

# О характеристиках фазового пеленгатора гидроакустической системы приведения автономного необитаемого подводного аппарата

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассматриваются навигационные характеристики фазового пеленгатора с ультракороткой базой гидроакустической системы приведения автономного необитаемого подводного аппарата к заданному подводному объекту с использованием двух сценариев приведения.

*Ключевые слова:* автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустический фазовый пеленгатор, сценарии приведения, эффективность позиционирования подводных объектов.

## 1. Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) находят всё более широкое применение в различных областях деятельности человека, связанных с использованием мирового океана и освоением его ресурсов. Сегодня можно говорить о времени массового использования АНПА самого разнообразного конструктивно-технологического построения и функционального назначения.

Управление движением АНПА – сложная многофакторная задача, решаемая с использованием целого арсенала современных научно-технических и технологических разработок, относящаяся к задачам управления наивысшей сложности. Вопросам управления движением различных подводных аппаратов при выполнении ими определённых миссий посвящено достаточное количество публикаций, среди которых можно выделить, например, работы института проблем морских технологий ДВО РАН [1–4] – ведущего российского предприятия в области подводной робототехники.

Функционал управления АНПА предполагает выполнение заданной миссии путём обеспечения взаимодействия широкого спектра его технических средств, укрупнённый базовый набор которых представлен на рис. 1. Одним из важных звеньев в арсенале технических средств АНПА является гидроакустическая система навигации и позиционирования, выполняющая функции своеобразного «штурмана» при движении аппарата в водной среде.

Составной частью системы позиционирования АНПА в условиях его приведения в заданное место водной акватории является гидроакустический фазовый пеленгатор с ультракороткой базой размещения гидрофонов пеленгационной антенны в корпусе подводного аппарата.

В работе [5] описан разработанный и запатентованный авторами алгоритм позиционирования подводных объектов с размещением пеленгационной антенны на надводных или подводных носителях, ориентированный на четырёхэлементные приёмные антенны с ультракороткой базой расположения гидрофонов, позволяющий при достаточно высокой точности определения угловых координат объектов минимизировать аппаратно-программные ресурсы системы позиционирования.

В статье [6] рассмотрены характеристики фазового пеленгатора, базирующегося на алгоритме позиционирования [5], согласованном с четырёхэлементной антенной двух эффективных геометрий, с возможностью его результативного использования при решении комплексных задач наблюдения объектов и управления движением различных подводных аппаратов.



Рис. 1. Основные технические средства АНПА

В данной статье рассматриваются точностные характеристики гидроакустического фазового пеленгатора с алгоритмом позиционирования [5] на базе четырёхэлементной антенны диаметрально-ортогональной геометрии [6] в задаче приведения АНПА к придонному подводному объекту с использованием двух возможных сценариев сближения и причаливания.

## 2. Характеристики фазового пеленгатора

Для системной определённости и корректности результатов дальнейших расчётов конкретизируем основные технические требования, предъявляемые к гидроакустическому фазовому пеленгатору и системе приведения АНПА в целом. Эти требования можно сформулировать в виде следующих положений:

- антенна фазового пеленгатора должна иметь геометрические параметры, обеспечивающие её приемлемую технологическую установку в средние АНПА [7] и примерно одинаковый характер изменения погрешностей определения угловых координат объекта причаливания по всем возможным направлениям движения подводного аппарата в процессе его приведения к заданному подводному объекту;

- область приёма сигнала приводного маяка объекта причаливания в системе приведения определяется пространством полусферы относительно нижней части корпуса АНПА, где устанавливается пеленгационная антенна;

- гидроакустический сигнал приводного маяка объекта причаливания может располагаться в диапазоне частот от 60 до 100 кГц;

- максимальные наклонные расстояния от АНПА до объекта причаливания в процессе приведения могут находиться в пределах от 150 до 200 метров;

- в процессе приведения фазовый пеленгатор АНПА должен позволять оценивать такие навигационные характеристики объекта причаливания, как пеленг, угол места, наклонное расстояние, дальность;

- сигнал приводного маяка объекта причаливания должен иметь в своём составе навигационную и информационную составляющие;

- в процессе приведения на этапе сближения приводной маяк объекта причаливания может работать в режиме маяка-ответчика, а на этапе причаливания – в режиме маяка-пингера.

Исходя из требований приемлемой технологической установки антенны фазового пеленгатора в корпусе АНПА и характера изменения погрешностей вычисления угловых координат

объекта причаливания по всем возможным направлениям выбранной полусферы приёма сигнала приводного маяка объекта причаливания, можно рекомендовать для использования четырёхэлементную пеленгационную антенну диаметрально-ортогональной геометрии, у которой размеры между парами приёмных гидрофонов в горизонтальной плоскости в два раза превышают размеры между парами гидрофонов в вертикальной плоскости (рис. 2).

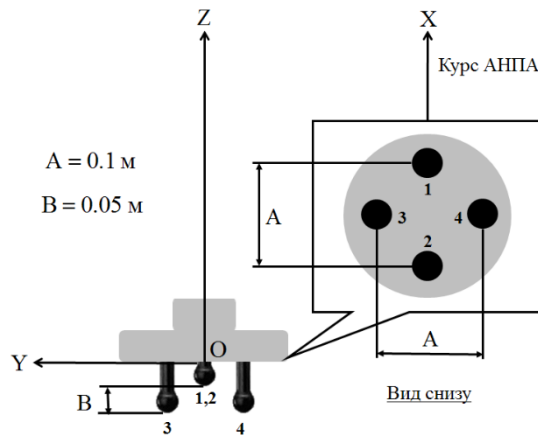


Рис. 2. Геометрия и размеры пеленгационной антенны АНПА

Для обеспечения работы фазового пеленгатора в заданном диапазоне частот и устранения неопределённости позиционирования при формировании навигационного сигнала приводного маяка объекта причаливания следует использовать процедуру амплитудной модуляции высокочастотных несущих колебаний низкочастотным модулирующим тональным сигналом, широко применяемую в фазовой дальнометрии [8]. При этом частота  $F$  модулирующего тонального сигнала выбирается из условия:

$$F \leq \frac{C_{\min}}{2 \cdot A}, \quad (1)$$

где  $C_{\min}$  – минимально возможная скорость распространения звука в водной среде;  $A$  – расстояние между парами приёмных гидрофонов антенны АНПА в горизонтальной плоскости. В случае представленной на рис. 2 пеленгационной антенны ( $A = 0.1$  м) и при величине  $C_{\min} = 1400$  м/с частота модулирующего тонального сигнала может быть выбрана равной  $F = 7$  кГц.

Пеленг  $\varphi$  (относительно курса подводного аппарата) и угол места  $\theta$  (относительно горизонтальной плоскости ХОУ пеленгационной антенны) приводного маяка объекта причаливания определяются в процессе приведения (для периодической коррекции траектории движения АНПА) на основе следующих тригонометрических соотношений:

$$\varphi = \left\{ \begin{array}{l} \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{-\psi_{12}}{\sqrt{\psi_{12}^2 + (\psi_{13} - \psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \psi_{13} - \psi_{14} \geq 0 \\ 180 + \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{\psi_{12}}{\sqrt{\psi_{12}^2 + (\psi_{13} - \psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \psi_{13} - \psi_{14} < 0 \end{array} \right\}; \quad (2)$$

$$[0^0 \leq \varphi < 360^0];$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{\psi_{12} - \psi_{13} - \psi_{14}}{\sqrt{\psi_{12}^2 + (\psi_{13} - \psi_{14})^2 + (\psi_{12} - \psi_{13} - \psi_{14})^2}} \right) - 90 ; \quad (3)$$

$$[0^0 < \theta < 90^0],$$

где  $\psi_{12} = \Delta\psi_{12} + \Delta\xi_{12}$ ;  $\psi_{13} = \Delta\psi_{13} + \Delta\xi_{13}$ ;  $\psi_{14} = \Delta\psi_{14} + \Delta\xi_{14}$ ;  $\Delta\psi_{12}$ ,  $\Delta\psi_{13}$ ,  $\Delta\psi_{14}$  – инструментально измеренные разности фаз модулирующего тонального сигнала приводного маяка объекта причаливания на выходах трёх пар гидрофонов (1-2, 1-3, 1-4) пеленгационной антенны;  $\Delta\xi_{12}$ ,  $\Delta\xi_{13}$ ,  $\Delta\xi_{14}$  – абсолютные погрешности инструментального измерения разностей фаз модулирующего тонального сигнала приводного маяка объекта причаливания. Соотношения (2), (3) являются частным случаем общего алгоритма позиционирования [5] применительно к пеленгационной антенне диаметрально-ортогональной геометрии выбранного соотношения горизонтального и вертикального линейных размеров (см. рис. 2).

По рассчитанному углу места  $\theta$  приводного маяка объекта причаливания и известным глубинам погружения АНПА и объекта причаливания оцениваются значения дальности  $D$  и наклонного расстояния  $R$  от АНПА до приводного маяка объекта причаливания:

$$D = \Delta h / \operatorname{tg} \left( \frac{\pi\theta}{180} \right); \quad R = \sqrt{(\Delta h)^2 + D^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta h = h_1 - h_2$ ;  $h_1$  – глубина погружения объекта причаливания при его придонном расположении, измеренная на объекте причаливания и переданная на АНПА с помощью информационной составляющей сигнала приводного маяка объекта причаливания;  $h_2$  – глубина погружения АНПА, измеряемая техническими средствами его поисково-измерительной системы (см. рис. 1) в процессе приведения.

Для удобства интерпретации результатов расчётов и моделирования сценариев приведения АНПА к придонному объекту причаливания область приведения можно условно разделить на две части: дальнюю область приведения – изменение угла места  $\theta$  приводного маяка объекта причаливания в пределах  $\theta \in [10^0 \dots 60^0]$  и ближнюю область приведения –  $\theta \in [60^0 \dots 90^0]$ . Выделим также два этапа приведения АНПА в зоне действия приводного маяка объекта причаливания: этап сближения и этап причаливания.

Погрешности оценок угловых координат  $\varphi$  и  $\theta$  приводного маяка объекта причаливания в процессе приведения с использованием соотношений (2) и (3) включают в себя погрешности  $\Delta\xi_{12}$ ,  $\Delta\xi_{13}$ ,  $\Delta\xi_{14}$  инструментального измерения разностей фаз модулирующего тонального сигнала приводного маяка объекта причаливания на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны АНПА и погрешности самого алгоритма позиционирования (алгоритмические погрешности), появившиеся в результате соответствующих приближений при математическом синтезе алгоритма позиционирования [5], зависящие от местоположения объекта позиционирования, геометрии и размеров используемой пеленгационной антенны.

Оценку максимальных (по всем возможным пеленгам  $\varphi \in [0^0 \dots 360^0]$  перемещения подводного аппарата в процессе приведения) алгоритмических погрешностей углового позиционирования приводного маяка объекта причаливания можно получить, вычисляя максимальные абсолютные погрешности оценок угловых координат приводного маяка в условиях отсутствия погрешностей  $\Delta\xi_{12} = \Delta\xi_{13} = \Delta\xi_{14} = 0$  инструментального измерения разностей фаз модулирующего тонального сигнала приводного маяка на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны.

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчётов максимальных абсолютных алгоритмических погрешностей оценок угловых координат приводного маяка объекта причаливания для

дальней ( $\theta \in [10^0 \dots 60^0]$ ,  $R = 20, 200$  м) и ближней ( $\theta \in [65^0 \dots 90^0]$ ,  $R = 2, 20$  м) областей приведения АНПА как функции от угла места антенны приводного маяка, выполненные в математической среде Mathcad 15 на основе соотношений (2) и (3).

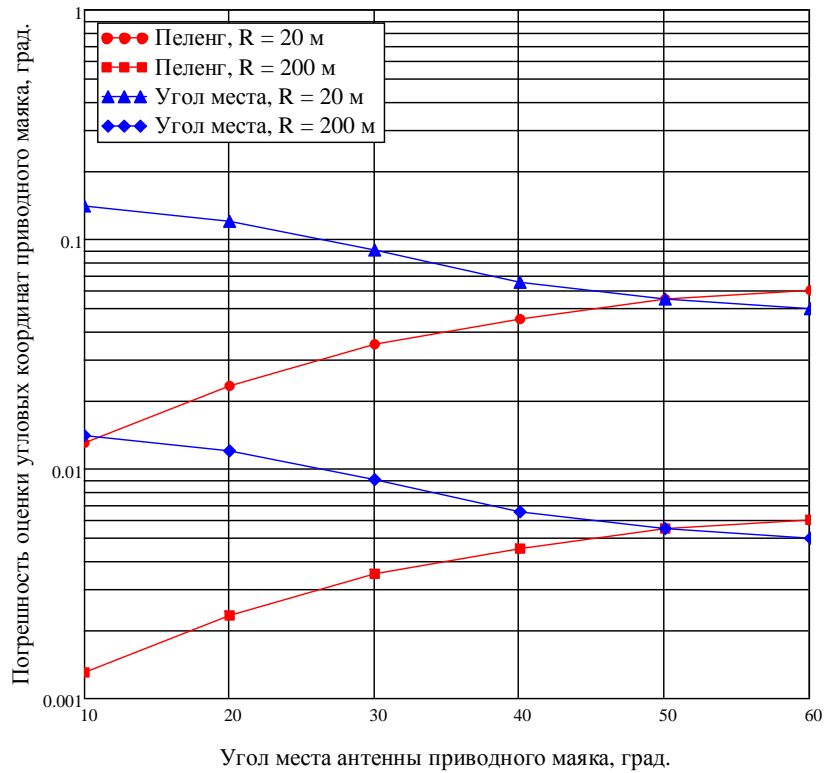


Рис. 3. Алгоритмические погрешности фазового пеленгатора в дальней области приведения

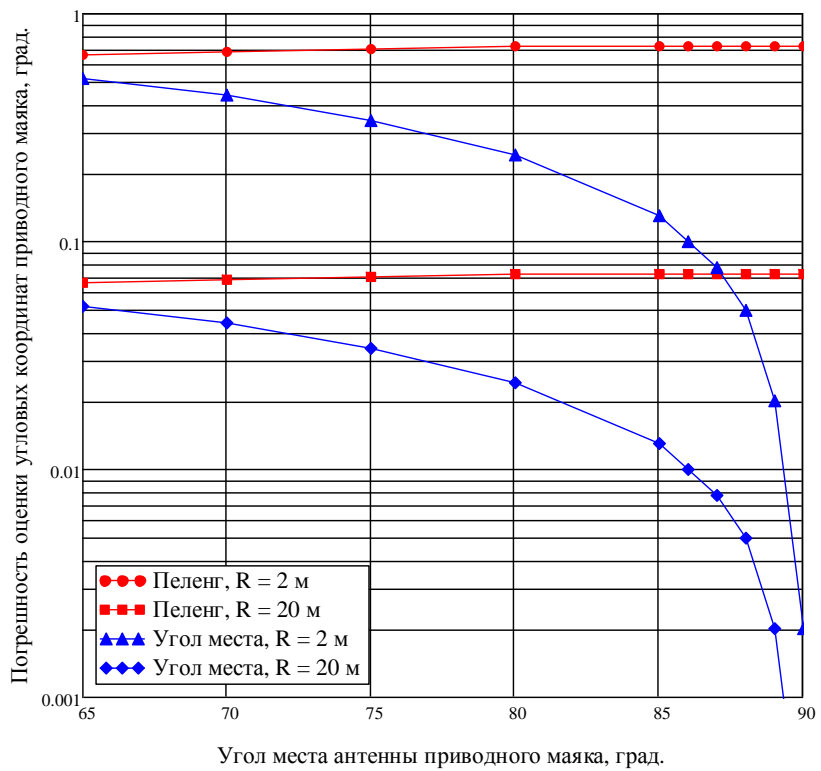


Рис. 4. Алгоритмические погрешности фазового пеленгатора в ближней области приведения

Расчёты алгоритмических погрешностей позволяют сделать следующие выводы:

- погрешности оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания в дальней и ближней областях приведения уменьшаются прямо пропорционально увеличению наклонного расстояния между АНПА и объектом причаливания;
- погрешности оценок пеленга приводного маяка объекта причаливания в дальней области приведения возрастают с увеличением угла места антенны приводного маяка;
- погрешности оценок угла места приводного маяка объекта причаливания в дальней области приведения уменьшаются с увеличением угла места антенны приводного маяка;
- погрешности оценок пеленга приводного маяка объекта причаливания в ближней области приведения не зависят от угла места антенны приводного маяка;
- погрешности оценок угла места приводного маяка объекта причаливания в ближней области приведения уменьшаются с увеличением угла места антенны приводного маяка, причём наибольшие изменения имеют место в диапазоне углов от  $85^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ ;
- максимально возможная погрешность оценки пеленга антенны приводного маяка объекта причаливания в дальней области приведения составляет  $0.06^{\circ}$ , а угла места –  $0.15^{\circ}$ ;
- максимально возможная погрешность оценки пеленга антенны приводного маяка объекта причаливания в ближней области приведения составляет  $0.7^{\circ}$ , а угла места –  $0.5^{\circ}$ .

Из проведённых расчётов также следуют два важных системных вывода:

- характер изменения алгоритмических погрешностей оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания в областях приведения АНПА не противоречит тенденции допустимого изменения точностей позиционирования объекта причаливания относительно АНПА на соответствующих этапах его приведения, что является хорошим показателем применимости рассматриваемого фазового пеленгатора в системе приведения;
- величины алгоритмических погрешностей оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания в областях приведения АНПА не являются критическими добавками к погрешностям инструментального измерения разностей фаз, которые бы не позволяли осуществлять эффективное позиционирование АНПА в процессе приведения.

### 3. Сценарии приведения подводного аппарата

Рассмотрим два наиболее очевидных сценария приведения АНПА к придонному объекту причаливания с целью дальнейшей оценки характеристик рассматриваемого фазового пеленгатора в системе приведения подводного аппарата. Для наглядности изображения считаем, что АНПА имеет цилиндрическую (сигарообразную) форму с вертикальным (ось Z на рис. 2) размещением пеленгационной антенны в нижней части корпуса. В процессе приведения осуществляется горизонтальная стабилизация корпуса АНПА относительно морского дна.

Сценарий 1, изображённый на рис. 5, предполагает преимущественно горизонтальное, а сценарий 2, представленный на рис. 6, – горизонтально-вертикальное перемещение АНПА в процессе его приведения к придонному объекту причаливания.

Для количественной оценки характеристик фазового пеленгатора системы приведения подводного аппарата по указанным сценариям введём дополнительные пространственные параметры местоположения АНПА и объекта причаливания в процессе приведения.

Сценарий 1:

- разность глубин погружения АНПА и места причаливания  $\Delta h = 10$  м;
- начало сближения –  $\theta = 3^{\circ}$ ,  $R = 200$  м, конец сближения –  $\theta = 30^{\circ}$ ,  $R = 20$  м;
- начало причаливания –  $\theta = 32^{\circ}$ ,  $R = 10$  м, конец причаливания –  $\theta = 35^{\circ}$ ,  $R = 1$  м.

Сценарий 2:

- разность глубин погружения АНПА и места причаливания  $\Delta h = 50$  м;
- начало сближения –  $\theta = 15^{\circ}$ ,  $R = 200$  м, конец сближения –  $\theta = 50^{\circ}$ ,  $R = 20$  м;
- начало причаливания –  $\theta = 55^{\circ}$ ,  $R = 10$  м, конец причаливания –  $\theta = 65^{\circ}$ ,  $R = 1$  м.

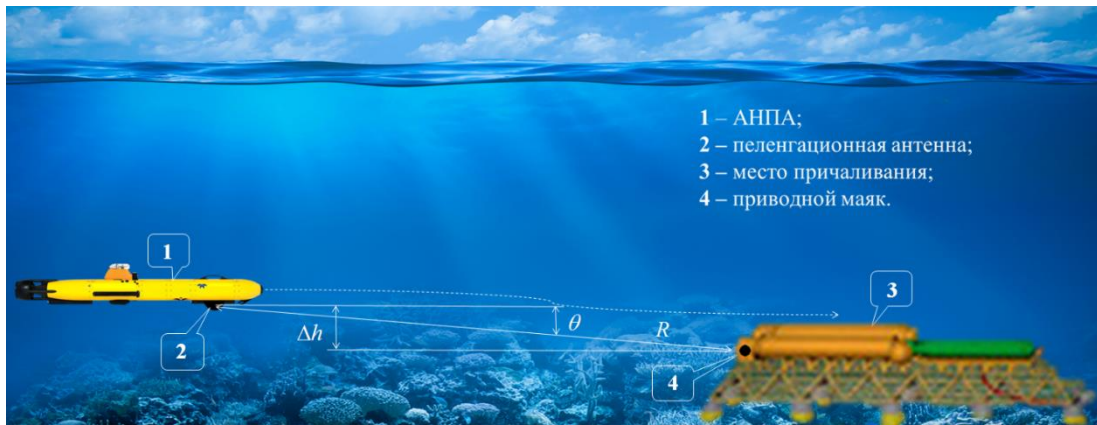


Рис. 5. Сценарий 1 приведения АНПА

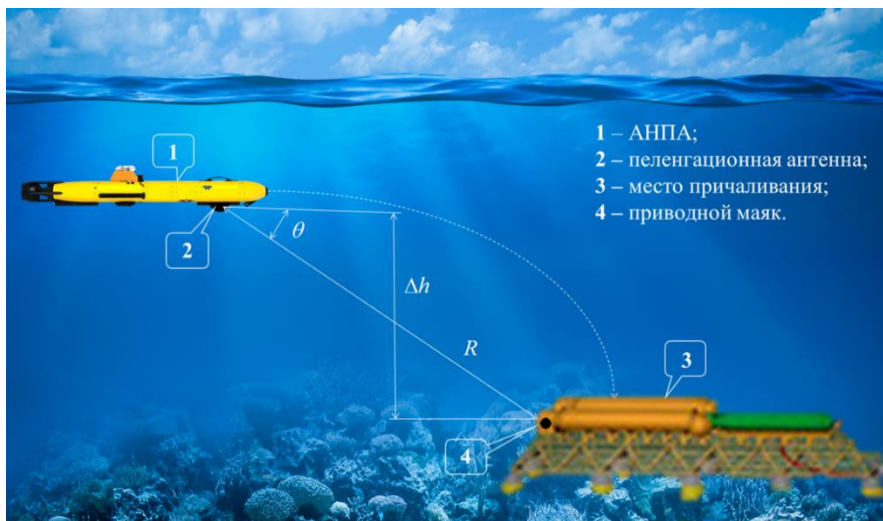


Рис. 6. Сценарий 2 приведения АНПА

#### 4. Эффективность позиционирования объекта причаливания

Определим погрешности оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания относительно АНПА в процессе приведения по двум вышеуказанным сценариям в зависимости от отношения сигнал/шум демодулированного навигационного сигнала приводного маяка объекта причаливания на выходах гидрофонов пеленгационной антенны путём моделирования в математической среде Mathcad 15 при следующих исходных данных:

- ранее выбранная частота  $F = 7$  кГц модулирующего тонального сигнала приводного маяка объекта причаливания;
- полоса частот излучаемого приводным маяком амплитудно-модулированного навигационного сигнала составляет 14 кГц;
- границы полосы пропускания полосового фильтра в процессе линейного детектирования амплитудно-модулированного навигационного сигнала заданы в пределах от 5 до 7 кГц;
- ранее выбранные линейные размеры вертикально стабилизированной пеленгационной антенны АНПА диаметрально-ортогональной геометрии  $A = 0.1$  м,  $B = 0.05$  м (см. рис. 2);
- квазибелый шум после демодуляции навигационного сигнала в полосе частот 2 кГц имеет нормальное вероятностное распределение с нулевым средним значением и заданной дисперсией;
- количество отсчётов  $k$  на периоде колебаний навигационного сигнала частоты  $F$  после линейного детектирования и общее число отсчётов  $L$  в выборке сигнала после дискретизации

при осуществлении процедур вычисления разностей фаз  $\Delta\psi_{12}$ ,  $\Delta\psi_{13}$ ,  $\Delta\psi_{14}$  трёх пар демодулированных сигналов приводного маяка объекта причаливания и определения угловых координат  $\varphi, \theta$  приводного маяка объекта причаливания относительно АНПА выбраны соответственно  $k = 3.6 \cdot 10^3$ ,  $L = 3.6 \cdot 10^5$ ;

– отношение сигнал/шум демодулированного сигнала приводного маяка объекта причаливания в процессе моделирования задавалось в пределах от 10 до 50 дБ изменением его амплитуды при дискретизации, поскольку невозможно получить строгую аналитическую зависимость от указанного параметра в соотношениях (2), (3).

Процедура измерения разностей фаз  $\Delta\psi_{12}$ ,  $\Delta\psi_{13}$ ,  $\Delta\psi_{14}$  осуществлялась с использованием цифрового квадратурного метода, рассмотренного авторами в статье [9].

Оценка абсолютных погрешностей  $\Delta\xi_{12}$ ,  $\Delta\xi_{13}$ ,  $\Delta\xi_{14}$  вычисления указанных разностей фаз производилась методом статистических испытаний с использованием 15 независимых реализаций квазиглобального шума, формируемого в заданной полосе частот фильтра линейного детектора. Усреднение при вычислениях разностей фаз выполнялось по 100 периодам колебаний модулирующей частоты  $F$  ( $L/k = 100$ ).

Максимальная по модулю (в диапазоне возможного изменения разностей фаз от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ ) абсолютная погрешность  $\Delta\xi_{12} = \Delta\xi_{13} = \Delta\xi_{14}$  инструментальной оценки разности фаз модулирующего тонального сигнала на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны АНПА как функция отношения сигнал/шум представлена на рис. 7. Эта погрешность может изменяться от  $0.01^\circ$  до  $0.8^\circ$ , используется далее в расчётах погрешностей оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания на основе соотношений (2) и (3), характеризуя максимальные ошибки позиционирования объекта причаливания в процессе приведения АНПА.

На рис. 8 – 11 показаны зависимости предельных абсолютных погрешностей оценок угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания относительно приводимого АНПА от отношения сигнал/шум демодулированного навигационного сигнала приводного маяка объекта причаливания для рассматриваемых сценариев приведения.

На этапе сближения АНПА и объекта причаливания погрешности позиционирования в сценариях 1 и 2 не имеют разительных отличий: максимальные отличия по пеленгу составляют  $0.2^\circ$ , а по углу места не превышают  $0.1^\circ$  во всём диапазоне изменений отношения сигнал/шум навигационного сигнала приводного маяка объекта причаливания.

На этапе причаливания наблюдаются определённые различия. В начале причаливания точность позиционирования по пеленгу в сценарии 1 выше, чем в сценарии 2 – максимальное отличие составляет  $0.4^\circ$ ; при отношениях сигнал/шум менее 20 дБ точность позиционирования по углу места в сценарии 1 может быть выше на  $0.15^\circ$ , чем в сценарии 2; при отношениях сигнал/шум более 20 дБ точность позиционирования по углу места в сценарии 2 может быть выше на  $0.06^\circ$ , чем в сценарии 1. В конце причаливания точность позиционирования по пеленгу в сценарии 1 может быть выше на  $1.1^\circ$ , чем в сценарии 2, а точность позиционирования по углу места в сценарии 2 может быть выше на  $0.8^\circ$ , чем в сценарии 1.

Представленные в расчётах предельные абсолютные погрешности оценок угловых координат приводного маяка объекта причаливания характеризуют максимальные из максимально возможных погрешностей позиционирования, имеющих место при таких сочетаниях значений пеленга  $\varphi$ , угла места  $\theta$  антенны приводного маяка объекта причаливания, максимальных погрешностей  $\Delta\xi_{12}$ ,  $\Delta\xi_{13}$ ,  $\Delta\xi_{14}$  инструментального определения разностей фаз модулирующего тонального сигнала приводного маяка объекта причаливания на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны АНПА, а также знаков указанных погрешностей, которые приводят к наибольшим абсолютным погрешностям в операциях (2), (3) вычисления угловых координат антенны приводного маяка объекта причаливания для самых наихудших условий приведения подводного аппарата.



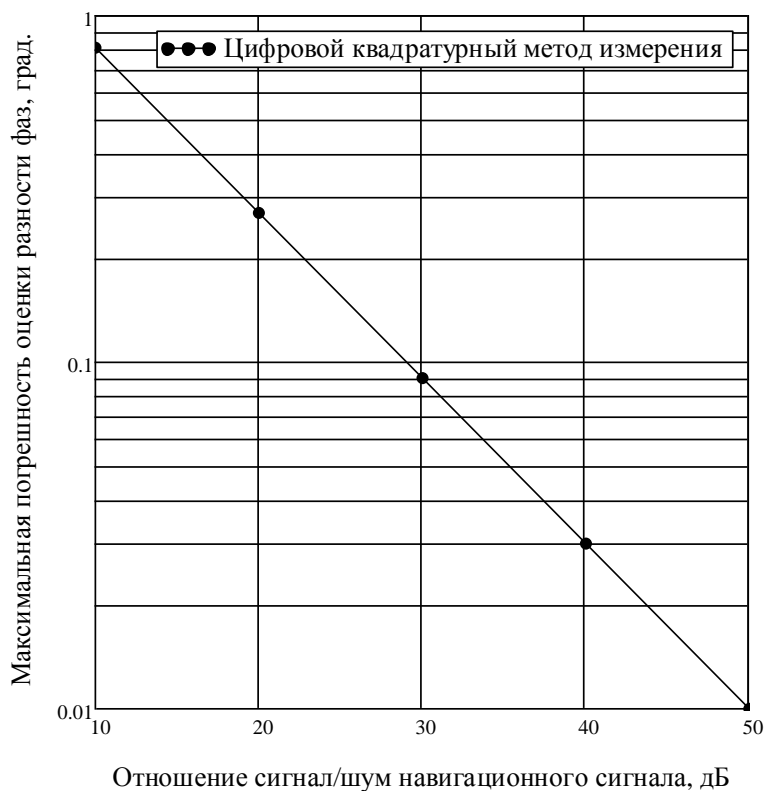


Рис. 7. Погрешность оценки разности фаз навигационного сигнала при моделировании

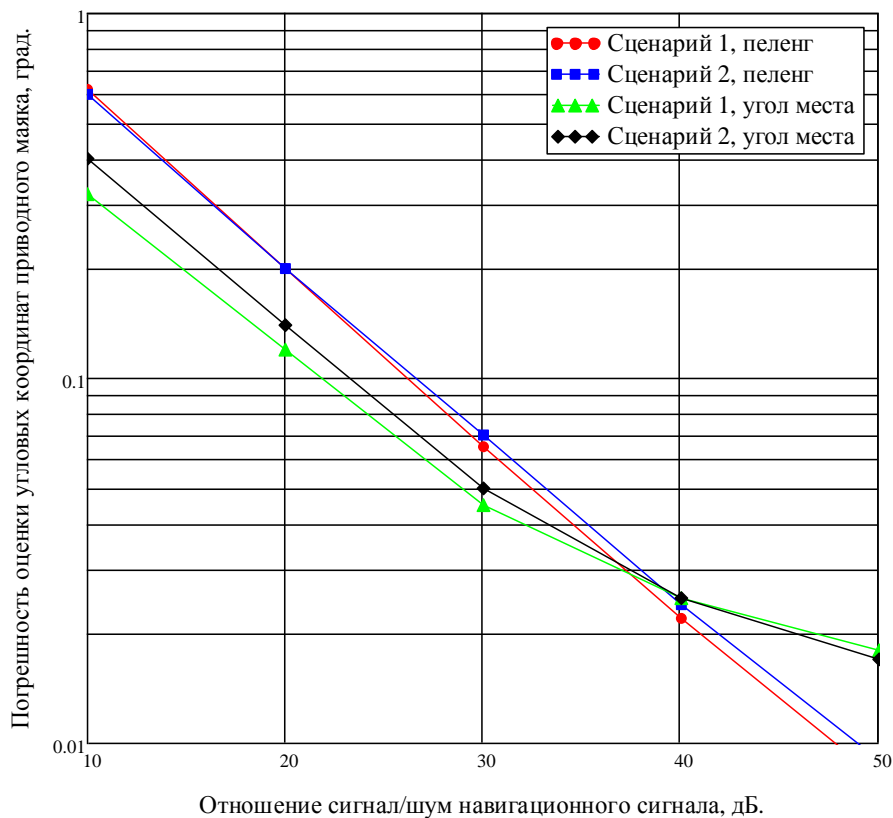


Рис. 8. Погрешности оценок угловых координат приводного маяка, начало сближения

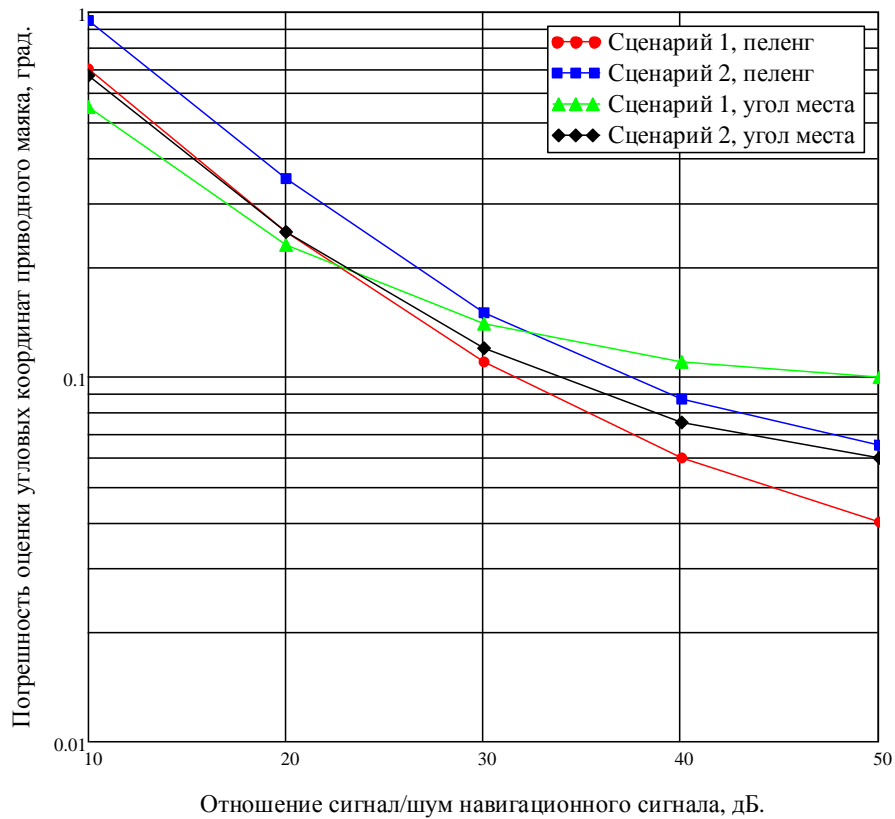


Рис. 9. Погрешности оценок угловых координат приводного маяка, конец сближения

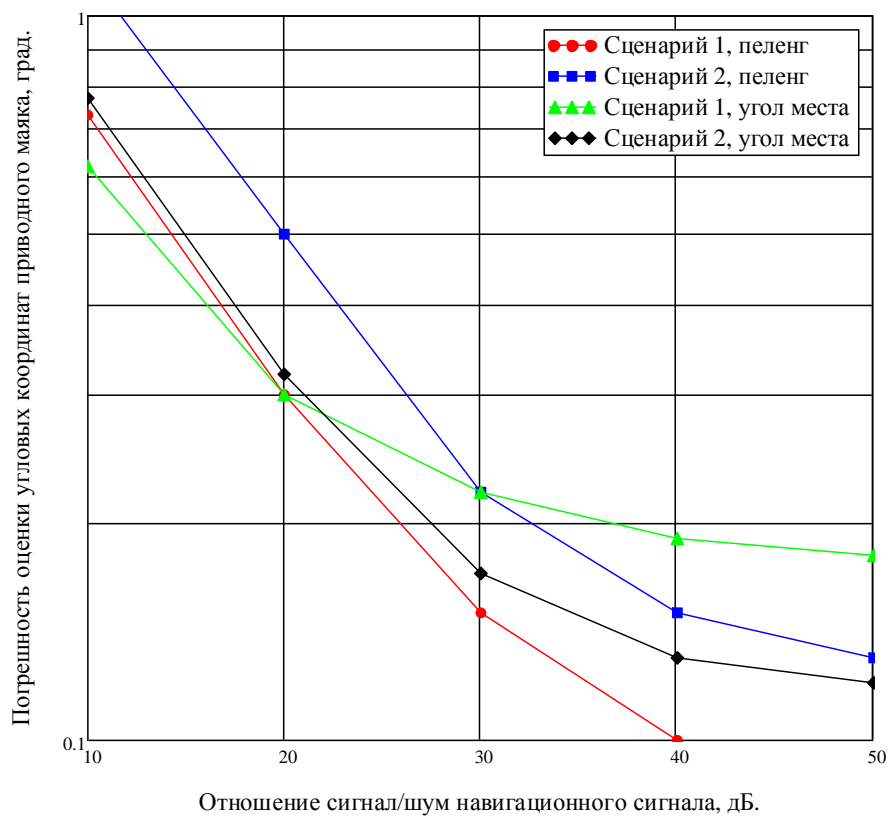


Рис. 10. Погрешности оценок угловых координат приводного маяка, начало причаливания

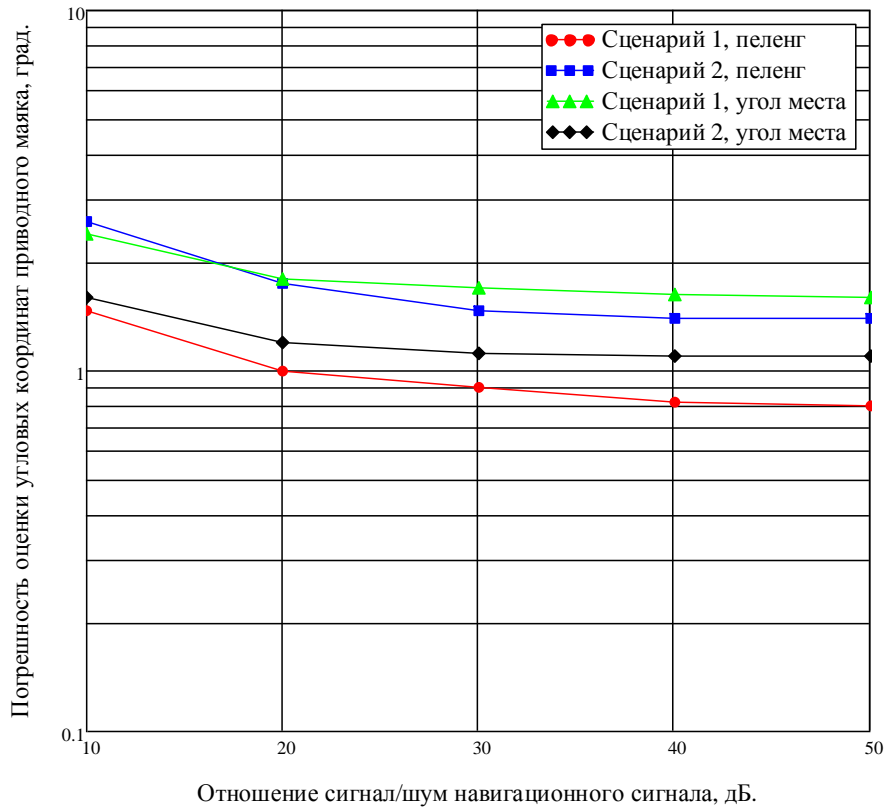


Рис. 11. Погрешности оценок угловых координат приводного маяка, конец причаливания

Если учесть, что вероятность возникновения указанных выше неблагоприятных сочетаний функциональных параметров позиционирования (величин пеленга, угла места, погрешностей инструментального определения разностей фаз и знаков этих погрешностей) в полном временном цикле сближения и причаливания объектов взаимодействия будет мала, то можно рассчитывать на преобладание в процессе приведения больших точностей позиционирования по сравнению с представленными предельными.

Учитывая зависимость точности позиционирования взаимодействующих объектов от отношения сигнал/шум навигационного сигнала, целесообразно оценить необходимую в процессе приведения мощность передатчика  $P$  приводного маяка объекта причаливания, которую в первом приближении можно рассчитать, используя полуэмпирическую зависимость [10] для подводных линий передачи гидроакустических сигналов:

$$P = \frac{4\pi R^2 \Delta f \cdot 10^{0.1H} \left\{ \frac{2.5 \cdot 10^{-2} \exp[-5.3 \exp(-0.6b)]}{f^2} + 2.2 \cdot 10^{-11} f^2 \right\}}{G\eta \cdot 10^{-0.0036f^{1.5}R}}, \quad (5)$$

где  $R$  – наклонное расстояние между АНПА и объектом причаливания;  $\Delta f$  – полоса частот полосовых усилителей сигналов гидрофонов пеленгационной антенны АНПА;  $H$  – требуемое на приеме отношение сигнал/шум навигационного сигнала приводного маяка объекта причаливания;  $f$  – несущая частота амплитудно-модулированного навигационного сигнала;  $G, \eta$  – коэффициент направленного действия и коэффициент полезного действия передающей антенны приводного маяка объекта причаливания;  $b$  – волнение морской поверхности в баллах. Выражение в фигурных скобках числителя характеризует спектральную плотность шумов морской среды и имеет размерность  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{кГц}} \right]$ , а знаменатель является безразмерной величиной.

Размерности остальных переменных:  $f, \Delta f$  – кГц,  $R$  – км,  $H$  – дБ,  $P$  – Вт. Для соответствующих рассматриваемым характеристикам фазового пеленгатора и сценариям приведения

параметров:  $R = 0.2$  км,  $\Delta f = 14$  кГц,  $H = 30$  дБ,  $f = 80$  кГц,  $G = 1$ ,  $\eta = 0.6$ ,  $b = 5$  получаем по формуле (5) необходимую в процессе приведения мощность передатчика приводного маяка объекта причаливания, которая равна 0.12 Вт. Техническая реализация передатчика указанной мощности не вызывает сложностей при разработке соответствующего автономного оборудования объекта причаливания.

## 5. Заключение

Полученные точностные характеристики рассмотренного фазового пеленгатора свидетельствуют о возможности создания достаточно эффективной системы управления движением АНПА в процессе его приведения к заданному подводному объекту. При допустимых для приемлемого позиционирования взаимодействующих объектов предельных абсолютных погрешностях оценок угловых координат приводного маяка объекта причаливания, не превышающих  $\pm 0.15^\circ$  на этапе сближения и  $\pm 1.5^\circ$  на этапе причаливания, должно быть обеспечено необходимое отношение сигнал/шум амплитудно-модулированного навигационного сигнала приводного маяка на выходе пеленгационной антенны АНПА, составляющее не менее 30 дБ.

На этапе сближения сценарии 1 и 2 незначительно отличаются друг от друга по точности позиционирования АНПА и объекта причаливания, на этапе причаливания сценарий 1, по сравнению со сценарием 2, позволяет получить большую точность позиционирования по пеленгу, но меньшую по углу места.

На этапе причаливания, особенно в конце этапа, желательна более высокая точность позиционирования по пеленгу, поскольку большинство АНПА имеют сигарообразную форму корпуса с преобладанием одного линейного размера, поэтому предпочтение может быть отдано сценарию 1 с преимущественно горизонтальным перемещением АНПА в процессе приведения.

Одним из путей повышения точности рассмотренного фазового пеленгатора системы приведения АНПА, который подкреплён предварительными исследованиями, является уменьшение алгоритмических погрешностей используемого алгоритма позиционирования в различных сценариях приведения подводного аппарата.

## Литература

1. *Борейко А. А., Ваулин Ю. В., Дубровин Ф. С., Щербатюк А. Ф.* Современные подходы к организации навигационного обеспечения работы морских робототехнических комплексов ИПМТ ДВО РАН // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ), 17–20 июня 2019, Москва. С. 420–432.
2. *Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. и др.* Автономные подводные роботы: Системы и технологии / под общей редакцией М. Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
3. *Ваулин Ю. В., Матвиенко Ю. В., Щербатюк А. Ф.* Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // XIV Международная конференция по интегрированным навигационным системам: материалы докладов. СПб, 2007. С. 251–256.
4. *Михайлов Д. Н., Сенин Р. Н., Дубровин Ф. С., Борейко А. А., Стыркул Р. И., Храмов О. А.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для гидрографических исследований в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2 (24). С. 4–13.
5. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультратяжелой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.

6. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора // Вестник СибГУТИ. 2019. № 1. С. 92–101.
7. ГОСТ Р 56960-2016. Аппараты необитаемые подводные. Классификация. Введён 01.04.2017. М.: Стандартинформ. 2016. 7 с.
8. Фазовые методы дальнометрии [Электронный ресурс] // URL: [https://studwood.ru/2174682/tehnika/fazovye\\_metody\\_dalnometrii](https://studwood.ru/2174682/tehnika/fazovye_metody_dalnometrii) (дата обращения: 10.06.2020).
9. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Измерение разности фаз гармонических сигналов в линейных трактах с квазибелым шумом // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 21–31.
10. *Пенин П. И.* Системы передачи цифровой информации: учебное пособие для вузов. М.: Сов. Радио, 1976. 368 с.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2020;  
переработанный вариант – 03.11.2020.*

### **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](mailto: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](mailto:krivolapov@sibsutis.ru).

## **On the characteristics of the phase direction finder of the hydroacoustic system drive for delivering autonomous uninhabited underwater vehicle**

**V. Arsent'ev, G. Krivolapov**

The navigation characteristics of a phase direction finder with an ultra-short base of a hydroacoustic system delivering an autonomous uninhabited underwater vehicle to a given underwater object using two delivery scenarios are considered.

*Keywords:* autonomous uninhabited underwater vehicle, hydroacoustic phase direction finder, drive scenarios, efficiency of positioning underwater objects.