного сигнала, случайные и систематические погрешности угловых измерений малогабаритной антенной, экспериментальные оценки точности навигационной системы с ультракороткой базой.

Введение

Задачи разработки средств точного координирования подводных роботов остаются актуальными [1], несмотря на значительный прогресс в создании малогабаритных средств автономной бортовой навигации и гидроакустических навигационных систем, достигнутый за последние годы. При этом роль и состав гидроакустических средств в структуре современного навигационного оборудования подводных роботов претерпевают изменения [2–3]. Сейчас эти средства служат для контроля текущей миссии на борту судна сопровождения и получения независимых внешних оценок координат для коррекции бортовой системы счисления. Наиболее широко применяются гидроакустические навигационные системы с длинной базой (ГАНС ДБ), развиваются системы с короткой (КБ) и ультракороткой базой (УКБ). Достаточно полный обзор этих систем представлен в [4]. Комплексирование данных автоном-

Матвиенко Юрий Викторович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН» (Владивосток).

ной и гидроакустической систем обеспечивает высокую точность координирования подводных роботов [5].

Физические основы формирования оценок координат объекта в ГАНС различны. В системах с длинной базой необходимо определить набор взаимных дальностей сообщаемых абонентов навигационной сети (автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), опорных маяков и судовой обеспечивающей антенны), размещенных вблизи либо дна, либо поверхности. Измерение дальностей – хорошо известная процедура, и ГАНС ДБ оптимально подходят для ее выполнения, поскольку являются наиболее точными. Как правило, эти системы используются для телеуправления и телеметрии. Тем не менее они имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение, а именно:

- отличаются громоздкостью и высокой стоимостью из-за наличия маяков-ответчиков и оборудования для их установки и координирования,
- требуют значительного времени для подготовки района работ.

Описание характеристик ГАНС ДБ и порядок их применения на практике, оценки их точности можно найти, например, в [6–8].

ГАНС УКБ обеспечивают измерение прямой дальности и углового положения синхронизированного источника детерминированного навигационного сигнала, устанавливаемого на борту объекта навигации, и обычно содержат подводный модуль с многоэлементной приемной антенной [9]. Им не свойственны указанные выше недостатки ГАНС ДБ, но их точность зависит от точности угловых измерений. В современных системах с УКБ точности определения углового положения источника навигационных сигналов достигают 0,1 град [10]. Некоторые заявленные характеристики известных систем приведены в табл. 1 [11–15].

Т а б л и ц а 1

Характеристики ГАНС УКБ
(точные параметры приведены для отношения «сигнал–шум» 20 дБ)

Разработчик	Наименование	Дальность действия (м)	Погрешность выработки угла (град)	Погрешность выработки дальности	Рабочие частоты (кГц)
KongsbergSimrad	HPR410	1500	2,86	5%	20~32
KongsbergSimrad	HiPAP502	5000	0,12	<20 см	21~31
Nautronix	NasPOS USBL	4500	0,143	0,25%	N/A
Nautronix	ATSII	2000	0,143	0,25%	15~18
ORE	LXT	N/A	0,5	1 м	22~30
ORE	TrackPoint II	N/A	0,1'' @50 dBSNR	0,5% @50 dBSNR	4,5~30
Sonardyne	Fusion	7000	0,0572	0,1%	18~36
LinkQuest	1500HA	1500	0,25	0,2 м	31~43,2
LinkQuest	5000HA	5000	0,25	0,4 м	14,2~19,8
LinkQuest	10000HA	10 ⁴	0,25	0,50%	7,5~12,5
IXSEA	GAPS	4000	0,12	0,20%	20~30
IXSEA	Posidonia	6000	0,171	0,30%	12~18
Evologics	S2CR	3500	0,1	0,01 м	18~34

Физические принципы, позволяющие получить заявленную высокую точность угловых измерений в представленных системах, как правило, не раскрываются производителями. Исключение составляет система HiRAP502, точность которой достигается за счет использования антенны с 241 приемником и TrackPoint II и отношением «сигнал–шум» не ниже 50 дБ.

В известных исследованиях, целью которых является повышение точности навигационных систем с УКБ, основное внимание уделяется обоснованию структуры приемных антенн и методов обработки сигналов. Анализ этих публикаций сделан, например, в [16].

В настоящей работе оценивается достижимая точность ГАНС УКБ и предлагаются технические решения, позволяющие измерять углы с точностью, сопоставимой с измерением дальностей.

Статья состоит из двух разделов. В первом предложена модель обработки навигационных сигналов с использованием многоэлементной круговой антенны и метода максимального правдоподобия и сделан анализ потенциальной точности ГАНС УКБ на основе расчета случайной составляющей погрешности угловых измерений. Во втором разделе на основе измерений, полученных как в лабораторных, так и в реальных условиях, сделаны оценки точности разработанной навигационной системы с УКБ.

Модель обработки данных в системах с ультракороткой измерительной базой и оценки потенциальной точности угловых измерений

Модель обработки данных для определения углового положения источника навигационных сигналов

Основным устройством ГАНС УКБ является приемная антенна, габариты которой сравнимы с длиной волны навигационной частоты. Оценить возможность достижения высокой точности таких систем можно на основе математических моделей обработки навигационных сигналов для антенн различной конфигурации путем определения случайной составляющей погрешности угловых измерений. Как правило, пеленгование источника навигационных сигналов обеспечивается обработкой фазовой информации, полученной на апертуре приемной антенны. Например, для канонического фазового пеленгатора, в качестве которого выступает простой двухэлементный приемник с измерительной базой $2b$, где разность фаз φ связана с пеленгом β аналитическим соотношением

$$\varphi = 2kbs\sin\beta, \quad (1)$$

случайная составляющая погрешности измерения пеленга σ_β определяется следующим выражением, полученным путем дифференцирования (1):

$$\sigma_\beta^{-1} = 2kb\cos\beta\sigma_\varphi^{-1}. \quad (2)$$

Здесь $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, σ_φ – случайная составляющая погрешности измерения фазы, λ – длина волны, пеленг β отсчитывается от нормали к измерительной базе. Для определения пеленга в соответствии с (1) необходимо, чтобы размер измерительной базы не превышал половины длины волны. В противном случае вы-

ражение (1) не позволяет установить однозначную связь между измеряемой фазой и искомым пеленгом. Полагая далее $2b = \lambda/2$ и учитывая, что потенциальная точность измерения фазы сигнала определяется отношением «сигнал–шум» q в измерительном канале [17], получим выражение (2) в виде $\sigma_{\beta}^{-1} = q \pi \cos \beta$. Отсюда следует, что погрешность такого пеленгатора велика даже при высоком уровне принимаемого сигнала. Например, при отношении «сигнал–шум» 20 дБ погрешность измерения пеленга составит около 2 град и, кроме того, будет иметь угловую зависимость.

Чтобы исключить угловую зависимость погрешности при пеленговании источника, находящегося в плоскости антенны, применяют четырехэлементный приемник, состоящий из двух идентичных ортогональных пар. Пеленг можно определить с использованием разности фаз различных пар элементов антенны. Избыточность информации позволяет получить разные оценки пеленга и использовать их для уменьшения погрешности. Тогда зависимость погрешности измерения пеленга от угла пеленгования исключается и при измерительной базе $2b = \lambda/2$ принимает вид $\sigma_{\beta}^{-1} = \sqrt{2}q\pi$.

Поскольку потенциальная точность пеленгаторов, составленных из ортогональных пар с измерительной базой, равной половине длины волны, оказывается низкой, естественным представляется применение многоэлементных пеленгаторов. Повышение точности при этом достигается за счет увеличения измерительной базы и обработки избыточной информации.

Алгоритмы обработки измерений в системах с фазовым пеленгованием основаны на том, что распределение фазы принимаемого навигационного сигнала на апертуре дискретной антенны связано с искомыми параметрами углового положения объекта достаточно простыми аналитическими соотношениями. Расчетные погрешности углового положения объекта определяются конфигурацией антенны и точностью определения фазы в каждом канале. Очевидно, что такая схема решения задачи неполна, поскольку не учитывает параметры текущей помеховой обстановки. При выборе реалистичной модели шума и его характеристик для многоэлементных антенн можно применить статистические методы с оптимизацией обработки данных. Критерием оптимальности может стать минимизация случайной составляющей погрешности угловых измерений при некотором заданном числе каналов обработки (элементов антенны – гидрофонов).

Основу алгоритмов статистической обработки составляет нахождение отношения правдоподобия для текущей реализации принимаемого сигнала, искаженного шумом. При известной структуре произвольной плоской многоэлементной антенны оптимальная оценка углового параметра соответствует максимуму корреляционной весовой суммы [17], которая может быть представлена в виде [18]

$$Z = \sum_{m=1}^M q_m^2 \exp \{i\varphi_m + i\theta_m(\beta)\}, \quad (3)$$

где m – номер элемента в антенне (номер канала), M – число элементов в антенне, q_m^2 – отношение «сигнал–шум» в m -том канале, φ_m – измеренное значение фазы принимаемого навигационного сигнала на элементах антенны. В выражении (3) $\theta_m(\beta)$ определяет задержки фазы плоской звуковой волны как функции геометрического размещения элементов конкретной антенны и значений измеряемого углового параметра относительно точки приведения. Фактически это ключевая фазовая характе-

ристика антенны, обуславливающая точность угловых измерений. Она может быть задана в аналитическом виде, о чем пойдет речь далее, или определена экспериментально. Наличие в (3) взвешивающего коэффициента q_m^2 для описания качества фазовой информации, а также использование при обработке данных результатов градуировки антенны $\theta_m(\beta)$ коренным образом отличает эту модель обработки от известных алгоритмов амплитудно-фазовой обработки.

Оптимальная оценка искомого пеленга определяется известным условием $\frac{\partial |Z|^2}{\partial \beta} = 0$ [17], из которого следует уравнение пеленга в виде [18]

$$\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=2}^M q_m^2 q_n^2 \sin(\varepsilon_{mn}) \frac{\partial \theta_{mn}}{\partial \beta} = 0, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{mn} = \varphi_{mn} + \theta_{mn}(\beta)$, $\varphi_{mn} = \varphi_m - \varphi_n$, $\theta_{mn} = \theta_m - \theta_n$.

Физический смысл уравнения (4) состоит в том, что искомым пеленг получают как результат взвешенного усреднения пеленгов, вычисляемых при обработке данных от каждой пары элементов антенны с учетом геометрического и энергетического весовых коэффициентов. Геометрические весовые коэффициенты отражают крутизну фазовой характеристики соответствующей пары элементов в окрестности ожидаемого значения угла, а энергетические при обработке данных увеличивают значимость каналов с большим отношением «сигнал–шум».

Дисперсия определения пеленга посредством многоэлементной антенны будет иметь следующий вид [18]:

$$\sigma_{\beta}^{-2} = \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=2}^M q_m^2 q_n^2 \cos(\varepsilon_{mn}) \left(\frac{\partial \theta_{mn}}{\partial \beta} \right)^2 \left(\sum_{m=1}^M q_m^2 \right)^{-1}. \quad (5)$$

Приведенное выражение служит для оценки потенциальной точности произвольных антенн, если источник навигационных сигналов находится в их плоскости. Для обработки данных необходимо иметь аналитическое или экспериментальное задание фазовой функции $\theta_m(\beta)$.

Наибольший интерес на практике представляет применение круговых антенн с M равномерно распределенными по окружности точечными элементами. Пеленг для такой антенны с волновым диаметром $2kb$ принято определять относительно линии, связывающей центр антенны и приемный элемент с номером 1. Компоненты фазовой функции, задающие распределение фазы на элементах по окружности антенны относительно ее центра в том случае, когда источник сигнала лежит в плоскости антенны, будут иметь вид:

$$\theta_m(\beta) = -kbc \cos \left[\frac{2\pi(m-1)}{M} - \beta \right]. \quad (6)$$

С учетом этих соотношений и обозначений $n_{mn} = n - m$, $s_{mn} = n + m - 2$ выражение для дисперсии (5) запишем как

$$\sigma_{\beta}^{-2} = (kb)^2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=2}^M q_m^2 q_n^2 \cos \left\{ \varphi_{mn} - 2kbs \sin \left(\frac{\pi n_{mn}}{M} \right) \sin \left(\frac{\pi s_{mn}}{M} - \beta \right) \right\} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi n_{mn}}{M} \right) \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi s_{mn}}{M} - \beta \right) \right] \right\} \left(\sum_{m=1}^M q_m^2 \right)^{-1}. \quad (7)$$

Полагая далее $q_m^2 = q_0^2$, получим потенциальную оценку точности круговой антенны в виде

$$\sigma_\beta^{-2} = (kb)^2 q_0^2 M. \quad (8)$$

Как следует из (8), погрешность не зависит от направления прихода сигнала и ориентации антенны. Кроме того, при неизменном размере базы и некоррелированной шумовой помехе в приемных каналах потенциальная точность увеличивается пропорционально квадратному корню из числа элементов антенны.

При обработке сигналов навигационного источника, не находящегося в плоскости антенны, размер измерительной базы в плоскости пеленгования уменьшается, и выражение (6) приобретает вид

$$\theta_m(\beta, \gamma) = -kb \cos \gamma \cos \left[\frac{2\pi(m-1)}{M} - \beta \right], \quad (9)$$

где γ – угол места.

Особенности применения широкополосных сигналов

Чтобы оценить потенциальную точность угловых измерений в многоканальных устройствах, достаточно рассматривать модели, использующие простые гармонические сигналы. Эти оценки в основном справедливы и для широкополосных сигналов, поскольку частотный диапазон последних определяется рабочей полосой излучающих навигационных антенн в окрестности резонансной частоты и ограничен. При применении широкополосных и сложных сигналов для решения задачи необходимо получить распределение времени прихода сигнала на апертуре приемной антенны и решить соответствующее уравнение пеленга.

Формально временные задержки сложного сигнала однозначно определяются на антенне любой конфигурации, но точное их измерение на ультракороткой измерительной базе (когда максимальная временная задержка сигнала соизмерима с периодом средней частоты навигационного сигнала) становится достаточно проблемным из-за ограничений по полосе рабочих частот антенны.

Например, сравним особенности фазового и временного описаний для расчета пеленга и потенциальной точности системы с многоэлементной круговой антенной для случая широкополосного навигационного сигнала. При условии что момент прихода сигнала в каждом канале определяется с одинаковой погрешностью σ_r , погрешность измерения пеленга по временным задержкам, очевидно, будет иметь вид

$$\sigma_\beta^{-1} = t_0 \sqrt{M} \sigma_r^{-1}, \quad (10)$$

где $2t_0 = 2\frac{b}{c}$ – максимальное время распространения сигнала между элементами антенны.

Оценим требования к аппаратуре измерения параметров такого сигнала, чтобы обеспечить погрешность вычисления пеленга не более $0,1^\circ$. Для определенности примем $M = 8$, $t_0 = 25$ мкс, тогда при прямой обработке широкополосного сигнала необходимо, чтобы погрешность измерения временных интервалов на апертуре антенны не превышала $\sigma_r \approx 0,15$ мкс. Поскольку потенциальная точность измерения

времени для широкополосного сигнала связана с его полосой и отношением «сигнал–шум» посредством $\sigma_t^{-1} = q\Delta F$, где ΔF – полоса сигнала, ясно, что при $q = 20$ дБ и $\Delta F = 5$ кГц погрешность измерений составляет $\sigma_t = 20$ мкс. Этого недостаточно для решения задачи. Для достижения установленной точности отношение «сигнал–шум» должно быть 60 дБ, что сложно реализовать на практике. В то же время для гармонического сигнала при таком отношении «сигнал–шум» погрешность измерения фазы – менее 6 град, что составляет основу для достаточно точного пеленгования при использовании многоэлементных антенн с увеличенной апертурой.

Сравнительный анализ потенциальной точности

Данные о потенциальной точности систем фазового пеленгования, а также результаты расчета случайной составляющей погрешности для ряда многоэлементных антенн приведены в табл. 2. Отношение «сигнал–шум» $q = 20$ дБ выбрано одинаковым. Рассмотрены антенны, в которых расстояние между элементами выбрано при однозначном определении пеленга, и разреженные антенны.

Таблица 2

Оценки потенциальной точности для ряда круговых антенн при $q = 20$ дБ

Вид приемной системы	1	2	3	4	5	
Расстояние между элементами, λ	0,5	0,5	0,5	0,5	3,0	1,0
Диаметр, λ	0,5	0,5	1,31	5,74	6,90	2,30
Число каналов	2	4	8	36	7	7
Потенциальная точность, град	1,80	1,30	0,51	0,05	0,10	0,29
Фазовая неоднозначность	нет	нет	нет	нет	есть	есть

В таблице введены следующие обозначения: 1 – двухэлементный приемник; 2 – четырехэлементный приемник, состоящий из двух ортогональных пар; 3 – восемь элементов на круговой базе; 4 – плоская заполненная круговая база с 36 приемниками, равномерно размещенными по окружности; 5 – плоская круговая база с 7 приемниками, равномерно размещенными по окружности (разреженная антенна).

Рост объема избыточной информации, который присущ многоканальным системам, с одновременным увеличением общего размера измерительной базы ведет к повышению потенциальной точности системы. Так, для круговой антенны с числом элементов $M = 36$ оценка погрешности составляет $\sigma_\beta \approx 0,05^\circ$. Высокая точность может быть достигнута и при применении разреженных антенн, т.е. имеющих небольшое число элементов, размещенных на круговой базе большого волнового размера [19]. Чтобы в этом случае устранить фазовую неоднозначность, требуется выбрать сектор углов, в котором определяется пеленг. Для этого процедура обработки информации может быть дополнена, например, предварительным фазированием приемной антенны на источник сигнала.

Очевидно, что при применении многоэлементных антенн для достижения высокой точности угловых измерений наиболее перспективны статистические методы обработки сигналов. Оценка искомого параметра при этом производится в виде

некой оптимальной процедуры, при которой измеренное фазовое распределение на апертуре антенны аппроксимируется ее фазовой функцией. При этом следует отметить, что выражения (5), (7), приведенные для расчета случайной составляющей оценки точности угловых измерений различных антенн, получены при их представлении в виде геометрических фигур правильной формы, составленных из дискретных точек-гидрофонов. Такое идеальное описание антенны позволяет сделать ряд важных выводов, определяющих структуру и параметры всей навигационной системы: конфигурацию антенны, необходимое число каналов обработки, размещение элементов и необходимость устранения фазовой неоднозначности при работе с простыми сигналами. В реальных конструкциях аналитическое описание становится неточным и его необходимо уточнять экспериментально при градуировке антенны. В связи с этим можно заключить, что для получения высокого углового разрешения необходима прецизионная градуировка антенны [20].

Оценка точности угловых измерений в ГАНС УКБ

Оценка и учет систематической составляющей погрешности угловых измерений

Как уже отмечалось, точность угловых измерений обусловлена в основном характеристиками антенны. С одной стороны, антенна выполняет пространственную обработку, связывая структуру принимаемого навигационного сигнала на апертуре с угловым положением источника. Дисперсия определения пеленга, заданная выражением (5), формирует случайную составляющую погрешности и влияет на потенциальную точность навигационной системы. С другой стороны, антенна является основным звеном в аппаратуре измерения параметров принимаемого акустического сигнала. Погрешность измерения фазы акустического сигнала в каждом приемном канале имеет технологический характер – зависит от степени идентичности фазочастотных характеристик гидрофонов, дифракционных искажений сигнала на конструкции конкретной антенны, обтекателя, размера и акустического импеданса приемных элементов, паразитного акустического взаимодействия элементов конструкции, точности датчиков текущей угловой ориентации антенны (курса, крена, дифферента). Эти погрешности измерения фазы ведут к тому, что использование аналитических соотношений для формирования значений фазовой функции реальной антенны приводит к появлению систематической погрешности. Наиболее трудной оказывается оценка дифракционных искажений фазовой функции, которая может проводиться только при градуировке антенны.

Для подтверждения сделанных выше заключений были проведены исследования разреженной антенны с осесимметричным размещением семи отдельных сферических гидрофонов на круговой базе. Антенна была предназначена для навигационной системы с рабочей частотой 12 кГц. Волновой диаметр измерительной базы составлял около двух длин волн. В качестве приемников для сохранения высокой чувствительности применялись сферические гидрофоны с волновым диаметром $\lambda/6$. Измерения проводились с использованием радиоимпульсных сигналов длительностью 10 мс при размещении источника в плоскости антенны. В лабораторных условиях на частоте 12 кГц были определены фазовые характеристики антенны между всеми возможными парами гидрофонов.

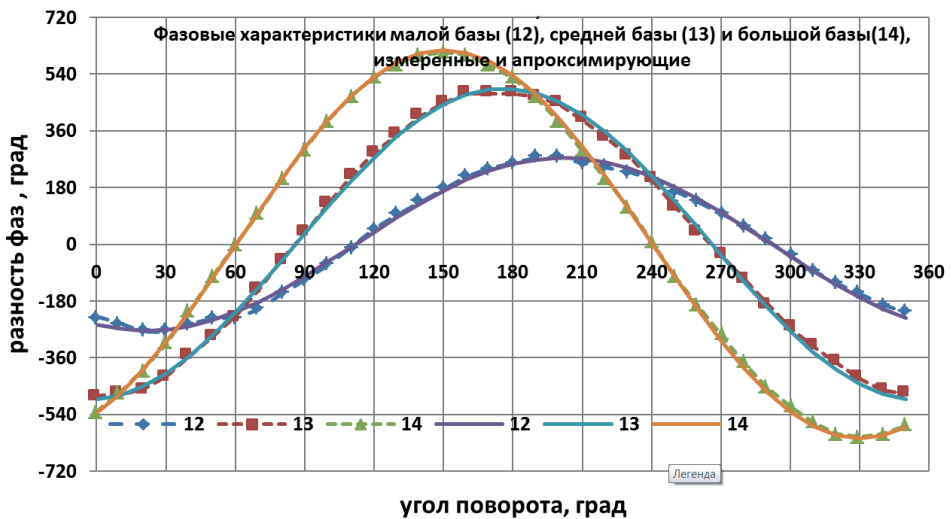
Общее число таких измерительных баз составляет 21. Их можно разделить в соответствии с размером на семь малых, семь средних и семь больших. На рис. 1, а представлены примеры измеренных фазовых характеристик для измерительных баз разного размера между элементами с номерами 1, 2, 3, 4.

Далее была выполнена аппроксимация (сплошные линии на рис. 1, а, значения в градусах) экспериментальных данных для больших, средних и малых баз соответственно аналитическими зависимостями вида

$$\begin{aligned} \theta_b(\beta) &= A_0 \sin \frac{4\pi}{7} \sin \left(\frac{4\pi}{7} - \beta \right), \theta_l(\beta) = A_0 \sin \frac{2\pi}{7} \sin \left(\frac{2\pi}{7} - \beta \right), \\ \theta_s(\beta) &= A_0 \sin \frac{\pi}{7} \sin \left(\frac{\pi}{7} - \beta \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Наибольшие дифракционные искажения измеренных фазовых характеристик (штриховые линии на рис. 1, а) наблюдаются, если объект пеленгования расположен на линии соответствующей измерительной базы, причем абсолютное их значение для измерительных баз разного размера было примерно одинаковым (рис. 1, б). Как видно из рисунка, увеличение межэлементного расстояния (разрежение) обеспечило формирование более широких угловых секторов приема сигналов, в которых дифракционные искажения были минимальными. Кроме того, для больших измерительных баз уменьшается отношение невязки измеренных и аппроксимирующих значений к размеру базы, что ведет к уменьшению погрешности угловых измерений.

а)



б)

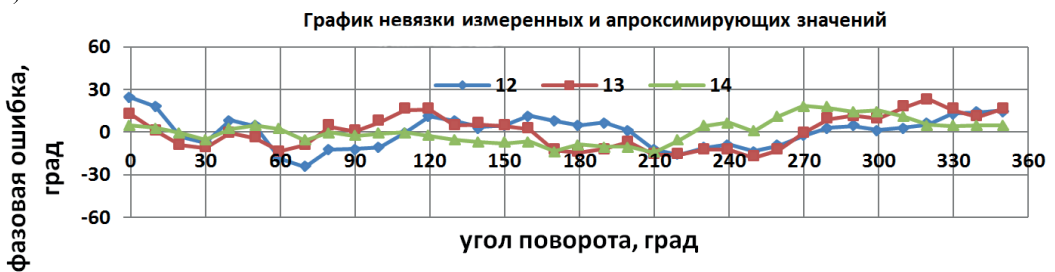


Рис. 1. Фазовые характеристики семиэлементной антенны

В выражении (11) при заданных частоте и диаметре антенны, а также измеренной скорости звука в месте проведения работ c_0 амплитуда имела значение $A_0 = 652^\circ$. При применении антенны в рабочих условиях амплитуду в зависимостях (11) необходимо откорректировать с учетом значения скорости звука c_1 на глубине размещения антенны $A_1 = A_0 \frac{c_0}{c_1}$.

В исследованной семиэлементной антенне при вычислении пеленга в соответствии с уравнением (4) формируется 21 слагаемое по числу всех возможных измерительных баз. Характерной особенностью уравнения пеленга является использование для различных измерительных баз весовых геометрических коэффициентов, отражающих крутизну фазовой характеристики соответствующей базы в окрестности ожидаемого значения пеленга. Фактически это означает, что при пеленговании максимальную значимость приобретают измерительные базы, ориентированные ортогонально направлению прихода сигнала. Это ведет к существенному ослаблению влияния дифракционных искажений и позволяет рассчитывать на уменьшение неучтенной систематической погрешности при заданном аналитическом описании фазовой функции.

Оценки суммарной погрешности угловых измерений в условиях практического применения навигационной системы

Для ГАНС УКБ, поддерживающей навигацию подводного робота, точность угловых измерений можно оценить без привлечения дополнительных навигационных средств, с помощью некоторых аналитических соотношений, связывающих текущие угловые измерения и дальномерные данные применяемых навигационных средств. При этом дальномерные измерения должны выполняться с высокой точностью. Как минимум относительная погрешность этих измерений не должна превышать 0,1%. При выполнении таких работ в условиях глубокого моря необходимо также учитывать движение обеспечивающего судна, на котором установлена приемная аппаратура навигационной системы. Как правило, в глубоком море АНПА начинает миссию с балластного погружения из точки, координаты которой точно определены средствами судовой навигации. АНПА при балластном погружении обычно заглубляется по винтовой траектории небольшого радиуса относительно вертикальной оси. Ориентировочные параметры траектории погружения (текущая глубина, период и радиус витков, курс) можно считать известными в системе единого времени по данным бортовой навигационной системы.

Приведем пример обработки полученных экспериментальных данных, которые накапливались в течение полутора часов в ходе одного из глубоководных пусков АНПА при глубине моря около 3000 м. За время пуска АНПА совершил погружение под балластом на глубину 2000 м, где выполнил ход и зависание.

В ГАНС УКБ была применена рассмотренная ранее разреженная семиэлементная круговая антенна, с борта судна выставленная на большую глубину, чем залегает ось подводного звукового канала. Навигационный сигнал состоял из двух фрагментов. Первый использовался для измерения дальности и синхронизации второго фрагмента длительностью 20 мс, по которому с квадратурного приемника определялись параметры сигнала (амплитуды, фазы, отношения «сигнал–шум») на апертуре антенны.

Ось времени на приведенных ниже рис. 2–8 обозначена номером навигационного такта i с периодом 30 с. Общее число тактов в эксперименте составило 70, а за время

погружения – 46. На рис. 2, а–д приведены данные наклонной дальности D_i , пеленга β_i и угла места γ_i , полученные ГАНС УКБ, а также расчетные значения глубины $H_i = D_i \sin \gamma_i$ и горизонтальной дальности $R_i = D_i \cos \gamma_i$ объекта навигации от обеспечивающего судна.

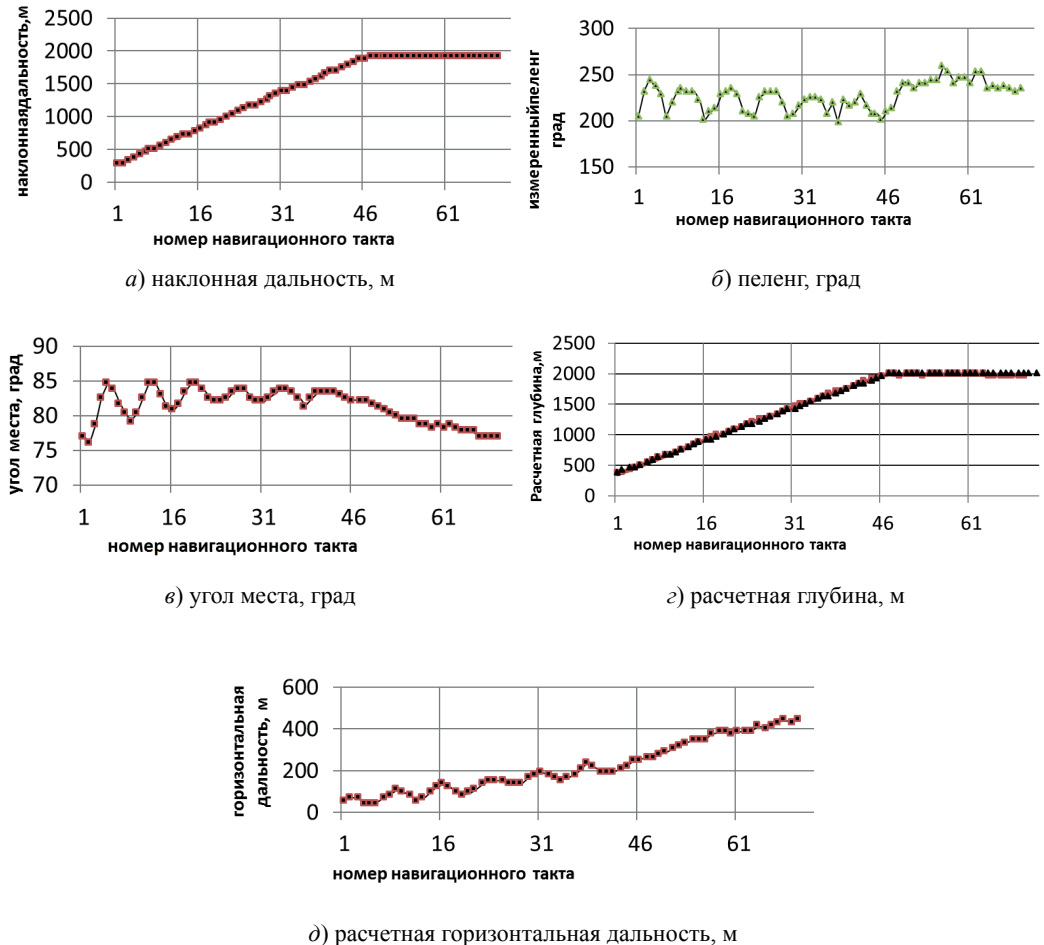


Рис. 2. Данные работы ГАНС УКБ с АНПА в глубоком море

Сначала дадим оценку точности дальномерных измерений. Необходимую для этого информацию можно получить из анализа изменений наклонной дальности за навигационный такт $\Delta D_i = D_{i+1} - D_i$, которая определяется изменениями глубины $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$ и горизонтальной дальности ΔR_i . Последняя состоит из дальности точки положения вертикальной оси заглубления с учетом дрейфа судна d и текущего положения объекта в винтовой зоне заглубления с радиусом r_0 . Тогда получим:

$$\Delta D_i \approx \Delta H_i + \frac{R_i}{D_i} \Delta R_i,$$

где $\Delta R_i \approx d + 2r_0 \sin \frac{\delta_0}{2} \sin \left[\frac{\delta_0}{2} \left(\frac{2i+1}{2} \right) \right]$ – на этапе погружения ($i = 1-46$) и $\Delta R_i \approx d$ – при зависании ($i = 50-70$).

Значения глубины с высокой точностью известны по измерениям глубиномера. Кроме того, $\Delta H_i \approx 35$ м – вертикальное перемещение АНПА за такт и $d \approx 4,5$ м – дрейф судна за навигационный такт, $r_0 = 25$ м и $\delta_0 = \frac{2\pi N}{70}$ – параметры линии погружения, где $N = 6$ – число периодов за время погружения. На рис. 3 приведены изменения глубины по данным датчика глубины бортовой навигационной системы АНПА и приращения наклонной дальности по данным ГАНС УКБ. Приращение наклонной дальности, как видно из рисунка, соответствует расчетным значениям по модели движения. Для оценки абсолютной погрешности измерения дальности используется параметр $\Delta^2 D_i = \Delta D_{i+1} - \Delta D_i$, определяющий изменение приращения за навигационный такт. Значения этого параметра во время зависания АНПА (для $i = 49-70$) фактически определяют случайную составляющую погрешности измерения дальности и приведены на рис. 4.



Рис. 3. Приращение наклонной дальности по данным ГАНС УКБ (красная линия) и изменение глубины по данным датчика глубины АНПА (черная линия), м



Рис. 4. Изменение приращения наклонной дальности по данным ГАНС УКБ при зависании АНПА (м)

Погрешность измерения дальности составила около 2 м при наклонной дальности около 2000 м.

Рассмотрим более подробно оценки точности определения угла места. При решении уравнения пеленга фазовая функция задавалась в виде (9), где значения угла места фигурировали в качестве параметра. Важно, что на погрешность определения угла места не влияет погрешность датчика курса. Если приемная антенна достаточно точно выставлена относительно вертикальной оси, то результаты этих угловых измерений определяются только параметрами акустического сигнала. Стоит отметить, что величина угла места, измеряемая при балластном погружении АНПА, составляла около 80-85 град. Поскольку точность измерения угла пропорциональна эффективному раскрытию приемной антенны

$$\sigma_\gamma^{-1} = kbq\sqrt{M} \sin\gamma_i, \quad (11)$$

то при измерении углов в вертикальной плоскости на этапе погружения достигается точность, близкая к потенциальной при действующем отношении «сигнал–шум» ($q = 30$ дБ) и равная, как следует из (11), примерно 0,1.

На рис. 5 приведены значения угла места, измеренные ГАНС УКБ, которые сравниваются с расчетными по данным датчика глубины и наклонной дальности, а на рис. 6 – изменения угла места, рассчитанные через приращения на такте величин наклонной дальности и угла:

$$\Delta\gamma_i \approx \frac{\Delta D_i - \Delta H_i}{H_i \cos\gamma_i}.$$

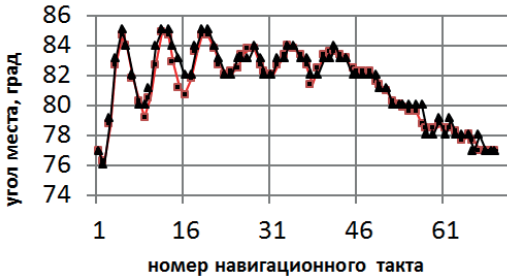


Рис. 5. Угол места, измеренный (черная линия) и рассчитанный по данным датчика глубины и наклонной дальности (красная линия), град



Рис. 6. Изменение угла места за навигационный такт, град

Необходимо заметить, что АНПА при заглублении по винтовой траектории совершает около 6 витков, в течение каждого из них ГАНС УКБ получает в среднем 7 наблюдений с интервалом 30 с. Наблюдаемое изменение угла места за виток, например на глубине около 1200 м, составляет около 3 град. Эта величина формируется за 210 с по семи измерениям угла места. При этом очевидно, что использование наблюдений не дает возможности получить точность более 0,4-0,5 град. Тем не менее изменение угла места, представленное на рис. 6 в виде затухающей гармонической кривой, подтверждает возможность достижения точности на уровне 0,1 град. На рис. 7, 8 показаны оценки точности измерений пеленга. При угле места около 80-85 град эффективный размер приемной антенны в горизонтальной плоскости резко уменьшается, в связи с чем потенциальная точность определения пеленга будет пропорциональна $\cos\gamma_i$, а именно

$$\sigma_{\beta}^{-1} = kbq\sqrt{M} \cos\gamma_i,$$

и составлять при имеющемся отношении «сигнал–шум» около 1 град. На рис. 7 приведены значения изменений горизонтальной дальности, которые можно получить с использованием изменений угла места и сравнить их с известным радиусом витка при заглублении $r_0 = 25$ м. Далее с учетом известных горизонтальной дальности и изменения положения АНПА в горизонтальной плоскости можно оценить значения пеленга. Расчеты и экспериментально полученные данные приведены на рис. 8.

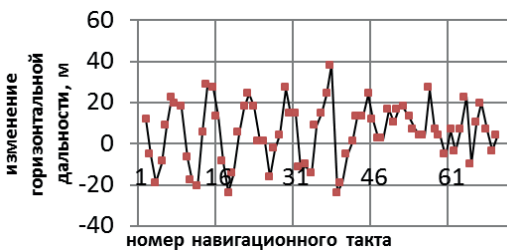


Рис. 7. Изменение горизонтальной дальности, м

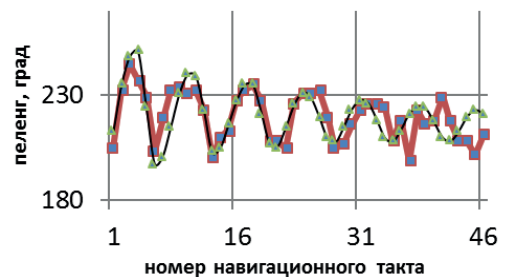


Рис. 8. Пеленг по ГАНС УКБ (красная линия) и расчет пеленга через горизонтальную дальность и положение объекта на горизонтальной проекции по модели заглубления по винтовой траектории (черная линия), град

Совпадение этих данных также подтверждает высокую точность угловых измерений. Таким образом, привлечение данных судовой навигации и бортовых навигационных средств АНПА может эффективно использоваться для оценки точности ГАНС УКБ, поддерживающей работу подводного робота.

Подводя итоги раздела, отметим, что учет систематической составляющей погрешности за счет градуировки антенны и минимизация случайной составляющей благодаря выбору конфигурации антенны и примененной модели обработки данных обеспечили высокую точность разработанной ГАНС УКБ. Для дальномерных измерений относительная погрешность составила десятые доли процента, а для угломерных – десятые доли градуса.

Выводы

Результаты натурального эксперимента показали, что при применении круговых осесимметричных антенн с небольшим числом элементов, фазовые характеристики которых определены в контролируемых условиях, и использовании статистических методов обработки сигналов возможна реализация ГАНС УКБ с высокой точностью угловых измерений.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда
№ 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/>.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Romeo, J., Lester, G.**, Navigation is Key to AUV Missions, *Sea Technology*, 2001, vol. 42, no. 12, pp. 24–29.
2. **Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.** Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: ФГБУН «Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН», 2018. 368 с.
3. **Kebkal, K.G., Kebkal, O.G., Bannash, R., Yakovlev, S.G.**, Performance of Combined USBL Positioning and Communication System Using S2C Technology, *Proceeding of the OCTANS 2012 IEEE Yeosu Conference and Exhibition*, Korea, 2012.
4. **Кебкал К.Г., Машошин А.И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гироскопия и навигация*. 2016. № 3 (94). С. 115–130.
5. **Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В., Каморный А.В.** Градуировка навигационных средств подводных роботов // *Подводные исследования и робототехника*. 2015. № 1(19). С. 16–23.
6. **Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.** Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева; отв. ред. Л.В. Киселев. Москва: Наука, 2005. 398 с.
7. **Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.** Навигационный комплекс автономного подводного робота и особенности его применения в условиях Арктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2008. № 1(5). С. 24–31.
8. **Inzartsev, A.V., Kiseljev, L.V., Matviyenko, Yu.V. et al.**, Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 107–112.
9. **Милн П.Х.** Гидроакустические системы позиционирования. Л.: Судостроение, 1989. 316 с.
10. **Watson, M., Loggins, C., and Ochi, Y.T.**, A New High Accuracy Super Short Base Line (SSBL) System, *Underwater Technology*, Tokyo, Japan, 1998, pp. 210–215.
11. **Zielinski, A., Zhou, L.**, Precision acoustic navigation for remotely operated vehicles (ROV), *Gdansk, Polskie Towarzystwo Akustyczne, Hydroacoustics*, 2005, vol. 8, pp. 255–264.
12. **URL:** <https://www.sonardyne.com/products/ranger-2-subsea-positioning-usbl/> (дата обращения 12.04.2023).
13. **Posidonia 6000.** Underwater acoustic positioning system. URL: www.ixsea-oceano.com (дата обращения 10.02.2023).

14. Системы подводного позиционирования USBL. URL: <https://evologics.de/usbl> (дата обращения 10.02.2023).
15. www.kongsberg.com/ru/maritime/products/Acoustics-Positioning-and-Communication (дата обращения 08.12.2022).
16. Luo Q, Yan X, Ju C, Chen Y, Luo Z. An Ultra-Short Baseline Underwater Positioning System with Kalman Filtering. *Sensors* (Basel). 2020 Dec 28;21(1):143, doi: 10.3390/s21010143. PMID: 33379311; PMCID: PMC7796008.
17. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
18. Матвиенко Ю.В. Навигация подводного робота. Гидроакустические системы с ультракороткой базой. Саарбрюкен, 2013. 199 с.
19. Матвиенко Ю.В., Макаров В.Н., Кулинченко С.И., Нургалиев Р.Ф., Рылов Р.Н., Касаткин Б.А. Пеленгатор гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой. Патент РФ №2179730. Бюл. изобр. №5, 2002.
20. Douglas, B. and Pietsch, R., Optimal Beamforming Techniques for Imperfectly Calibrated Arrays, *Proceeding of Ocean – 96*.

Matvienko, Yu.V. (Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia)

Estimation of the Practically Attainable Accuracy of Modern Ultrashort Baseline Acoustic Positioning Systems for Underwater Robots, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 2 (121), pp. 106–120.

Abstract. A method for designing acoustic positioning systems with ultrashort baseline (USBL APS) for underwater robots is proposed. The possibility of their application for navigation support of underwater robots is shown. Estimation of the antennas and navigation signals used to determine their potential accuracy is presented. It is noted that high accuracy of angle measurements is attainable in the case of sparse antenna arrays. A mathematical model for calculation of the random error component for various multielement antennas is described. The sources of systematic errors in real antennas are analyzed. The procedures and techniques for calibration of the USBL APS accuracy based on accurate range measurement, as well as on the data of the onboard navigation system of an underwater robot and ship navigation equipment are discussed. An example of processing real data obtained during the system operation in deep sea is given. A conclusion is made about the feasibility of designing high-accurate USBL APS using circular axisymmetric antennas with a small number of elements and statistical methods of signal processing.

Key words: autonomous underwater vehicle, acoustic positioning system, direction finding of navigation signals, random and systematic errors in angle measurements with a small-sized antenna, experimental estimates of USBL acoustic positioning system accuracy.

Материал поступил 04.05.2023