

О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассмотрено влияние геометрических параметров приёмной антенны пеленгатора на точность определения угловых и линейных координат позиционируемых объектов. Получены оценки максимальных погрешностей позиционирования применительно к двум вариантам геометрии пеленгационной антенны.

Ключевые слова: геометрические параметры пеленгационной антенны, погрешности позиционирования.

1. Введение

Системы гидроакустической навигации используются, как правило, для определения местоположения либо неподвижных, находящихся на морском дне, либо движущихся подводных или надводных объектов.

Особое место среди гидроакустических навигационных систем различного назначения занимают системы с ультракороткой базой позиционирования (USBL-системы), поскольку они не требуют специальных донных маяков-ответчиков в зоне обслуживания, имеют самую низкую цену среди известных типов навигационных систем и допускают возможность размещения на любых судах-носителях.

Основные усилия ведущих фирм-разработчиков USBL-систем направлены на увеличение их точности, степени автоматизации, надёжности, срока службы. Так или иначе все эти усилия связаны с разработкой новых малогабаритных приёмных антенн и базируются на совершенствовании алгоритмов позиционирования и средств обработки данных.

В качестве показательного примера, иллюстрирующего указанную тенденцию развития, можно назвать две отечественные разработки, включающие в себя алгоритм позиционирования пеленгатора гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой для обеспечения работы автономных и привязных необитаемых подводных аппаратов [1] и полусферическую гидроакустическую антенную решётку для ультракороткобазисной системы определения местоположения подводных объектов [2].

В контексте современных разработок USBL-систем рассматривается актуальная с позиции практического применения оценка влияния геометрических параметров четырёхэлементной антенны гидроакустического фазового пеленгатора, использующего согласованный с антенной алгоритм позиционирования, на точность определения угловых и линейных координат наблюдаемых подводных объектов.

2. Алгоритмическая база позиционирования фазового пеленгатора

В публикации [3] авторами предложен алгоритм позиционирования, ориентированный на минимально возможное количество приёмных трактов пеленгации и позволяющий определять координаты подводного объекта в трёхмерном пространстве.

В основе алгоритма лежит система четырёх нелинейных уравнений, связывающих декартовы координаты подводного объекта и гидрофонов приёмной антенны пеленгатора, времена распространения навигационного сигнала от антенны подводного объекта до соответствующих гидрофонов приёмной антенны, а также средневзвешенную по глубине скорость распространения звука в акватории наблюдаемого подводного объекта.

Решение указанной системы уравнений относительно координат подводного объекта после ряда преобразований, связанных с переходом в сферическую систему координат и введением фазовых параметров навигационного сигнала, позволяет получить алгоритм позиционирования для заданной полусферы водного пространства следующего функционального состава:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= X_2^* - X_1^*; & A_{12} &= Y_2^* - Y_1^*; & A_{13} &= Z_2^* - Z_1^*; \\
 A_{21} &= X_3^* - X_1^*; & A_{22} &= Y_3^* - Y_1^*; & A_{23} &= Z_3^* - Z_1^*; \\
 A_{31} &= X_4^* - X_1^*; & A_{32} &= Y_4^* - Y_1^*; & A_{33} &= Z_4^* - Z_1^*; \\
 K_1 &= A_{22}A_{33} - A_{23}A_{32}; & K_2 &= A_{13}A_{32} - A_{12}A_{33}; & K_3 &= A_{12}A_{23} - A_{13}A_{22}; \\
 K_4 &= A_{23}A_{31} - A_{21}A_{33}; & K_5 &= A_{11}A_{33} - A_{13}A_{31}; & K_6 &= A_{13}A_{21} - A_{11}A_{23}; \\
 K_7 &= A_{21}A_{32} - A_{22}A_{31}; & K_8 &= A_{12}A_{31} - A_{11}A_{32}; & K_9 &= A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}; \\
 E &= A_{11}(A_{22}A_{33} - A_{23}A_{32}) + A_{12}(A_{23}A_{31} - A_{21}A_{33}) + A_{13}(A_{21}A_{32} - A_{22}A_{31});
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 B_1 &= \frac{m(\Delta\psi_{12} + \Delta\nu)}{360f}, B_2 = \frac{m(\Delta\psi_{13} + \Delta\nu)}{360f}, B_3 = \frac{m(\Delta\psi_{14} + \Delta\nu)}{360f}, \\
 m &\text{ — единичный коэффициент размерности } \frac{M^2}{c}.
 \end{aligned} \right. \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{B_1K_1 + B_2K_2 + B_3K_3}{E}; \\
 \beta &= \frac{B_1K_4 + B_2K_5 + B_3K_6}{E}; \\
 \gamma &= \frac{B_1K_7 + B_2K_8 + B_3K_9}{E};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\phi = \left\{ \begin{aligned}
 &\frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right), \beta \geq 0 \\
 &180 + \frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right), \beta < 0
 \end{aligned} \right\} [0^\circ \leq \phi < 360^\circ]; \tag{4}$$

$$\theta = \left\{ \frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{\gamma}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}\right) - 90 \right\} [0^\circ < \theta < 90^\circ],$$

где X_1^*, Y_1^*, Z_1^* ; X_2^*, Y_2^*, Z_2^* ; X_3^*, Y_3^*, Z_3^* ; X_4^*, Y_4^*, Z_4^* – инструментально измеренные декартовы координаты (м) четырёх гидрофонов приёмной антенны пеленгатора; $\Delta\psi_{12}, \Delta\psi_{13}, \Delta\psi_{14}$ – инструментально измеряемые разности фаз (град) колебаний навигационного сигнала на выходах трёх пар гидрофонов приёмной антенны; $\Delta\nu$ – абсолютная погрешность инструментального измерения разностей фаз (град); f – частота (Гц) навигационного сигнала; вычисляемые угловые координаты подводного объекта: ϕ – азимут (град) объекта в сферической системе координат приёмной антенны пеленгатора; θ – угол места (град) объекта в заданной полусфере наблюдения, отсчитываемый от горизонтали, соответствующей водной поверхности при вертикальной стабилизации приёмной антенны.

При минимально возможном количестве приёмных трактов пеленгатора пространственное расположение гидрофонов его антенны существенно влияет на точность пеленгования, а декартовы координаты гидрофонов в соотношениях (1) как раз и определяют геометрические параметры приёмной антенны, от которых зависят погрешности позиционирования объектов для выбранной полусферы наблюдения.

3. Геометрические параметры пеленгационной антенны

Предварительные расчёты с использованием соотношений (1)–(4) алгоритма позиционирования фазового пеленгатора показали, что для достижения хорошей эффективности антенны – одинакового характера изменения погрешностей вычисления угловых координат объекта по всем возможным направлениям выбранной полусферы наблюдения – гидрофоны в модуле приёмной антенны пеленгатора должны располагаться в геометрических точках пространства, соответствующих вершинам правильных многогранников.

В антенных модулях из четырёх гидрофонов возможны только две эффективные геометрии их размещения – на основе тетраэдра (треугольной пирамиды) и гексаэдра (куба), причём в последней геометрии пары гидрофонов располагаются в противоположных вершинах параллельных граней с пространственной перпендикулярностью линий, соединяющих пары гидрофонов параллельных граней.

С точки зрения минимизации погрешностей вычисления угловых координат подводного объекта по пространству наблюдения можно также рекомендовать две достаточно общие и эффективные пространственные геометрии приёмной антенны на надводных и подводных объектах, допускающие различные вариации её линейных размеров.

Первая – диаметрально-ортогональная (ДО) геометрия – предполагает размещение гидрофонов в точках пространства, соответствующих вершинам прямого параллелепипеда с ромбическими основаниями, по паре на каждом из оснований в вершинах противоположных углов, чтобы плоскости, проведённые через вершины оснований с гидрофонами и точку пересечения диагоналей параллелепипеда, были взаимно перпендикулярны, а высота параллелепипеда совпадала с вертикальной осью приёмной антенны.

Вторая – пирамидальная геометрия – ориентирована на расположение гидрофонов в точках пространства, соответствующих вершинам правильной треугольной пирамиды, в которой высота совпадает с вертикальной осью приёмной антенны.

На рис. 1 показаны упрощённые эскизы судового антенного модуля с ультракороткой базой расположения сферических гидрофонов для указанных вариантов пространственной геометрии: диаметрально-ортогональной (рис. 1а) и пирамидальной (рис. 1б).

Пространством наблюдения пеленгатора для рассматриваемых геометрий антенного модуля считается область нижней полусферы, ограниченная координатными полуосями: $X, -X, Y, -Y, -Z$.

С точки зрения минимизации размеров антенного модуля пеленгатора и упрощения аппаратной и программной составляющих оборудования USBL-системы задаём максимальные

расстояния между каждой парой гидрофонов в антенном модуле не более половины длины волны используемого навигационного сигнала.

Кроме того, вариации размеров L , $L1$, $L2$, N , H (см. рис. 1) антенного модуля при расчётах погрешностей позиционирования выбираем исходя из предполагаемых возможностей применения данных геометрий на надводных судах, в эксплуатационных конструкциях шахтного (колодезного) или забортного спуска и в автономных необитаемых подводных аппаратах, имеющих специфические технологии размещения пеленгационных антенн.

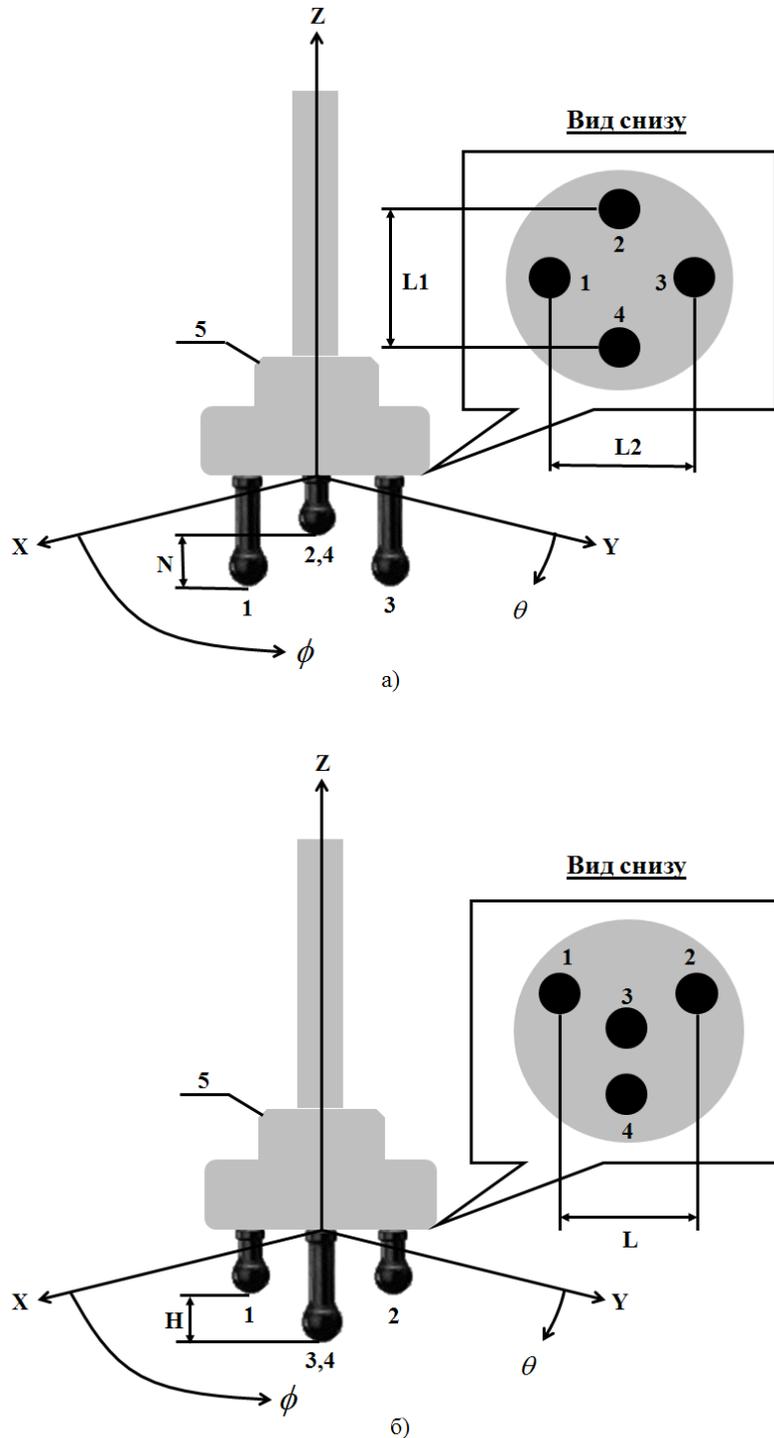


Рис. 1. Эскизное представление двух вариантов судовой антенны с диаметрально-ортогональной (а) и пирамидальной (б) геометрий: 1–4 – сферические приёмные гидрофоны; 5 – элементы конструкции; $L1$, $L2$ – расстояния между парами гидрофонов в горизонтальной плоскости; N – смещение между парами гидрофонов в вертикальной плоскости; L , H – основание и высота пирамиды; Z – вертикальная ось антенны; ϕ – азимутальный угол; θ – угол места

4. Погрешности позиционирования объектов

Погрешности оценок угловых и линейных координат объектов фазовым пеленгатором с указанными выше алгоритмом позиционирования и геометриями антенн определяем в математической среде Mathcad 15 для представляющих практический интерес исходных данных:

- частота навигационного сигнала $f = 5$ кГц – выбрана в соответствии с конструктивными ограничениями на линейные размеры антенного модуля;

- абсолютная погрешность инструментального измерения разностей фаз колебаний навигационного сигнала на выходах трёх пар гидрофонов $\Delta \nu = \pm 0.2^\circ$ – задана на основании современных алгоритмических и аппаратных методов измерения разности фаз [4];

- диапазон изменения углов места наблюдаемого объекта $\theta = 10^\circ \dots 80^\circ$ – ограничен наиболее вероятными сценариями позиционирования;

- диапазон изменения наклонных расстояний до объекта $R = 2$ м ... 500 м – показателен для оценки погрешностей позиционирования в режимах дальнего наблюдения и ближнего причаливания;

- четыре группы параметров антенны диаметрально-ортогональной геометрии: $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.25\lambda)$, $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.07\lambda)$, $(L1 = 0.5\lambda, L2 = 0.25\lambda, N = 0.25\lambda)$, $(L1 = 0.5\lambda, L2 = 0.25\lambda, N = 0.07\lambda)$, где λ – длина волны навигационного сигнала, позволяют проследить динамику изменения погрешностей позиционирования при изменении линейных размеров антенного модуля;

- две группы параметров антенны пирамидальной геометрии: $(L = 0.5\lambda, H = 0.25\lambda)$, $(L = 0.5\lambda, H = 0.07\lambda)$ – интересны с точки зрения возможности размещения элементов антенны непосредственно в корпусе автономного необитаемого подводного аппарата.

Так как тройки абсолютных погрешностей $\Delta \nu$ при инструментальных измерениях разностей фаз могут иметь разные сочетания знаков, то погрешности позиционирования будут находиться в некотором функциональном интервале, ограниченном минимальными и максимальными значениями. С точки зрения практического применения важнее оценки максимальных значений максимальных погрешностей, характеризующие наихудшие условия функционирования фазового пеленгатора, поэтому в проведённых расчётах использовались именно такие показатели.

Для наглядности и удобства интерпретации максимальные абсолютные погрешности оценок азимута $\Delta \phi_{\max}$ и угла места $\Delta \theta_{\max}$ подводного объекта целесообразно рассматривать как функции от φ ($\varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$) – всех возможных азимутов наблюдаемого объекта.

На рис. 2 и 3 в качестве иллюстрации характера изменения и порядка величины погрешностей представлены графики вышеуказанных зависимостей: $\Delta \phi_{\max} = f(\varphi)$, $\Delta \theta_{\max} = f(\varphi)$, рассчитанные на основе соотношений (1)–(4) алгоритма позиционирования, для ДО $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.25\lambda)$ и пирамидальной $(L = 0.5\lambda, H = 0.25\lambda)$ геометрий антенны фазового пеленгатора, наклонного расстояния до объекта $R = 500$ м, двух предельных углов места наблюдаемого объекта: минимального $\theta = 10^\circ$ и максимального $\theta = 80^\circ$.

Сравнение погрешностей двух геометрий указывает на более высокую точность (немногом более чем в два раза) определения азимута объекта в фазовом пеленгаторе ДО геометрии антенны во всём диапазоне изменения углов места позиционируемого объекта. Зато оценка самого угла места при его малых значениях оказывается примерно во столько же раз точнее в пеленгаторе с пирамидальной геометрией антенны.

Более дифференцированное сравнение геометрий можно получить, рассматривая пределы изменения максимальных значений максимальных погрешностей оценок угловых координат объекта для разных геометрических параметров приёмной антенны пеленгатора. Результаты таких расчётов сведены в табл. 1.

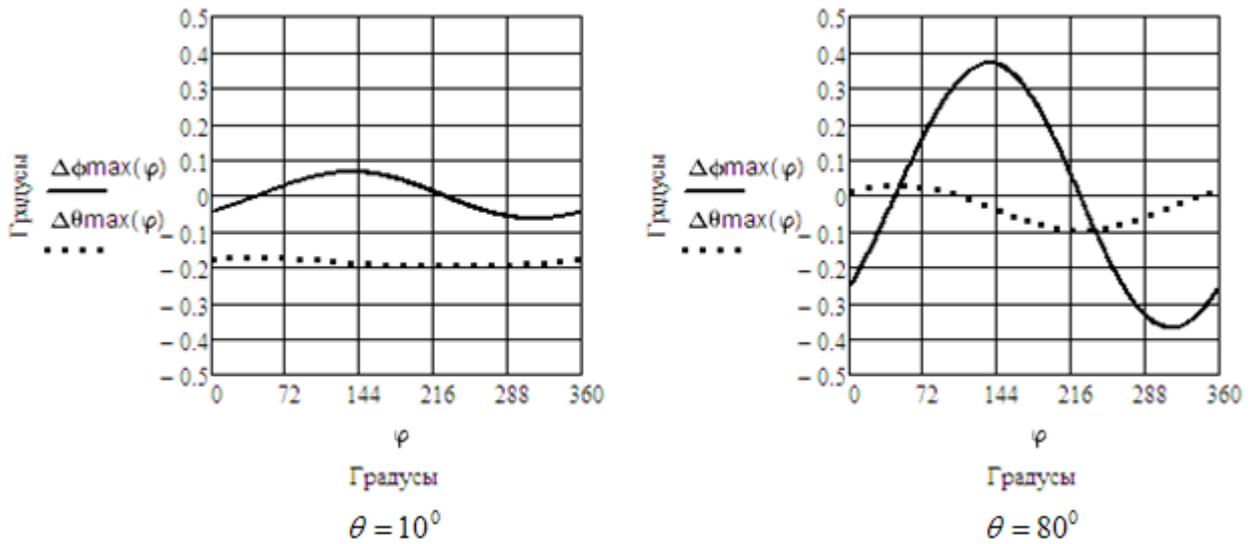


Рис. 2. Оценки угловых координат объекта: пеленгатор ДО геометрии антенны

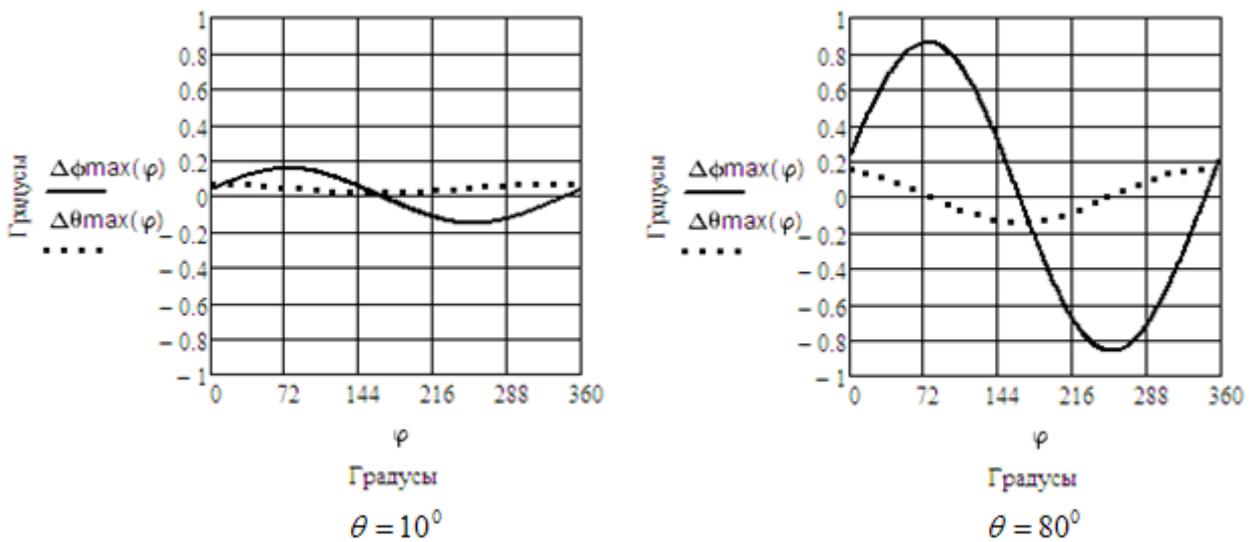


Рис. 3. Оценки угловых координат объекта: пеленгатор пирамидальной геометрии антенны

Таблица 1. Пределы изменения погрешностей оценок угловых координат объекта для разных геометрических параметров антенны пеленгатора

| Параметры антенны пеленгатора | Диапазон изменения углов места объекта: $\theta = 10^{\circ} - 80^{\circ}$ | | | | | |
|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Наклонное расстояние: $R = 20$ м | | Наклонное расстояние: $R = 100$ м | | Наклонное расстояние: $R = 500$ м | |
| | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град |
| ДО геометрия: $L1 = L2 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.4 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 |
| ДО геометрия: $L1 = L2 = 0.5\lambda$, $N = 0.07\lambda$ | 0.08 – 0.38 | 0.94 – 0.18 | 0.08 – 0.38 | 0.7 – 0.18 | 0.08 – 0.38 | 0.65 – 0.18 |

| Параметры антенны пеленгатора | Диапазон изменения углов места объекта: $\theta = 10^0 - 80^0$ | | | | | |
|--|--|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| | Наклонное расстояние: $R = 20$ м | | Наклонное расстояние: $R = 100$ м | | Наклонное расстояние: $R = 500$ м | |
| | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град |
| ДО геометрия: $L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.4 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 |
| ДО геометрия: $L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.07\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.38 | 1.0 – 0.21 | 0.08 – 0.38 | 0.72 – 0.2 | 0.08 – 0.38 | 0.68 – 0.2 |
| Пирамидальная геометрия: $L = 0.5\lambda$, $H = 0.25\lambda$ | 0.2 – 0.88 | 0.1 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.08 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.08 – 0.18 |
| Пирамидальная геометрия: $L = 0.5\lambda$, $H = 0.07\lambda$ | 0.2 – 0.88 | 0.08 – 0.2 | 0.17 – 0.88 | 0.12 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.18 – 0.18 |

В табл. 1 левая цифра предела изменения каждой погрешности соответствует углу места позиционируемого объекта, равного 10^0 , а правая – 80^0 .

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы:

– максимальные погрешности оценок азимута объекта возрастают с увеличением угла места наблюдаемого объекта для обеих геометрий антенны пеленгатора, но значения погрешностей и пределы их изменения оказываются меньшими у ДО геометрии;

– максимальные погрешности определения угла места объекта уменьшаются с его ростом в случае ДО геометрии и увеличиваются при использовании пирамидальной геометрии антенны;

– для ДО геометрии антенны уменьшение расстояния между гидрофонами одной пары в горизонтальной плоскости в два раза и парами гидрофонов в вертикальной плоскости в семь раз не влияет на величину погрешности при вычислении азимута объекта, но увеличивает погрешность оценки угла места с уменьшением наклонного расстояния в пять раз;

– уменьшение в семь раз расстояния между гидрофонами в вертикальной плоскости для пирамидальной геометрии антенны очень слабо влияет на величины погрешностей оценки обоих угловых координат позиционируемого объекта.

Чтобы проследить характерную динамику изменения погрешностей в зависимости от наклонных расстояний при разных углах места в табл. 2 представлены расчётные значения максимальных значений максимальных погрешностей оценок угловых координат для пяти значений угла места объекта, шести значений его наклонного расстояния и ДО геометрии ($L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$) антенны пеленгатора.

Характер изменения погрешностей оценок угловых координат в табл. 2 указывает на их уменьшение с увеличением наклонного расстояния для всех углов места позиционируемого объекта в зоне ближнего причаливания ($R \leq 20$ м) и неизменность в зоне дальнего наблюдения ($R > 100$ м), что является хорошим показателем потенциальной применимости рассматриваемого фазового пеленгатора.

В некоторых случаях позиционирования, помимо точности определения угловых координат, требуются ещё и оценки погрешностей линейных координат, таких как дальность объекта и смещение по траверсу – линии, перпендикулярной направлению на объект.

Таблица 2. Погрешности оценок угловых координат для разных параметров позиционирования объекта

| Наклонное расстояние | Погрешности оценок угловых координат | $\theta = 10^0$ | $\theta = 30^0$ | $\theta = 50^0$ | $\theta = 70^0$ | $\theta = 80^0$ |
|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R = 2$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.55 | 0.85 | 1.1 | 1.3 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 1.0 | 0.53 | 0.35 | 0.3 | 0.2 |
| $R = 5$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.12 | 0.25 | 0.4 | 0.52 | 0.69 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.3 | 0.15 | 0.18 | 0.2 | 0.14 |
| $R = 10$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.1 | 0.16 | 0.22 | 0.34 | 0.5 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.11 |
| $R = 20$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.25 | 0.4 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.14 | 0.1 |
| $R = 100$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.2 | 0.38 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.12 | 0.1 |
| $R = 500$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.2 | 0.38 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.12 | 0.1 |

Указанные погрешности можно рассчитать, используя следующие тригонометрические соотношения:

$$\Delta D_{\max \max} = \left| R \left[\cos \frac{\pi\theta}{180} - \cos \frac{\pi(\theta + \Delta\theta_{\max \max})}{180} \right] \right| ; \tag{5}$$

$$\Delta d_{\max \max} = \left| R \cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi\Delta\phi_{\max \max}}{180} \right) \right| ,$$

где $\Delta D_{\max \max}$, $\Delta d_{\max \max}$ – максимальные значения максимальных абсолютных погрешностей оценок дальности и смещения по траверсу (м); θ , $\Delta\theta_{\max \max}$ – угол места объекта и максимальное значение максимальной погрешности его определения (град); $\Delta\phi_{\max \max}$ – максимальное значение максимальной погрешности оценки азимута объекта (град); R – наклонное расстояние (м) до объекта.

Таблица 3. Максимальные погрешности оценок линейных координат объекта

| Наклонное расстояние | Погрешности оценок линейных координат | $\theta = 10^0$ | $\theta = 30^0$ | $\theta = 50^0$ | $\theta = 70^0$ | $\theta = 80^0$ |
|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R = 2$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.007 | 0.017 | 0.019 | 0.013 | 0.008 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.006 | 0.009 | 0.009 | 0.01 | 0.007 |
| $R = 5$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.01 | 0.019 | 0.022 | 0.016 | 0.01 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.005 | 0.007 | 0.012 | 0.016 | 0.012 |
| $R = 10$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.017 | 0.024 | 0.025 | 0.02 | 0.015 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.006 | 0.01 | 0.023 | 0.026 | 0.019 |
| $R = 20$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.028 | 0.033 | 0.036 | 0.03 | 0.024 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.012 | 0.026 | 0.048 | 0.046 | 0.034 |
| $R = 100$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.138 | 0.121 | 0.123 | 0.119 | 0.115 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.061 | 0.175 | 0.24 | 0.2 | 0.172 |
| $R = 500$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.688 | 0.605 | 0.617 | 0.597 | 0.576 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.306 | 0.875 | 1.21 | 0.98 | 0.86 |

В табл. 3 приведены максимальные значения максимальных погрешностей оценок линейных координат объекта для представленных в табл. 2 параметров позиционирования и геометрии антенны, полученные с использованием зависимостей (5), на основе которых также можно оценивать основные функциональные возможности фазового пеленгатора, учитывая характерные результаты расчётов:

- в зоне ближнего причаливания с увеличением наклонного расстояния наблюдается непропорциональный рост абсолютных погрешностей оценок линейных координат во всём диапазоне изменений углов места объекта – имеет место уменьшение относительных погрешностей позиционирования;

- в зоне дальнего наблюдения с увеличением наклонного расстояния обеспечивается пропорциональный рост абсолютных погрешностей оценок линейных координат во всём диапазоне изменений углов места объекта – поддерживается постоянство относительных погрешностей позиционирования;

- максимальные значения максимальных абсолютных погрешностей оценок дистанции в зоне ближнего причаливания во всём диапазоне изменений углов места объекта не превышают 5 см, а смещения по траверсу – 4 см, что позволяет говорить о перспективности использования фазового пеленгатора в различных системах приведения подводных объектов в заданную точку водного пространства;

- максимальные значения максимальных относительных погрешностей оценок дистанции в зоне дальнего наблюдения во всём диапазоне изменений углов места объекта не превышают 1 %, а смещения по траверсу – 0.7%, что соответствует уровню лучших современных систем позиционирования.

5. Заключение

Рассмотренные характеристики фазового пеленгатора, базирующегося на разработанном алгоритме позиционирования, согласованном с четырёхэлементной антенной двух эффективных геометрий, свидетельствуют о возможности его результативного использования при решении комплексных задач наблюдения объектов и управления движением различных подводных аппаратов. При этом по совокупности оцениваемых показателей диаметрально-ортогональная геометрия антенны пеленгатора является более предпочтительной, хотя и пирамидальная геометрия имеет свою область применения, особенно в приложениях, касающихся малогабаритных автономных необитаемых подводных аппаратов.

Литература

1. *Матвиенко Ю. В. и др.* Пеленгатор гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой: Патент 2179730 RU // Б.И. 2002. № 5. С. 15.
2. *Литвиненко С. Л.* Экспериментальные исследования подсистемы пассивной гидролокации гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. Тематический выпуск. С. 92–101.
3. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
4. Фазометр Ф2-34. Основные технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pribor-i.ru/f2-34-izmeritel-raznosti-faz?yclid=6421049607832489827> (дата обращения: 01.12.2018).

Статья поступила в редакцию 14.01.2019.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

About influence of geometrical parameters of the antenna characteristics of the hydroacoustic phase direction finder

V. Arsent'ev, G. Krivolapov

Influence of geometrical parameters of the receiving antenna of a direction finder on the accuracy of determination of angular and linear coordinates of the positioned objects is considered. Estimates of the maximum errors of positioning in relation to two variants of geometry of the antenna of a direction finder are received.

Keywords: geometric parameters of the direction finding antenna, positioning errors.