

УДК 551.46.077:629584:681.88
EDN ZSDTXG

Ю. В. МАТВИЕНКО

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗОЙ

Рассмотрено использование многочастотных сигналов в гидроакустических навигационных системах с ультракороткой измерительной базой. Анализируется прием навигационного сигнала круговой антенной с линейными размерами, равными нескольким длинам волн средней частоты сигнала. Предложена модель измерения временных задержек элементами антенны на основе определения полных фаз на каждой частоте многочастотного сигнала. Показана возможность увеличения точности измерений углового положения объекта навигации.

Ключевые слова: гидроакустическая навигация, системы с ультракороткой базой, сложные сигналы, выделение полной фазы.

Введение

В гидроакустических навигационных системах с ультракороткой базой (ГАНС УКБ) объект навигации обычно излучает навигационный импульсный сигнал заданной частоты и длительности, а для определения пеленга необходимо найти амплитудно-фазовое распределение сигнала на апертуре приемной антенны и решить уравнение пеленга [1–3]. Повышение точности этих систем основано на увеличении измерительной базы антенны. При ограниченном числе элементов антенны и каналов обработки возникает проблема неоднозначности фазовых измерений на антенне с расстоянием между элементами более $\lambda/2$ (λ – длина волны навигационной частоты). Для ее устранения обычно используют дополнительные данные о секторе обзора, получаемые с применением двухшкальных измерительных баз [4–6], или формируют характеристики направленности антенны, скомпенсированной в направлении объекта [7].

Исследования повышения точности ГАНС УКБ в основном направлены на обоснование структуры приемных антенн и методов обработки сигналов. Анализ этих публикаций приводится, например, в работе [8].

В публикациях [9–13] при широкополосном навигационном сигнале пеленг определяется через измеряемые временные задержки сигнала на апертуре антенны. Формально эти величины однозначно устанавливаются на антенне любой конфигурации, но точное их измерение на ультракороткой базе (когда максимальная временная задержка сигнала соизмерима с периодом средней частоты широкополосного сигнала) достаточно сложно.

При применении широкополосного сигнала можно повысить точность, значительно увеличив габариты антенны: так, если максимальное время измеряемой за-

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

держки равно нескольким десяткам периодов средней частоты сигнала, то на рабочей частоте 12 кГц линейный размер антенны в несколько десятков длин волн будет составлять несколько метров, что резко ограничивает ее применение, например с борта обеспечивающего судна.

Точность можно также повысить путем уменьшения погрешности измерения временных задержек сигнала на апертуре антенны при значительном увеличении полосы сигнала ΔF и отношения «сигнал – шум» q , поскольку потенциальная среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения времени для широкополосного сигнала определяется условием $\sigma_t^{-1} = q\Delta F$ [14]. Серьезным препятствием к росту точности является то, что гидроакустические антенны, излучающие навигационные сигналы, эффективно работают только в окрестностях своей резонансной частоты, и полоса рабочих частот обычно не превышает 20–30% от резонансной: например, на частоте 12 кГц полоса составляет $\Delta F = 3\text{--}4$ кГц. Для широкополосного сигнала с полосой 4 кГц СКП измерений временных задержек в канале антенны по максимуму корреляционных функций будет определяться отношением «сигнал – шум» на выходе коррелятора q и составит $\sigma_t = 25$ мкс при $q = 10$.

При такой погрешности измерений времени, например, для 7-элементной антенны со средней частотой навигационного сигнала 12 кГц и диаметром две длины волны СКП вычисления пеленга

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_t}{T_0} \frac{1}{2\pi\sqrt{7}}$$

равна примерно 2° , где T_0 – период частоты 12 кГц. Для гармонического одночастотного сигнала при таком отношении «сигнал – шум» СКП измерения фазы $\sigma_\phi^{-1} = q$ составит менее 6° , что достаточно для точного пеленгования [15].

Цель настоящей статьи – разработка модели определения временных задержек навигационного сигнала на апертуре малогабаритной антенны ГАНС УКБ путем измерения полных фаз всех частот многочастотного сигнала с использованием алгоритмов устранения фазовой неоднозначности и оценкой потенциальной точности системы.

Статья состоит из двух разделов. В первом описана модель приема многочастотного навигационного сигнала круговой антенной с линейными размерами, равными нескольким длинам волн средней частоты сигнала, предназначенная для установления углового положения объекта навигации по временным задержкам сигнала на основе определения полных фаз для каждой частоты многочастотного сигнала. Во втором разделе на основе лабораторных экспериментов рассмотрено создание системы с УКБ при использовании антенны с небольшим числом элементов и увеличенным размером измерительной базы, повышающей точность измерений углового положения объекта.

1. Модель обработки данных

Система включает источник навигационных сигналов, размещенный на борту объекта навигации, а в точке с известными координатами – приемник этих сигналов, объединенных общей системой единого времени. Приемник содержит N -элементную круговую антенну. В качестве гидроакустического навигационного сигнала используется широкополосный многочастотный сигнал с числом частотных составляющих I , сосредоточенных в рабочей полосе пропускания антенны источника. Рассматривается

задача пеленгования для случая, когда источник и приемник находятся в одной плоскости. Это характерно для работы в условиях мелкого моря при размещении источника на борту объекта навигации, а приемника – на борту обеспечивающего судна.

Если радиус измерительной базы антенны равен b , а скорость звука в среде – c , то у плоской круговой антенны с равномерно размещенными по окружности приемными элементами (рис. 1) ожидаемые временные задержки фронта плоской волны на элементах относительно фазового центра антенны определяются соотношением

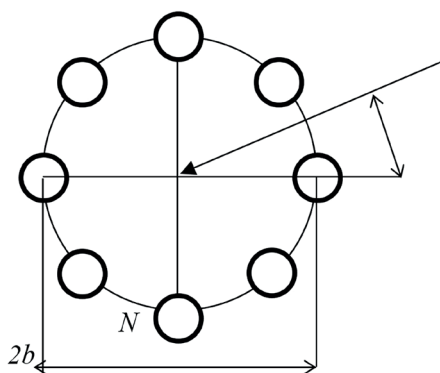


Рис. 1. Антенна пеленгатора

$$\tau_n(\beta) = -t_0 \cos \left[\frac{2\pi}{N}(n-1) - \beta \right], \quad (1)$$

где $n = 1, 2, \dots, N$ – номер элемента в антенне; β – искомый пеленг; $t_0 = \frac{b}{c}$, $2t_0$ – максимальное время распространения сигнала между элементами антенны.

Уравнение пеленга можно получить статистической обработкой избыточных данных по минимуму дисперсии измеренных временных задержек t_n на апертуре антенны и характеристик антенны $\tau_n(\beta)$. Последняя представляет распределение ожидаемых временных задержек в виде функции углового положения объекта, заданной выражением (1):

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^N (t_{nk}^2 - \tau_{nk}^2) = \min. \quad (2)$$

Ожидаемые задержки $\tau_n(\beta)$ можно определить при градуировке антенны и задать аналитически в виде (1) путем аппроксимации результатов градуировки.

Выражение (2) приводится к виду

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^N \frac{1}{t_0} (t_{nk} - \tau_{nk}) \sin \left[\frac{2\pi}{N}(n-1) - \beta \right] = 0, \quad (3)$$

где $t_{nk} = t_n - t_k$; $\tau_{nk} = \tau_n - \tau_k$; t_n – измеренная временная задержка прихода сигнала на n -й элемент антенны относительно ее фазового центра.

Перепишем уравнение (3) через измеряемые полные фазовые сдвиги $\varphi_n(i)$ для каждой i -й частоты широкополосного сигнала:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=2}^N [\varphi_{nk}(i) - \theta_{nk}(i)] \sin \left[\frac{2\pi}{N}(n-1) - \beta \right] = 0, \quad (4)$$

где $\varphi_{nk}(i) = \varphi_n(i) - \varphi_k(i)$, $\varphi_n(i)$ – полная фаза сигнала на n -м элементе круговой антенны относительно ее фазового центра, измеренная на частоте i ; $\theta_{nk}(i) = \theta_n(i) - \theta_k(i)$ – характеристика антенны, устанавливающая зависимость разности полных фаз между элементами антенны от направления прихода сигнала (определяется при градуировке антенны и представляется далее аналитической аппроксимацией).

Для применения уравнения (4) необходимо определить полную фазу в каждом из N каналов антенны на каждой частотной составляющей навигационного сигнала. Ее можно записать в виде

$$\varphi_n(i) = \frac{2\pi}{T_i} t_n = \vartheta_n(i) \pm m_i \cdot 2\pi, \quad (5)$$

где $\vartheta_n(i)$ – дробная (измеряемая) часть фазы i -й частоты в n -м канале антенны; T_i – период i -й частоты; $m_i = 0, 1, 2 \dots m_{i, \max}$ – число неизвестных полных периодов i -й частоты, добавляемых ко времени, измеренному по значению дробной фазы; $m_{i, \max} \leq b / cT_i$ – максимальное число периодов i -й частоты на апертуре антенны.

Временную задержку t_n сигнала в n -м канале антенны представим в виде суммы времени, соответствующей значению дробной фазы и целому числу периодов рассматриваемой частоты:

$$t_n = \frac{\vartheta_n(i)}{2\pi} T_i \pm m_i T_i. \quad (6)$$

Число целых периодов на каждой частоте подлежит определению. Для этого необходимо:

- 1) рассчитать для каждой частоты ряд возможных значений полной фазы сигнала в канале антенны с учетом ограничений, налагаемых размером антенны;
- 2) нормировать значения на соответствующую частоту;
- 3) получить ряд возможных временных задержек по каждой частоте;
- 4) сравнить их на всех частотах и выбрать искомую временную задержку в каждом канале антенны из условия равенства всех ожидаемых задержек.

Максимальная плотность распределения временных задержек по сформированным частотным рядам отвечает искомым однозначно определяемым задержкам сигнала на апертуре антенны.

В результате для каждой частоты образуется ряд из $2m_{i, \max} + 1$ временных задержек сигнала вида

$$\left\{ \frac{\vartheta_n(i)}{2\pi} T_i \pm m_i T_i \right\}$$

для $m_i < m_{i, \max}$, состоящий из всех возможных задержек в пределах апертуры антенны.

Далее сравниваются ряды на всех частотах. Поскольку везде измеряется одно и то же время, из рядов выбирают по одному значению. Они составляют новый ряд с минимальной дисперсией, по которому устанавливают величину m_i . Условие формирования этого ряда:

$$\varphi_n(i) = \varphi_n(0) \frac{f_i}{f_0}, \quad (7)$$

где f_0 – средняя частота; $\varphi_n(0)$ – фаза на ней.

Затем из (5) определяются полные фазы, а из (6) – искомое время задержки t_n .

Такой алгоритм помогает обрабатывать многочастотную фазовую информацию для определения полных фаз в элементах антенны и (после нормирования на соответствующую частоту) измерения временных задержек сигнала с минимальной погрешностью, равной погрешности измерения дробной фазы.

Покажем применение алгоритма на простом примере. Пусть антенна состоит из двух элементов, тогда полная разность фаз на i -й частоте имеет вид

$$\varphi_{21}(i) = 4\pi \frac{b}{\lambda_0} \frac{f_i}{f_0} \cos \beta = \vartheta_{21}(i) \pm m_i \cdot 2\pi.$$

Зададим $\beta = 10^\circ$ и рассчитаем ряды возможных полных фаз на различных частотах. Пусть сигнал содержит 10 равномерно распределенных частот в диапазоне $(0,8-1,25)f_0$ с шагом $0,05f_0$, а размер базы составляет 1 или 3 длины волны частоты f_0 . Результаты расчетов приведены в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1

Определение полной фазы на антенне размером $2b = \lambda_0$

Частота f_0	φ_{21}°	$\vartheta_{21}, m_i = 0^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = -1^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 1^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 2^\circ$	Временная задержка $\cdot T_0$
0,80	284	-76	-436	284	644	0,986
0,85	301	-59	-419	301	661	0,986
0,90	319	-41	-401	319	679	0,986
0,95	337	-23	-383	337	697	0,986
1,00	355	-5	-365	355	715	0,986
1,05	372	12	-348	372	732	0,986
1,10	390	30	-330	390	750	0,986
1,15	408	48	-312	408	768	0,986
1,20	425	65	-295	425	785	0,986
1,25	443	83	-277	443	803	0,986

Т а б л и ц а 2

Определение полной фазы на антенне размером $2b = 3\lambda_0$

Частота f_0	φ_{21}°	$\vartheta_{21}, m_i = 0^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 1^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 2^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 3^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = 4^\circ$	$\varphi_{21}, m_i = -1^\circ$	Временная задержка $\cdot T_0$
0,80	851	131	491	851	1211	1571	-229	2,956
0,85	904	-176	184	544	904	1264	-536	2,956
0,90	957	-123	237	597	957	1317	-483	2,956
0,95	1010	-70	290	650	1010	1370	-430	2,956
1,00	1064	-16	344	704	1064	1424	-376	2,956
1,05	1117	37	397	757	1117	1477	-323	2,956
1,10	1170	90	450	810	1170	1530	-270	2,956
1,15	1223	143	503	863	1223	1583	-217	2,956
1,20	1276	-164	196	556	916	1276	-524	2,956
1,25	1329	-111	249	609	969	1329	-471	2,956

На базе небольшого волнового размера (см. табл. 1) полная фаза (выделена желтым цветом) определяется для всех частот при одном m_i (голубой цвет). Для увеличенной базы (см. табл. 2) необходимо выбрать фазовые значения из рядов с различными m_i

при учете условия (7). По этим величинам полной фазы на всех частотах находим одно и то же время (зеленый цвет), используемое при решении уравнения (3). Однако при прямом использовании (3) усложняются градуировка антенны и определение функций $\tau_n(\beta)$. Более простой способ – это градуировка по фазовым характеристикам $\theta_n(i)$.

Выражение (4) задает I уравнений для нахождения пеленга. Отметим важные особенности этого алгоритма. Применение сигнала с числом частотных составляющих I , сосредоточенных в рабочей полосе пропускания антенны источника, увеличивает энергию сигнала пропорционально числу частотных составляющих и при обработке данных повышает точность угловых измерений. Расчет дробной фазы $\vartheta_n(i)$, выявляющей полную фазу с точностью до целого числа длин волн на каждой частотной составляющей сигнала в каждом из N каналов, расширяет объем данных для расчета угловых характеристик и фактически устанавливает точность определения временных задержек на апертуре антенны. При таком подходе к измерению времени на апертуре антенны временные задержки находят по данным фазовых измерений с минимальной погрешностью, равной погрешности измерения дробной фазы.

В описанной модели определение пеленга – это результат взвешенного усреднения пеленгов по временным задержкам для всех возможных пар элементов антенны с учетом геометрических весовых коэффициентов, которые отражают крутизну характеристик времен прихода сигнала на соответствующие пары элементов в окрестности ожидаемого значения угла, определяемые при градуировке антенны.

СКП пеленгования $\sigma_{\beta t}$ по измеряемым временным задержкам при расчете момента прихода сигнала в каждом канале с одинаковой СКП σ_t имеет вид

$$\sigma_{\beta t} = \frac{\sigma_t}{t_0 \sqrt{N}} = \frac{1}{t_0 q \Delta F \sqrt{N}}$$

и уточняется при использовании полных фаз сигнала на каждой частоте. Если фаза сигнала в каналах определяется с СКП $\sigma_\varphi = 1/q$, то для многочастотного сигнала при независимой обработке отдельных частотных дискрет СКП пеленгования можно представить в виде

$$\sigma_{\beta \omega} \approx \frac{\lambda_0}{2\pi b q \sqrt{NI}},$$

где λ_0 – длина волны на средней частоте. В этом случае точность пеленгования возрастает с увеличением числа частот в сигнале.

Таким образом, в предложенной системе обеспечивается высокая точность расчета углового положения путем применения антенны с минимумом приемных элементов, размещенных с большим шагом на круговой базе, и использования данных распределения временных задержек сигнала на апертуре антенны. Например, для 7-элементной антенны с диаметром в 4 длины волны на средней частоте 12 кГц (около 50 см) и полосе 4 кГц при длительности сигнала 10 мс, числе частотных составляющих $I = 20$ и отношении «сигнал – шум» на каждой частоте 10 дБ потенциальная СКП измерения пеленга $< 0,05^\circ$. Нужно отметить, что другая основная характеристика ГАНС УКБ – погрешность измерения дальности – также понижается. СКП измерения времени распространения σ_t для широкополосного сигнала с полосой ΔF существенно меньше, чем для гармонического сигнала. Так, на частоте 12 кГц при

$q = 10$ дБ и $\Delta F = 4$ кГц $\sigma_t = 80$ мкс, а при использовании гармонического сигнала длительностью 10 мс и $q = 10$ дБ эта величина почти на два порядка больше – $\sigma_t = 3$ мс.

2. Эксперимент

Алгоритм проверялся на макете системы в условиях гидроакустического бассейна. Для приема сигналов использовалась плоская круговая антенна с восемью равномерно размещенными элементами и диаметром измерительной базы 75 мм. Источник сигнала был зафиксирован, а приемная антенна устанавливалась на прецизионной поворотной платформе в его плоскости. Трактом излучения формировался импульс длительностью 2 мс, содержащий 10 частот равной амплитуды и случайной начальной фазы в диапазоне частот 20–25 кГц с шагом 0,5 кГц. Антенну предварительно градуировали по фазовым характеристикам на этих частотах (рис. 2), а затем по набору экспериментальных данных (точки на графиках) устанавливали аппроксимирующие фазовые характеристики (сплошные линии). На рисунке приведен пример этих характеристик для пар элементов 1–5 и 3–7 на частоте 22 кГц. По амплитуде кривых для экспериментальных данных уточнялся размер измерительной базы антенны для заданного значения скорости звука.

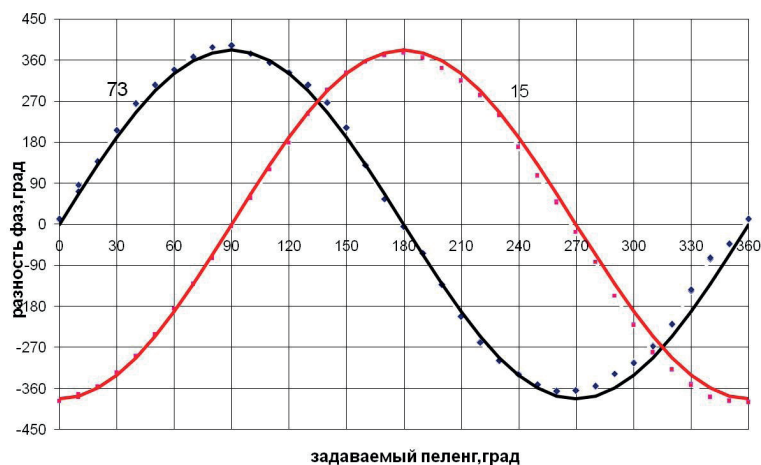


Рис. 2. Фазовые характеристики 8-элементной антенны между элементами 7–3 и 1–5 на частоте 22 кГц

После приема сигнала всеми элементами антенны выполнялась 10-полосная квадратурная обработка данных с определением комплексной огибающей на каждой частоте. Пример данных, сформированных приемником, приведен в табл. 3 – это значения дробных фаз на каждой частоте сигнала, принятого всеми элементами антенны, для одного установленного пеленга.

Следующий шаг – определение времени задержки для пар элементов антенны. В табл. 4 приведены расчеты задержки по равенству (6) для двух пар ортогональных диагональных элементов антенны: 1–5 и 3–7. На первом этапе находили временные фрагменты, соответствующие измеренным значениям дробной фазы (столбцы с $m_i = 0$). Далее к этим значениям добавляли с разными знаками временные фрагменты, равные периодам соответствующих частот. Затем по минимальной дисперсии данных в рядах вычисляли ожидаемую временную задержку, среднюю на всех частотах, и полные фазы сигнала на каждой частоте (столбцы желтого и зеленого цветов).

В проведенном эксперименте СКП измерения времени составила около 2 мкс.

Т а б л и ц а 3

Измеренные фазы на элементах антенны

Частота, кГц	ϑ_1°	ϑ_2°	ϑ_3°	ϑ_4°	ϑ_5°	ϑ_6°	ϑ_7°	ϑ_8°
20,0	-73	-45	-1	-32	-8	15	-144	7
20,5	164	123	-60	-115	-117	-177	155	-118
21,0	51	-17	-178	137	125	50	27	123
21,5	79	-22	167	99	120	9	5	114
22,0	120	23	-153	146	155	54	54	160
22,5	114	5	-128	145	137	55	44	163
23,0	-19	-145	85	11	-1	-74	-113	25
23,5	-151	80	-82	-155	-141	117	130	-129
24,0	-53	-180	18	-60	-43	-149	-132	-20
24,5	-47	138	-5	-93	-77	175	-164	-22

Т а б л и ц а 4

Временные задержки сигнала между элементами антенны

Для пары элементов 1–5

Частота, кГц	$\vartheta_1 - \vartheta_5, ^\circ$	$t_1 - t_5,$ $m_i = 0, \text{ мкс}$	$t_1 - t_5,$ $m_i = -1, \text{ мкс}$	$t_1 - t_5,$ $m_i = 1, \text{ мкс}$	$\varphi_1 - \varphi_5,$ $m_i = -1, ^\circ$
20	66	9,1	-40,9	59,1	-294
20,5	79	10,7	-38,1	59,5	-281
21	74	9,8	-37,8	57,4	-286
21,5	41	5,3	-41,2	51,8	-319
22	35	4,5	-41,0	49,9	-325
22,5	23	2,9	-41,6	47,3	-337
23	18	2,1	-41,3	45,6	-342
23,5	10	1,2	-41,4	43,7	-350
24	10	1,2	-40,5	42,8	-350
24,5	-30	-3,4	-44,2	37,4	-390
Среднее значение, мкс			-40,8		
Среднеквадратичная погрешность, мкс		4,5	1,8	7,5	

Для пары элементов 7–3

Частота, кГц	$\vartheta_7 - \vartheta_3, ^\circ$	$t_7 - t_3,$ $m_i = -1, \text{ мкс}$	$t_7 - t_3,$ $m_i = 1, \text{ мкс}$	$t_7 - t_3,$ $m_i = 0, \text{ мкс}$	$\varphi_3 - \varphi_7,$ $m_i = 0, ^\circ$
20	143	-30,2	69,8	19,8	143
20,5	145	-29,1	68,5	19,7	145
21	156	-27,0	68,3	20,6	156
21,5	162	-25,6	67,4	20,9	162
22	153	-26,1	64,8	19,4	153
22,5	188	-21,3	67,6	23,2	188

23	197	-19,6	67,3	23,9	197
23,5	148	-25,0	60,1	17,5	148
24	150	-24,3	59,0	17,4	150
24,5	158	-22,9	58,8	17,9	158
Среднее значение, мкс				20,0	
Среднеквадратичная погрешность, мкс		3,3	4,3	2,2	

Для подтверждения работоспособности алгоритма в лабораторных условиях у описанного макета оценивали угловую чувствительность антенны при обработке многочастотного сигнала. С этой целью определяли расчетные значения пеленгов при фиксированном положении источника сигналов. Приемную антенну поворачивали в горизонтальной плоскости на небольшой угол от начального положения, находили полные фазы сигналов, решали уравнения пеленгов (4) на каждой частоте и полученные результаты сравнивали с заданными углами поворота $0,5^\circ$ и $0,25^\circ$.

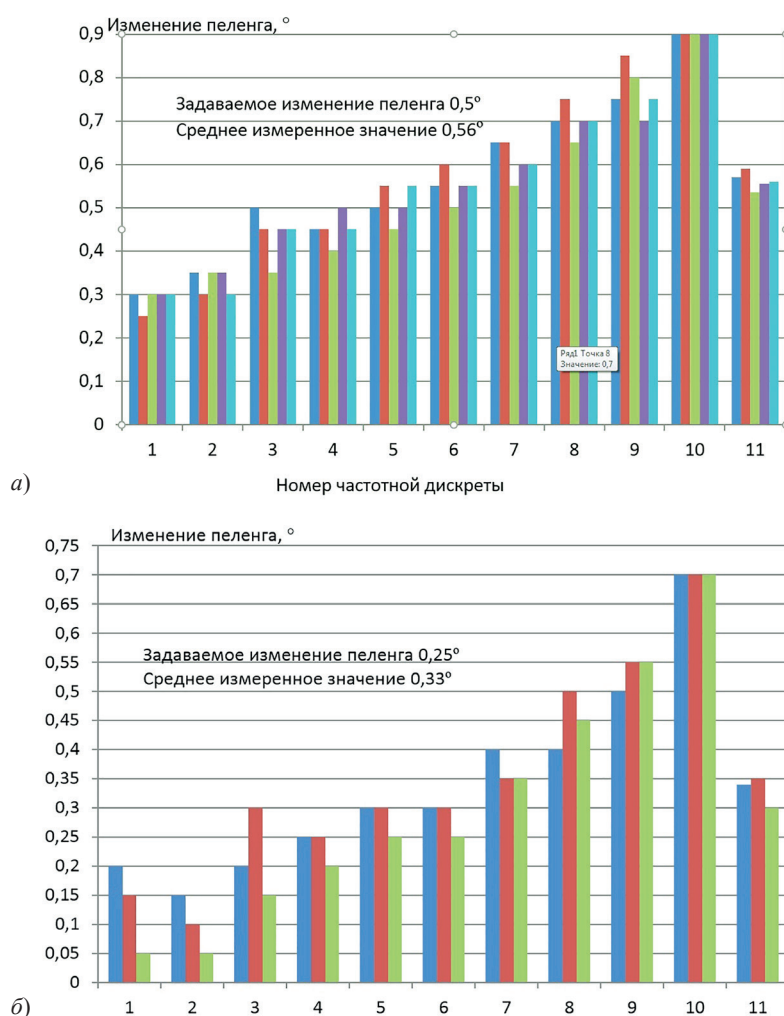


Рис. 3. Оценка угловой чувствительности антенны при изменении пеленга: а) $\Delta\beta = 0,5^\circ$; б) $\Delta\beta = 0,25^\circ$; 1–10 – номера частотных дискрет; 11 – средние значения. Цветом выделены различные серии измерений

Результаты расчета пеленгов по частотным дискретам от 20 до 24,5 кГц с шагом 0,5 кГц и средние изменения пеленга по серии измерений для угла поворота $0,5^\circ$ приведены на рис. 3, а, для угла $0,25^\circ$ – на рис. 3, б.

Выводы

Особенности рассмотренной обработки данных в ГАНС УКБ [16]:

- 1) вместо гармонических одночастотных сигналов используются широкополосные многочастотные со значительно большей энергией;
- 2) для измерений времени прихода сигнала на элементы антенны применяется процедура расчета полных фаз многочастотного сигнала с вычислением временных задержек на каждой частоте и усреднением времени по всем частотам широкополосного сигнала;
- 3) определение пеленга β основывается на статистической обработке разности текущего измеряемого времени на всех элементах антенны и ожидаемых временных задержек на этих элементах, полученных при градуировке антенны для заданного пеленга β .

Система имеет малогабаритную приемную антенну с небольшим числом элементов и при этом обеспечивает высокую точность измерений углового положения объекта навигации за счет роста суммарной излучаемой энергии. В связи с этим излучатель сигналов целесообразнее устанавливать на борту обеспечивающего судна, а приемник – на объекте навигации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. Л.: Судостроение, 1989. 316 с.
2. Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В. Гидроакустические навигационные средства. Л.: Судостроение, 1983, 262 с.
3. 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. М.: Наука, 2005. 398 с.
4. Austin, Th. C., Stokey, R., Relative Acoustic Tracking, *Sea Technology*, 1998, March, pp. 21–27.
5. Watson, M., Loggins, C., Ochi, Y.T., A New High Accuracy Super Short Base Line (SSBL) System, *Underwater Technology*, 1998, pp. 210–215.
6. Jinwu Tong, Xiaosu Xu, Lanhua Hou, Yao Li, Jian Wang, Liang Zhang, An Ultra-Short Baseline Positioning Model Based on Rotating Array & Reusing Elements and Its Error Analysis, *Sensors*, 2019, 19, doi: 10.3390/c19204373.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. <https://www.sonardyne.com/usbl-system/>.

11. www.ixsea-oceano.com. Posidonia 6000. Underwater acoustic positioning system.
12. <https://evologics.de/usbl> USBL/.
13. www.kongsberg.com/ru/maritime/products/Acoustics-Positioning-and-Communication/.
14. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
15. Матвиенко Ю.В. Оценка практически достижимой точности современных гидроакустических систем с ультракороткой измерительной базой для подводных роботов // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №2 (121). С. 106–120. EDN: MHPDQS.
16. Матвиенко Ю.В. Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой измерительной базой. Пат. РФ №2815608. Опубл. 19.03.2024.

Matvienko, Yu.V. (Institute of Marine Technology Problems of FEB RAS, Vladivostok).

Increasing the Accuracy of Hydroacoustic Navigation Systems with an Ultra-Short Measuring Baseline, *Гироскопия и Навигация*, 2025, vol. 33, no. 1 (128), pp. 159–169.

Abstract. The possibility of using multi-frequency signals in hydroacoustic navigation systems with an ultra-short measuring baseline is considered. The reception of an external signal by a circular antenna, the aperture of which is several wavelengths of a medium-frequency wave signal, is analyzed. The proposed model for determining the time delays of antenna elements based on determination of total phases at each frequency of a multi-frequency signal has shown the possibility of increasing the accuracy of measurements of the navigation object angular position.

Key words: hydroacoustic navigation, ultrashort-baseline systems, complex signals, total phase extraction.

Материал поступил 29.03.2024