

Гидроакустический фазовый пеленгатор с амплитудно-модулированным навигационным сигналом

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассматривается фазовый пеленгатор с ультракороткой базой и использованием амплитудно-модулированного навигационного сигнала, обладающий расширенными функциональными возможностями в системах позиционирования подводных объектов, размещаемых на различных надводных и подводных носителях.

Ключевые слова: гидроакустический фазовый пеленгатор, амплитудно-модулированный навигационный сигнал, процедуры демодуляции навигационного сигнала, эффективность позиционирования подводного объекта.

1. Введение

В публикациях [1], [2] рассмотрен способ гидроакустического позиционирования подводного объекта, в котором надводное судно оснащается четырёхэлементной пеленгационной антенной диаметрально-ортогональной (ДО) геометрии, а запрашиваемый подводный объект передаёт на надводное судно комбинированный сигнал, состоящий из навигационного и информационного блоков. Соответствующая обработка этого сигнала позволяет определять параметры местоположения подводного объекта относительно надводного судна: пеленг φ , угол места θ , дальность d , наклонное расстояние r_H и получать от объекта необходимые информационные сообщения. Параметры местоположения связаны между собой соотношениями: $d = h / \operatorname{tg}\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)$, $r_H = \sqrt{h^2 + d^2}$, где h – глубина погружения подводного объекта.

В статье [3] рассмотрены характеристики фазового пеленгатора, базирующегося на алгоритме позиционирования способа [2], с использованием четырёхэлементной антенны двух эффективных геометрий при решении комплексных задач наблюдения подводных объектов и управления движением различных подводных аппаратов.

Линейные размеры антенны указанного фазового пеленгатора выбираются из условия обеспечения фазовой однозначности пеленгования подводного объекта:

$$A_{ij} \leq \frac{c_{\min}}{2f_0}; i, j = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где A_{ij} – расстояние между i -м и j -м приёмными гидрофонами антенны для сочетаний пар гидрофонов i и j , которые используются в алгоритме позиционирования; c_{\min} – минимально возможная скорость распространения звука в морской среде; f_0 – частота гармонических колебаний используемого навигационного сигнала.

Техническая реализация алгоритма позиционирования подводного объекта предполагает выбор габаритов и геометрических параметров пеленгационной антенны, обеспечивающих,

во-первых, её приемлемую технологическую установку на надводные или подводные носители разных классов и размеров; во-вторых, примерно одинаковый характер изменения погрешностей оценки угловых координат объекта позиционирования по всем возможным направлениям его движения в водной среде; в-третьих, достаточно высокую точность определения самих угловых координат подводного объекта в процессе определения его местоположения.

Указанные обстоятельства существенно ограничивают функциональные возможности рассматриваемого гидроакустического фазового пеленгатора по частотному диапазону используемого навигационного сигнала. Так, например, в области частот навигационного сигнала выше 5 кГц пеленгационная антенна становится технически нереализуемой вследствие очень малых линейных размеров, необходимых для выполнения условия (1).

Исходя из требований приемлемой технологической установки антенны фазового пеленгатора на различных носителях и характера изменения погрешностей вычисления угловых координат объекта позиционирования по всем возможным направлениям его движения в водной среде, можно рекомендовать к использованию четырёхэлементную пеленгационную антенну диаметрально-ортогональной геометрии [3], у которой размеры между парами приёмных гидрофонов в горизонтальной плоскости в два раза превышают размеры между парами гидрофонов в вертикальной плоскости.

Для обеспечения работы фазового пеленгатора в широком диапазоне частот и устранения неопределённости позиционирования при формировании навигационного сигнала позиционируемого объекта целесообразно использовать процедуру амплитудной модуляции высокочастотных несущих колебаний низкочастотным модулирующим тональным сигналом, широко применяемую в фазовой дальнометрии [4]. При этом частота F_m модулирующего тонального сигнала определяется из условия фазовой однозначности пеленгования подводного объекта на низкой частоте, не связанной с частотой колебаний более высокочастотного переносчика навигационного сигнала:

$$F_m \leq \frac{c_{\min}}{2A}, \quad (2)$$

где A – расстояние между парами приёмных гидрофонов пеленгационной антенны диаметрально-ортогональной геометрии в горизонтальной плоскости, обеспечивающее её приемлемую технологическую установку на надводные или подводные носители используемых классов и размеров.

Следует заметить, что эффективность позиционирования подводного объекта при использовании фазового пеленгатора с амплитудно-модулированным навигационным сигналом, функционирующего в широком частотном диапазоне используемого навигационного сигнала, зависит ещё и от выбора процедуры демодуляции последнего.

В статье путём моделирования в математической среде Mathcad оценивается сравнительная эффективность определения местоположения подводного объекта при использовании в фазовом пеленгаторе двух процедур демодуляции амплитудно-модулированного навигационного сигнала: линейного детектирования и синхронного гетеродинирования, даются рекомендации по выбору общей структуры фазового пеленгатора для возможных практических приложений в различных системах гидроакустического позиционирования.

2. Характеристики навигационного сигнала

Модулируемая гармоническая несущая амплитудно-модулированного (АМ) навигационного сигнала:

$$u_0(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

где U_0 , f_0 , φ_0 – амплитуда, частота и начальная фаза колебаний гармонической несущей навигационного сигнала соответственно.

Модулирующий гармонический сигнал при однотоновой модуляции:

$$u_m(t) = U_m \cos(2\pi F_m t + \varphi_m), \quad (4)$$

где U_m , F_m , φ_m – амплитуда, частота и начальная фаза колебаний гармонического модулирующего сигнала соответственно.

Амплитудно-модулированный навигационный сигнал ($f_0 \gg F_m$):

$$u_{ам}(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + \frac{mU_0}{2} \cos[2\pi(f_0 - F_m)t + \varphi_0 - \varphi_m] + \frac{mU_0}{2} \cos[2\pi(f_0 + F_m)t + \varphi_0 + \varphi_m]; \quad m = \frac{\Delta U_0}{U_0}; \quad m \leq 1, \quad (5)$$

где m – глубина модуляции гармонической несущей навигационного сигнала, ΔU_0 – максимальное приращение амплитуды колебаний модулируемой гармонической несущей навигационного сигнала.

Полоса частот АМ навигационного сигнала:

$$\Delta f_{ам} = (f_0 + F_m) - (f_0 - F_m) = 2F_m. \quad (6)$$

Средняя за период T модулирующего сигнала мощность амплитудно-модулированного навигационного сигнала:

$$P_{ам} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_0^2 [1 + m \cos(2\pi F_m t + \varphi_m)]^2}{2} dt = \frac{U_0^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right). \quad (7)$$

Отношение сигнал/шум принимаемого АМ навигационного сигнала:

$$h_{ам}^2 = \frac{P_{ам}}{\sigma_{ш}^2} = \frac{U_0^2 \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)}{2\sigma_{ш}^2}, \quad (8)$$

где $\sigma_{ш}^2$ – дисперсия шума морской среды в полосе частот $\Delta f_{ам}$ принимаемого навигационного сигнала.

3. Демодуляция навигационного сигнала

Линейное детектирование АМ навигационного сигнала

В работе [5] показано, что отношение сигнал/шум $h_{лд}^2$ после линейного детектирования АМ навигационного сигнала в условиях приёма $h_{ам}^2 \geq 0$ дБ с достаточным приближением определяется соотношением:

$$h_{лд}^2 \approx 2h_{ам}^2. \quad (9)$$

Гетеродинирование АМ навигационного сигнала

Гармонический сигнал гетеродина для преобразования на модулирующую частоту навигационного сигнала парциального тракта приёма фазового пеленгатора в условиях априорно известной частоты несущей ($f_\Gamma = f_0$) модулированного навигационного сигнала имеет вид:

$$u_\Gamma(t) = U_\Gamma \cos(2\pi f_0 t + \varphi_\Gamma), \quad (10)$$

где U_Γ , f_0 , φ_Γ – амплитуда, частота и начальная фаза колебаний гармонического сигнала гетеродина соответственно.

Навигационный АМ-сигнал парциального тракта приёма фазового пеленгатора после гетеродинирования на частоту F_m характеризуется зависимостью:

$$u_{пр}(t) = u_{ам}(t) \cdot u_\Gamma(t) = \frac{mU_0U_\Gamma}{2} \cos(\varphi_\Gamma - \varphi_0) \cos(2\pi F_m t + \varphi_m). \quad (11)$$

Для получения максимально эффективного преобразования частоты, исключая зависимость уровня $u_{\text{пр}}(t)$ от значений начальных фаз φ_T и φ_0 сигналов гетеродина и несущей принимаемого АМ-сигнала, необходимо выполнять процедуру подстройки фазы сигнала гетеродина под начальную фазу несущей АМ-сигнала в каждом парциальном тракте приёма, обеспечивая приближённое равенство $\varphi_T - \varphi_0 \approx 0$ и осуществляя тем самым синхронное гетеродинирование навигационного сигнала.

Указанная процедура реализуется путём синфазирования [6] сигналов гетеродина и несущей принимаемого АМ навигационного сигнала в каждом парциальном тракте приёма. При этом глубину модуляции несущей навигационного сигнала желательно обеспечивать на уровне $m \approx 0.4 - 0.5$.

Для уменьшения времени выполнения операций в процедуре синфазирования её техническую реализацию целесообразно осуществлять на аналоговой элементной базе. Пример такой технической реализации процедуры синфазирования в фазовом пеленгаторе с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала в одном парциальном тракте приёма показан на рис. 1, где обозначены: 1 – четырёхэлементная пеленгационная антенна, 2 – усилители сигналов пеленгационной антенны, 3 – высокостабильный гетеродин, 4 – формирователь аналоговых квадратурных сигналов, 5 – аналоговые четырёхквadrантные перемножители, 6 – дискретные перемножители, 7 – аналоговые интеграторы (интегрирующие RC-цепи), 8 – аналоговый сумматор, 9 – амплитудные ограничители, 10 – вычитающее устройство, 11 – преобразователь частоты (четырёхквadrантный перемножитель с полосовым фильтром).

Представленный градиентный алгоритм синфазирования двух сигналов (на входах преобразователя 11 частоты) базируется на минимизации их разности на выходе вычитающего устройства 10 путём итеративной квадратурной весовой обработки. Точность синфазирования зависит от выбора параметров цепей корреляционных обратных связей устройства.

В статье [6] рассмотрен метод повышения точности измерения разности фаз гармонических сигналов в линейных трактах с квазибелым шумом, использующий гетеродинирование, при этом основополагающим требованием является необходимость обеспечения полосы частот преобразовательных трактов, превышающей величину промежуточной частоты преобразования.

Оценим эффективность указанного метода при демодуляции АМ навигационного сигнала с использованием синхронного гетеродинирования. Реализация метода применительно к демодуляции АМ навигационного сигнала потребует расширения полосы частот парциальных трактов приёма фазового пеленгатора:

$$\Delta f_{\text{пт}} = Q \Delta f_{\text{ам}}; \quad Q = \frac{\Delta f_{\text{пт}}}{\Delta f_{\text{ам}}}; \quad Q > 1, \quad (12)$$

где $\Delta f_{\text{пт}}$ – полоса частот парциальных трактов приёма фазового пеленгатора, Q – коэффициент расширения полосы частот, $\Delta f_{\text{ам}}$ – полоса частот АМ навигационного сигнала.

Полоса частот полосовых фильтров преобразователей частоты при синхронном гетеродинировании сигналов парциальных трактов приёма определяется зависимостью:

$$\Delta F_{\text{ст}} = Q \frac{\Delta f_{\text{ам}}}{2} - F_m = (Q - 1) F_m, \quad (13)$$

где F_m – частота модулирующего гармонического сигнала.

Отношение сигнал/шум после синхронного гетеродинирования АМ навигационного сигнала в каждом парциальном тракте приёма можно представить в следующем виде:

$$h_{\text{ст}}^2 = g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot g_4 \cdot h_{\text{ам}}^2, \quad (14)$$

где g_1, g_2, g_3, g_4 – коэффициенты, учитывающие: g_1 – снижение отношения сигнал/шум за счёт расширения полосы частот приёмных трактов пеленгатора, g_2 – увеличение отношения сигнал/шум за счёт сужения полосы частот при гетеродинировании, g_3 – снижение отношения

сигнал/шум за счёт увеличения мощности шума при гетеродинировании, g_4 – увеличение отношения сигнал/шум за счёт когерентного сложения колебаний боковых частот АМ-сигнала при гетеродинировании.

Величины указанных коэффициентов определяются соответственно:

$$g_1 = \frac{\Delta f_{\text{ам}}}{Q\Delta f_{\text{ам}}} = \frac{1}{Q}; \quad g_2 = \frac{Q\Delta f_{\text{ам}}}{\Delta F_{\text{сг}}} = \frac{2Q}{Q-1}; \quad g_3 = \frac{1}{2}; \quad g_4 = 2, \quad (15)$$

тогда отношение сигнал/шум после синхронного гетеродинирования навигационного сигнала будет равно

$$h_{\text{сг}}^2 = \frac{2h_{\text{ам}}^2}{Q-1} \approx \frac{h_{\text{лд}}^2}{Q-1}. \quad (16)$$

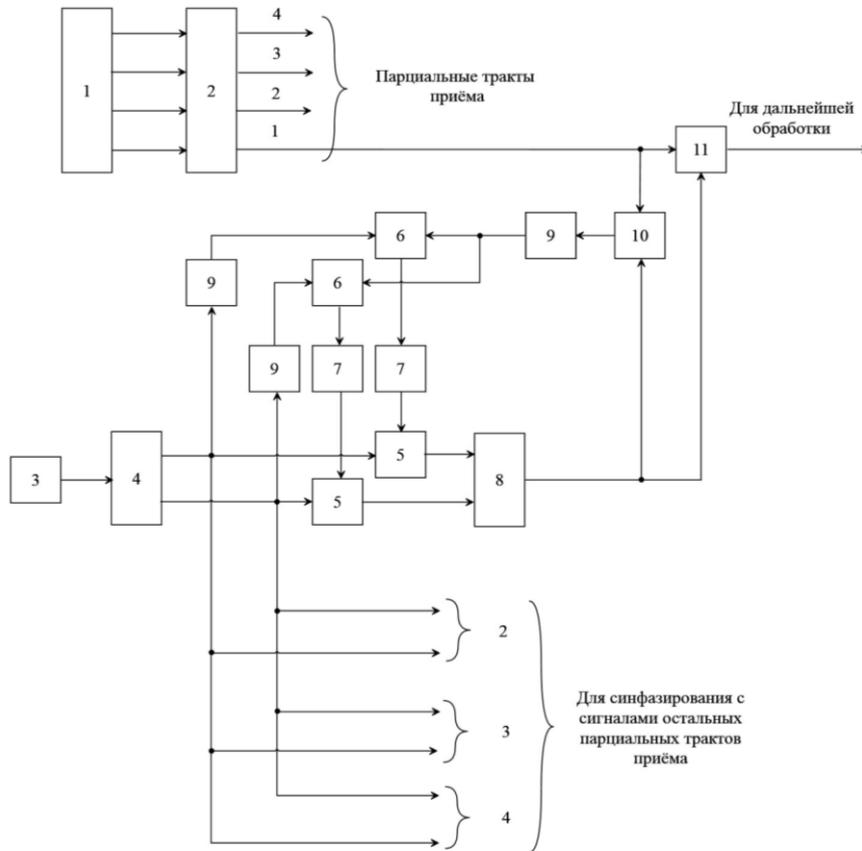


Рис. 1. Обобщённая структура устройства синфазирования сигнала гетеродина фазового пеленгатора

Из соотношения (16) видно, что для $Q > 2$ расширение полосы частот парциальных трактов приёма фазового пеленгатора при синхронном гетеродинировании приводит к снижению отношения сигнал/шум демодулированного навигационного сигнала, но это вовсе не означает, что дальнейшая его обработка с использованием метода, рассмотренного в статье [6], приведёт к ухудшению точности позиционирования подводного объекта, что и подтверждается результатами моделирования.

4. Базовый функционал фазового пеленгатора

Состав функциональных операций (без операций калибровки парциальных трактов приёма) и порядок их выполнения в процессе позиционирования подводного объекта при линейном детектировании АМ навигационного сигнала и использовании в фазовом пеленгаторе четырёхэлементной антенны ДО-геометрии [3] представлены на рис. 2.

Указанные функциональные операции не требуют особых пояснений, а процедура измерения разностей фаз детектированных сигналов 1–2, 1–3, 1–4 парциальных трактов приёма осуществляется с использованием цифрового квадратурного метода, достаточно подробно описанного в статье [6].



Рис. 2. Функциональные операции при позиционировании подводного объекта с линейным детектированием навигационного сигнала

Состав функциональных операций и порядок их выполнения в процессе позиционирования подводного объекта при синхронном гетеродинировании АМ навигационного сигнала и использовании в фазовом пеленгаторе вышеуказанной четырёхэлементной антенны диаметрально-ортогональной геометрии приведены на рис. 3.



Рис. 3. Функциональные операции при позиционировании подводного объекта с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала

Представленные функциональные операции при позиционировании подводного объекта позволяют дать рекомендации по выбору общей структуры фазового пеленгатора для возможных практических приложений в различных системах гидроакустического позиционирования.

Фазовый пеленгатор с линейным детектированием навигационного сигнала и относительно несложной технической реализацией целесообразно использовать в системах гидроакустического приведения автономных необитаемых подводных аппаратов к заданным подводным объектам причаливания, где имеют место небольшие наклонные расстояния между позиционируемыми подводными объектами и не представляет трудностей обеспечение достаточно больших отношений сигнал/шум навигационного сигнала в процессе позиционирования взаимодействующих объектов.

Фазовый пеленгатор с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала и усложнённой технической реализацией имеет смысл применять в системах гидроакустического поиска с надводных судов донных подводных объектов (автономных необитаемых подводных аппаратов, подводных роботов, донных станций мониторинга), при этом в процессе гидроакустического поиска могут наблюдаться значительные наклонные расстояния между позиционируемыми объектами и малые отношения сигнал/шум навигационного сигнала в процессе позиционирования взаимодействующих объектов.

Не исключается возможность совмещения в одном фазовом пеленгаторе универсального назначения двух подсистем демодуляции АМ навигационного сигнала, значительно расширяющих область его функционального применения.

5. Эффективность позиционирования подводного объекта

Эффективность позиционирования оценивалась по точности определения угловых координат подводного объекта относительно надводного судна в зависимости от отношения сигнал/шум излучаемого с подводного объекта АМ навигационного сигнала при использовании в процессе позиционирования фазовых пеленгаторов с линейным детектированием и синхронным гетеродинированием навигационного сигнала.

Исходные данные для моделирования задавались исходя из приемлемых условий судового конструктивного размещения пеленгационной антенны, наиболее вероятных сценариев относительного позиционирования надводного судна и подводного объекта, а также необходимой точности определения угловых координат подводного объекта в процессе его позиционирования.

Несущая частота навигационного сигнала подводного объекта $f_0 = 30$ кГц, частота модулирующего сигнала при однотоновой амплитудной модуляции $F_m = 1$ кГц.

Полоса частот излучаемого навигационного сигнала $\Delta f_{ам} = 2$ кГц, границы полосы пропускания полосового фильтра линейного детектора фазового пеленгатора с линейным детектированием навигационного сигнала – в пределах от 950 до 1050 Гц.

Коэффициенты расширения полосы частот $\Delta f_{пт}$ парциальных трактов приёма фазового пеленгатора с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала $Q = 1.1, 2, 5$.

Расстояние между парами приёмных гидрофонов судовой пеленгационной антенны диаметрально-ортогональной геометрии в горизонтальной плоскости – 0.5 м, в вертикальной плоскости – 0.25 м.

Диапазон изменения пеленгов позиционируемого подводного объекта $\varphi = 0^0 \dots 360^0$, углов места $\theta = 10^0 \dots 70^0$, наклонных расстояний от надводного судна до позиционируемого подводного объекта $r_n = 50 \dots 3000$ [м].

Морская акватория при акустическом контакте между надводным судном и позиционируемым подводным объектом условно разделена на ближнюю ($r_H = 50$ м, $\theta = 70^0$) и дальнюю ($r_H = 3000$ м, $\theta = 10^0$) зоны пеленгования.

Квазибелый шум морской среды, формируемый в полосе частот приёма навигационного сигнала, имеет нормальное вероятностное распределение, нулевое среднее значение и заданную дисперсию, пределы изменения отношения сигнал/шум навигационного сигнала на приёме $h_{ам}^2 = 0 \dots 30$ [дБ].

Пеленг φ (относительно выбранного направления в системе координат антенны фазового пеленгатора) и угол места θ (относительно горизонтали при вертикальной стабилизации антенны) позиционируемого подводного объекта определяются на основе следующих тригонометрических соотношений:

$$\varphi = \begin{cases} \arccos \left(\frac{-\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), & \text{если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), & \text{если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} < 0 \end{cases}; \quad (17)$$

$$[0 \leq \varphi < 2\pi];$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + (\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right) - \frac{\pi}{2}; \quad (18)$$

$$[0 < \theta < \frac{\pi}{2}],$$

где $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ – инструментально измеренные разности фаз модулирующего тонального сигнала (после демодуляции АМ навигационного сигнала) для трёх пар (1–2, 1–3, 1–4) парциальных трактов приёма фазового пеленгатора.

Оценка максимальной погрешности вычисления разностей фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ демодулированного навигационного сигнала позиционируемого подводного объекта на выходах трёх пар гидрофонов судовой пеленгационной антенны производится методом статистических испытаний с использованием 15 независимых реализаций формируемого квазибелого шума.

Вычисление указанных разностей фаз в фазовом пеленгаторе с линейным детектированием навигационного сигнала осуществляется с использованием цифрового квадратурного метода [6], а в пеленгаторе с синхронным гетеродинированием – с добавлением процедуры синфазирования; усреднения для операций вычисления разностей фаз и коэффициентов синфазирования [6] выполняются по 100 периодам колебаний демодулированного навигационного сигнала.

Количество отсчётов k на периоде гармонических колебаний демодулированного навигационного сигнала и общее число отсчётов L в выборке при вычислении угловых координат подводного объекта относительно надводного судна выбраны соответственно $k = 3.6 \cdot 10^3$, $L = 3.6 \cdot 10^5$.

Относительное расхождение частот несущей навигационного сигнала и гетеродина фазового пеленгатора при синхронном гетеродинировании выбрано равным $2 \cdot 10^{-3}$, что соответствует варианту гидроакустического позиционирования с возможной радиальной скоростью движения надводного судна относительно позиционируемого подводного объекта 3 м/с.

На рис. 4 показаны зависимости максимальной по модулю абсолютной погрешности оценок разностей фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ (в диапазоне их возможного изменения: $-180^0 \dots +180^0$)

от отношения сигнал/шум $h_{\text{ам}}^2$ на приёме для сравниваемых пеленгаторов с линейным детектированием и синхронным гетеродинированием навигационного сигнала при трёх значениях коэффициента расширения полосы частот парциальных трактов приёма: $Q = 1.1, 2, 5$.

Из рис. 4 видно, что в пеленгаторе с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала точность оценок разностей фаз выше, чем в пеленгаторе с линейным детектированием. В зависимости от отношения сигнал/шум в диапазоне значений от 0 до 30 дБ точность оценок может повышаться от двух до пяти раз. Кроме того, важным результатом моделирования является отсутствие зависимости точности оценок разностей фаз от расширения полосы частот парциальных трактов приёма пеленгатора с синхронным гетеродинированием – существуют лишь некоторые отличия на уровне погрешностей моделирования второго порядка малости. Это свидетельствует о неочевидном, на первый взгляд, эффекте взаимного уравновешивания противоположно направленных изменений отношения сигнал/шум: уменьшения – за счёт расширения полосы частот парциальных трактов приёма пеленгатора, увеличения – за счёт сужения полосы частот при гетеродинировании и когерентного накопления отсчётов демодулированных сигналов в процедуре синфазирования [6].

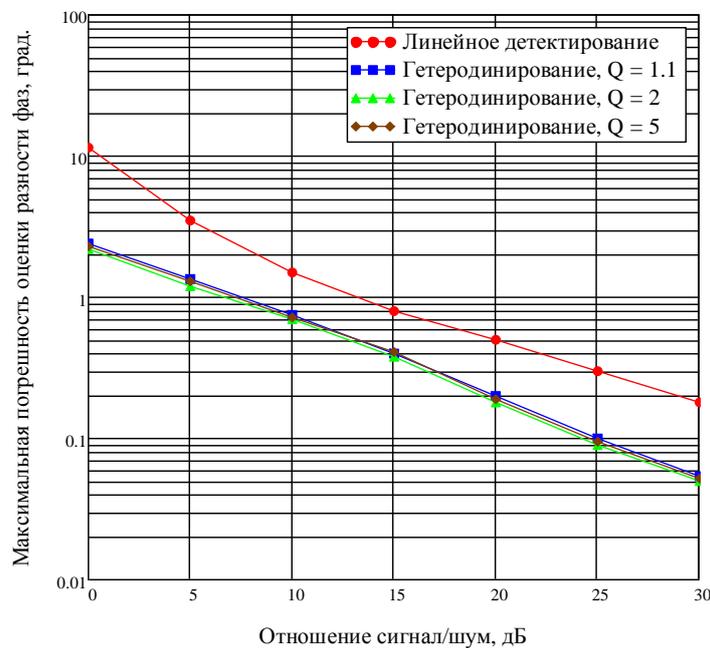


Рис. 4. Погрешности оценок разностей фаз навигационного сигнала в сравниваемых фазовых пеленгаторах

На рис. 5 представлены предельные (по модулю) абсолютные погрешности позиционирования подводного объекта пеленгатором с линейным детектированием навигационного сигнала для ближней и дальней зон гидроакустического пеленгования. Здесь и далее в расчётах представленные предельные погрешности позиционирования характеризуют максимальные из максимально возможных погрешностей позиционирования, имеющие место при таких сочетаниях значений пеленга φ , угла места θ подводного объекта, максимальных погрешностей определения разностей фаз $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{13}$, $\Delta\psi_{14}$ демодулированного навигационного сигнала позиционируемого подводного объекта на выходах трёх пар гидрофонов судовой пеленгационной антенны, а также знаков указанных погрешностей, которые приводят к наибольшим абсолютным погрешностям в операциях (17), (18) вычисления угловых координат подводного объекта для самых наихудших условий позиционирования.

Из представленных на рис. 5 зависимостей следует: точности оценок угла места подводного объекта в зонах пеленгования выше точностей оценок пеленга, точности оценок угла места подводного объекта в ближней зоне пеленгования превышают точности оценок пеленга в среднем в 2.5 раза, точности оценок угла места подводного объекта в дальней зоне пеленгования превышают точности оценок пеленга в среднем в 1.7 раза, приемлемые для различных

функциональных применений пеленгатора точности позиционирования подводного объекта обеспечиваются при отношениях сигнал/шум навигационного сигнала не менее 20 дБ.

На рис. 6 и 7 приведены предельные абсолютные погрешности позиционирования подводного объекта пеленгатором с синхронным гетеродинированием навигационного сигнала для ближней и дальней зон гидроакустического пеленгования.

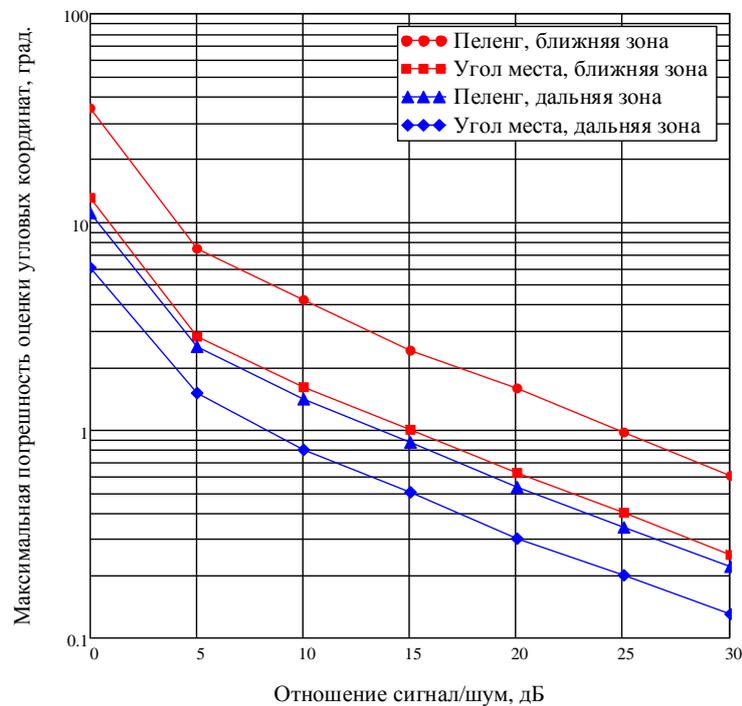


Рис. 5. Позиционирование с линейным детектированием навигационного сигнала

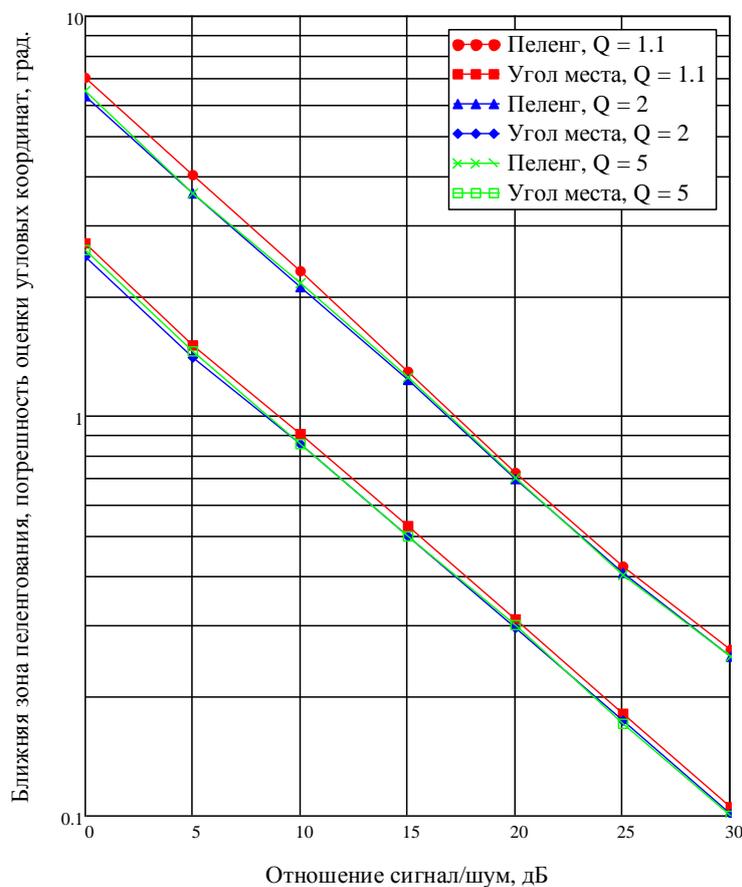


Рис. 6. Синхронное гетеродинирование навигационного сигнала, ближняя зона пеленгования

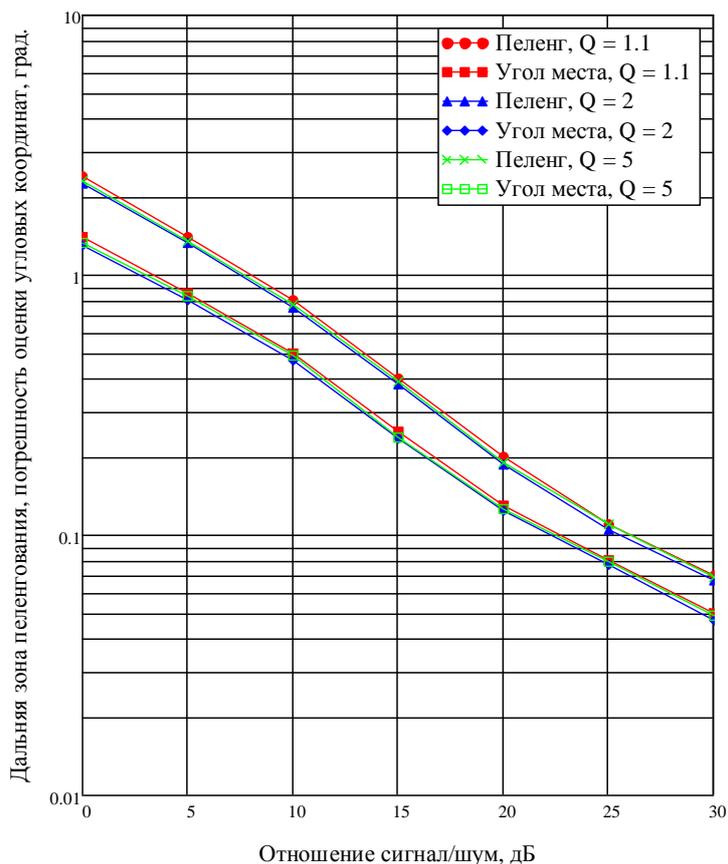


Рис. 7. Синхронное гетеродинирование навигационного сигнала, дальняя зона пеленгования

Представленные на рис. 6 и 7 зависимости показывают: точности оценок угла места подводного объекта в зонах пеленгования выше точностей оценок пеленга, точности оценок угла места подводного объекта в ближней зоне пеленгования превышают точности оценок пеленга в среднем в 2.5 раза, точности оценок угла места подводного объекта в дальней зоне пеленгования превышают точности оценок пеленга в среднем в 1.5 раза, расширение полосы частот парциальных трактов приёма пеленгатора не влияет на точность позиционирования подводного объекта, приемлемые для различных функциональных применений пеленгатора точности позиционирования подводного объекта обеспечиваются при отношениях сигнал/шум навигационного сигнала не менее 10 дБ.

Для наглядного сравнения эффективности двух типов пеленгаторов на рис. 8 отражено повышение точности позиционирования подводного объекта при использовании пеленгатора с синхронным гетеродинированием по отношению к пеленгатору с линейным детектированием навигационного сигнала.

Представленные на рис. 8 результаты моделирования характеризуют, в зависимости от отношения сигнал/шум навигационного сигнала, следующие тенденции и количественные показатели процесса позиционирования подводного объекта: повышение точности позиционирования подводного объекта при уменьшении отношения сигнал/шум, повышение точности оценок пеленга подводного объекта в ближней зоне пеленгования на 0.4 – 28 градусов, повышение точности оценок угла места подводного объекта в ближней зоне пеленгования на 0.14 – 10.5 градусов, повышение точности оценок пеленга подводного объекта в дальней зоне пеленгования на 0.15 – 8.7 градусов, повышение точности оценок угла места подводного объекта в дальней зоне пеленгования на 0.08 – 4.7 градусов, наибольший прирост точности оценок угловых координат позиционируемого подводного объекта наблюдается в области изменения отношений сигнал/шум от 0 до 5 дБ.

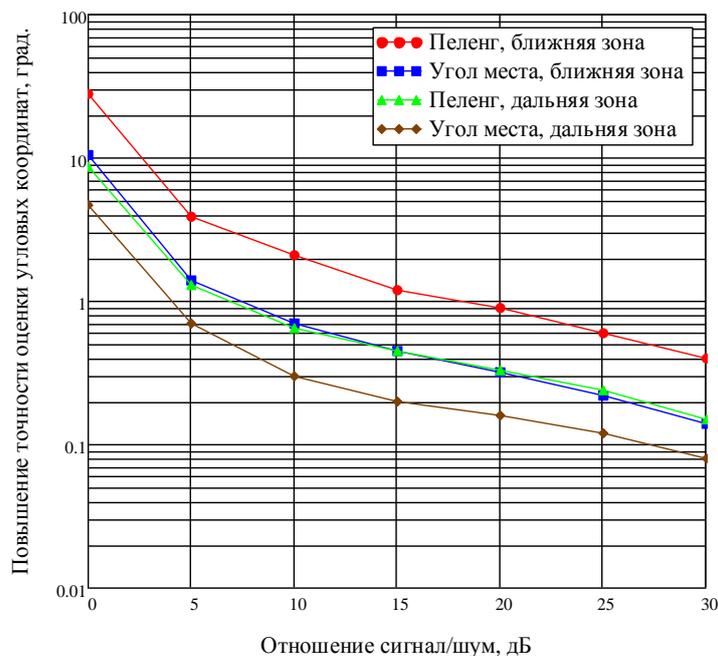


Рис. 8. Повышение точности позиционирования при использовании пеленгатора с синхронным гетеродинамированием навигационного сигнала

6. Заключение

Использование амплитудно-модулированного навигационного сигнала расширяет функциональные возможности гидроакустического фазового пеленгатора с ультракороткой базой в системах позиционирования подводных объектов, размещаемых на различных надводных и подводных носителях.

В фазовом пеленгаторе с синхронным гетеродинамированием навигационного сигнала точность оценок разностей фаз выше, чем в пеленгаторе с линейным детектированием. В зависимости от отношения сигнал/шум в диапазоне значений от 0 до 30 дБ точность оценок может повышаться от двух до пяти раз.

Достаточные для различных функциональных применений точности позиционирования подводного объекта обеспечиваются в фазовом пеленгаторе с линейным детектированием навигационного сигнала при отношениях сигнал/шум не менее 20 дБ, а в фазовом пеленгаторе с синхронным гетеродинамированием навигационного сигнала – не менее 10 дБ.

Литература

1. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
2. Патент РФ 2709100, МПК G01S 1/72. Способ определения местоположения подводного объекта / В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов, А. Е. Малашенко, Д. Д. Минаев. Заявка 2018122532, заявлено 19.06.2018, опубликовано 16.12.2019. Бюл. № 35.
3. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора // Вестник СибГУТИ. 2019. № 1. С. 92–101.
4. Фазовые методы дальнометрии [Электронный ресурс]. URL: https://studwood.ru/2174682/tehnika/fazovye_metody_dalnometrii (дата обращения: 11.02.2021).

5. Совместное воздействие гармонического сигнала и гауссовского шума на амплитудный детектор [Электронный ресурс]. URL: http://scask.ru/q_book_g_rts.php?id=120 (дата обращения: 11.02.2021).
6. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Измерение разности фаз гармонических сигналов в линейных трактах с квазибелым шумом // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 21–31.

Статья поступила в редакцию 11.02.2021.

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.

Hydroacoustic phase direction finder with amplitude-modulated navigation signal

V. Arsent'ev, G. Krivolapov

We consider a phase direction finder with an ultrashort base and the use of an amplitude-modulated navigation signal. It has advanced functionality in positioning systems for underwater objects placed on various surface and underwater carriers.

Keywords: hydroacoustic phase direction finder, amplitude-modulated navigation signal, navigation signal demodulation procedures, underwater object positioning efficiency.