

УДК 534.222.2

**В.Ю. Волошенко, В.И. Тимошенко****ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА С  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ МАЯКАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОГО ПЛАВАНИЯ СУДОВ**

Перспективные задачи исследования обширных площадей мелководного Арктического шельфа России и освоения месторождений сырьевых ресурсов могут быть успешно решены при прокладке оптимальных маршрутов подводной и надводной транспортной системы, использование которой требует разработки специализированных средств судовождения для обеспечения безопасного плавания по заданному фарватеру, обозначенному донными гидроакустическими маяками. Известен проект навигационного обеспечения плавания по заданному фарватеру значительной протяженности за счет установки и использования гидроакустических маяков на трассе трансарктических переходов подводных танкеров от нефтеносных районов Аляски до северных берегов Норвегии и Исландии [1]. Маршруты переходов проходят через районы Северного полюса, морей Бофорта и Баффина, имеющие помимо ледового покрова большой мощности сложный рельеф дна, причем оптимальный маршрут между Аляской и Норвегией имеет рельеф глубин от 90 до 1800 м и толщину льда до 30 м. Исходя из предельной дальности связи с гидроакустическими маяками, составляющей в арктических морях около (7-8) км, предложен вариант расстановки групп маяков на восьми участках трассы, что обеспечивает возможность пересечения Северного Ледовитого океана за 144 ч при средней скорости 14 узлов (7 м/с). Несмотря на сложность взаимной координации маяков и необходимость их периодической замены, оборудование трансарктического маршрута гидроакустическими маяками считается экономически целесообразным, а способ местоопределения с помощью маяков признается наиболее важным и надежным способом навигационного обеспечения в условиях подводного плавания в Арктике. К недостаткам данного проекта следует отнести малую точность пеленгации гидроакустических маяков при движении танкера, что приводит к ошибке счисления пройденного пути, сопоставимой с предельной дальностью связи с гидроакустическими маяками. В свете вышесказанного разработка и проектирование навигационных средств, способных обеспечивать получение более полного и точного объема первичных данных о расположении как подводных, так и надводных объектов-носителей навигационных систем в море относительно установленных на дне гидроакустических маяков, является актуальной задачей.

Особенности электронно-акустической аппаратуры маяков подробно рассмотрены в [1, 2]. Так, как правило, характеристика направленности (ХН) обратной акустической интерференционной антенны маяка не регулируется и диапазон изменения рабочих частот невелик, а выбор формы ХН определяется глубиной установки маяка: для больших глубин – коническая, для малых – в виде верхней полусферы, причем изменение формы достигается применением отражающих конструкций. По мнению автора, гидроакустические маяки должны обеспечивать излучение нескольких рабочих сигналов с достаточно сильно отличающимися частотами (низкой, средней и высокой – в пределах диапазона 20–200 кГц) при наличии одной акустической излучающей антенны. Это может быть осуществлено при использовании параметрической излучающей антенны, формирующей в водной среде несколько акустических полей – накачки (средняя рабочая частота), сигналов

разностной частоты (низкая рабочая частота) и сигналов суммарной частоты, вторых гармоник накачки (высокая рабочая частота). Нелинейное взаимодействие сигналов накачки с частотами  $f_1, f_2$  в канале распространения, результатом которого является параметрическая генерация акустических сигналов как разностной  $F = f_2 - f_1$ , так и суммарной  $f_+ = f_2 + f_1$  частот, вторых гармоник  $2f_1, 2f_2$  волн накачки, позволяет разделить в пространстве процессы преобразования электрической энергии в акустическую (электроакустический преобразователь маяка) и формирования направленного излучения (протяженный участок среды, в котором взаимодействуют мощные акустические волны, длиной в десятки или сотни метров, – объемная «бестелесная» антенна, в которой распределены нелинейные источники данных акустических сигналов), в результате чего при небольших поперечных размерах электроакустического преобразователя удастся получить излучение акустических сигналов комбинационных частот  $F = f_2 - f_1, f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$  в пределах небольших телесных углов при практически полном отсутствии бокового поля [3].

Рассматриваемая параметрическая навигационная система (рис. 1) содержит маяк (на рисунке представлена структурная схема только излучающего тракта), а также приемную бортовую аппаратуру судна-носителя устройства, функционально включающую в себя три приемных тракта, с помощью которых измеряется пеленг (угол места, курсовой угол) на маяк, рассчитывается дистанция до него и определяются параметры движения объекта-носителя устройства при маневрировании на малых удалениях от маяка. Общими блоками для этих приемных трактов являются две группы акустических преобразователей 7, 8, имеющих идентичные диаграммы направленности без дополнительных максимумов, акустические оси которых сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\theta_{см}$  (относительно их равносигнального направления на угол  $\theta_{см}$ ) и расположены в вертикальной плоскости судовых координат, и компенсатор 9, соединенный с ними.

В излучающем тракте маяка все электронные блоки подключены к источнику питания 1 и генераторы 2, 3 вырабатывают высокочастотные гармонические сигналы с частотами  $f_1, f_2$ , лежащие в полосе пропускания электроакустического преобразователя 6, которые поступают на два входа хронизатора-модулятора 4, на выходе которого сформирован радиоимпульс с бигармоническим ВЧ-заполнением. Данный радиоимпульс после усилителя мощности 5 поступает на электроакустический преобразователь 6, излучающий зондирующий сигнал накачки в водную среду, обладающую нелинейностью своих упругих характеристик. При этом происходит нелинейное взаимодействие сигналов накачки с частотами  $f_1, f_2$  в канале распространения, результатом которого является параметрическая генерация акустических сигналов как разностной  $F = f_2 - f_1$ , так и суммарной  $f_+ = f_2 + f_1$  частот, вторых гармоник  $2f_1, 2f_2$  волн накачки. Маяк осуществляет излучение в импульсном режиме, формируя в водной среде акустические пучки данных волн, сориентированные в пространстве вдоль соответствующего участка трассы перехода в направлении подхода судна-носителя с бортовой аппаратурой, т.е. обеспечивает направленную акустическую «подсветку» в водной среде на нескольких рабочих сигналах с достаточно сильно отличающимися частотами.

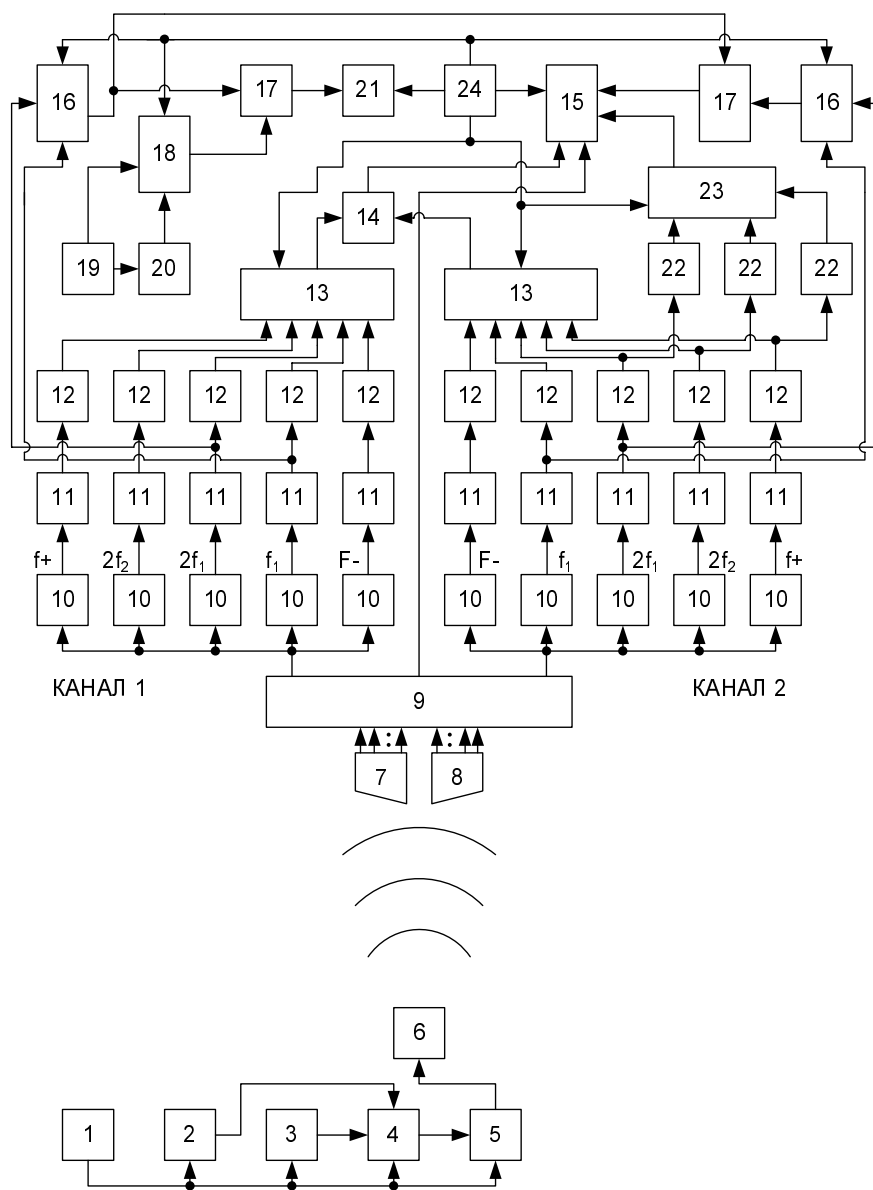


Рис. 1. Структурная схема параметрической навигационной системы

Учитывая, что прием сигналов и уточнение данных о расположении маяка связаны с перемещением судна-носителя со скоростью  $v$  относительно него, то при их приеме группами преобразователей 7, 8 происходит доплеровское изменение их частот. Известно, что при движении приемника относительно неподвижного источника сигнала с частотой  $f$  измененная частота принимаемого сигнала будет равна

$$f' = f(1 - v \cdot \cos \vartheta / c) = f - v \cdot f \cdot \cos \vartheta / c = f \pm f_D, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в воде,  $\vartheta$  – угол между направлением скорости приемника и направлением от источника к приемнику, причем, если угол  $\vartheta$  тупой, то принимаемая частота повышается (знак +), при  $\vartheta = 90^\circ$  излучаемая и принимаемая частоты будут одинаковы, а если угол  $\vartheta$  острый, то принимаемая частота понижается (знак –) [4].

При распространении в среде полигармонический акустический сигнал с частотами  $f_1, f_2, F = f_2 - f_1, f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$  достигает двух групп акустических преобразователей 7, 8 движущегося со скоростью  $v$  судна-носителя, претерпевая для каждой гармонической компоненты соответствующий доплеровский сдвиг частоты  $(\pm f_{D(f_1)}), (\pm f_{D(2f_1)}), (\pm f_{D(f_2)}), (\pm f_{D(2f_2)}), (\pm F_D), (\pm f_{D(f_+)})$ , причем для каждой группы 7 и 8 (канал 1 и 2) различие сдвигов частот определено различием значений углов  $\vartheta_{1,2}$  между направлением скорости судна-носителя и направлениями от источника к приемникам вследствие того, что центры групп преобразователей 7,8 разнесены в пространстве, а их акустические оси, расположенные в вертикальной плоскости судовых координат, сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\theta_{cm}$ . Электрические сигналы с двух групп акустических преобразователей 7,8, соответствующие принятому акустическому полигармоническому сигналу через компенсатор 9, поступают на входы первого и второго каналов обработки, которые содержат по пять цепочек в каждом из последовательно включенных полосовых фильтров (10), настроенных на частоты  $(f_1), (2f_1), (2f_2), (F), (f_+)$ , усилителей (11) и детекторов (12), на выходах которых для каждой из частот в первом и втором каналах вырабатываются видеоимпульсные напряжения  $U_{1F}, U_{1(f_1)}, U_{1(f_2)}, U_{1(2f_1)}, U_{1(2f_2)}, U_{1(f_+)}$  и  $U_{2F}, U_{2(f_1)}, U_{2(f_2)}, U_{2(2f_1)}, U_{2(2f_2)}, U_{2(f_+)}$ , амплитуды которых определяются пространственным положением диаграмм направленности (ДН) групп акустических преобразователей 7, 8 устройства на используемых рабочих сигналах относительно направления на излучающий электроакустический преобразователь 6 параметрической антенны пеленгуемого маяка. С выходов детекторов первого и второго каналов обработки соответствующие пары видеоимпульсных напряжений  $(U_{1F}$  и  $U_{2F}), (U_{1(f_1)}$  и  $U_{2(f_1)}), (U_{1(2f_1)}$  и  $U_{2(2f_1)})$  и т.д. поступают через пятиходовые аналоговые ключи 13 на входы вычитающего устройства 14, выход которого соединен со вторым входом устройства отображения информации 15. Выбор необходимой пары видеоимпульсных напряжений, поступающей на два входа вычитающего устройства 14, определяется оператором и осуществляется путем подачи соответствующего сигнала с блока управления 24 на управляющие входы аналоговых ключей 13.

Работа приемного тракта для измерения пеленга на маяк в вертикальной плоскости судовых координат основана на получении оператором двух признаков точной пеленгации: 1) минимальности амплитуды результирующего электрического сигнала  $\Delta U = U_1 - U_2$ , рассогласования первого и второго каналов на рабочих частотах устройства  $(f_1, f_2, F = f_2 - f_1, f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2)$ ; 2) минимальности доплеровского частотного сдвига  $(f_{D1K(f_1)} - f_{D2K(f_1)})$ ,

( $f_{D1K(2f_1)} - f_{D2K(2f_1)}$ ), принимаемых группами преобразователей 7 (канал 1) и 8 (канал 2) акустических сигналов кратных частот ( $f_1 \pm f_{D(f_1)}$ ), ( $2f_1 \pm f_{D(2f_1)}$ ). Функционирование приемного тракта для вычисления дистанции от судна-носителя до маяка основано на проведении вычислений оператором в соответствии с расчетными соотношениями, полученными в результате исследования основных физических закономерностей генерации высокочастотных сигналов  $f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$  в нелинейной среде параметрической антенной, в которые подставляются полученные в процессе измерений экспериментальные данные. Приемный тракт для определения параметров движения судна-носителя устройства относительно маяка позволяет оператору выполнить эту задачу на основе измерения величины доплеровского сдвига для акустических сигналов кратных частот ( $f_1 \pm f_{D(f_1)}$ ), ( $2f_1 \pm f_{D(2f_1)}$ ), принимаемых группами преобразователей 7 (канал 1).

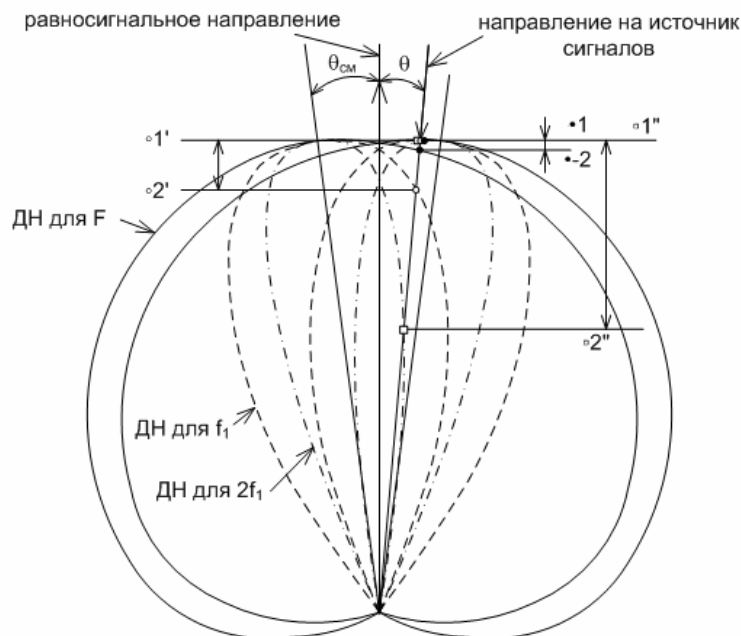


Рис. 2. Пространственное положение ДН при пеленговании методом равносигнальной зоны

Пеленгование методом равносигнальной зоны осуществляется путем определения разности видеоимпульсных напряжений  $\Delta U = U_1 - U_2$  (точки  $\bullet 1, \bullet 2, \circ 1', \circ 2', \square 1'', \square 2''$  на рис. 2) в вычитающем устройстве 14, на входы которого с выходов первого и второго каналов приемного тракта устройства на рабочих сигналах – или разностной  $F = f_2 - f_1$ , или накачки  $f_1, f_2$ , или высокочастотных  $f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$  поступают через аналоговые ключи 13 соответствующие пары видеоимпульсных напряжений, например, ( $U_{1F}$  и  $U_{2F}$ ), ( $U_{1(f_1)}$  и  $U_{2(f_1)}$ ), ( $U_{1(2f_1)}$  и  $U_{2(2f_1)}$ ) и т.д., амплитуды которых изменяются при повороте диаграмм

направленности групп акустических преобразователей 7, 8 компенсатором 9 в процессе пеленгации маяка. Перестройка компенсатора 9 может осуществляться как оператором вручную, так и автоматически с последующим слежением за маяком. При нахождении маяка на линии, проходящей через точку пересечения диаграмм направленности обеих групп акустических преобразователей и называемой линией равносигнального направления, сигналы обоих каналов равны ( $U_{1F} = U_{2F}$  и  $U_{1(f_1)} = U_{2(f_1)}$  и  $U_{1(2f_1)} = U_{2(2f_1)}$ ) и напряжение  $\Delta U$  будет равно нулю, что и будет регистрироваться устройством отображения информации 15. Напряжение, пропорциональное величине угла поворота  $\theta$  равносигнального направления антенной системы, с дополнительного выхода компенсатора 9, поступает на первый вход устройства отображения информации 15, которое индицирует информацию о угле места  $\theta_B$  пеленгуемого маяка в вертикальной плоскости. Определение направления на маяк в горизонтальной плоскости, т.е. измерение курсового угла  $\theta_T$  маяка, может быть осуществлено аналогичным приемным трактом, в котором акустические оси групп преобразователей 7, 8 расположены в горизонтальной плоскости.

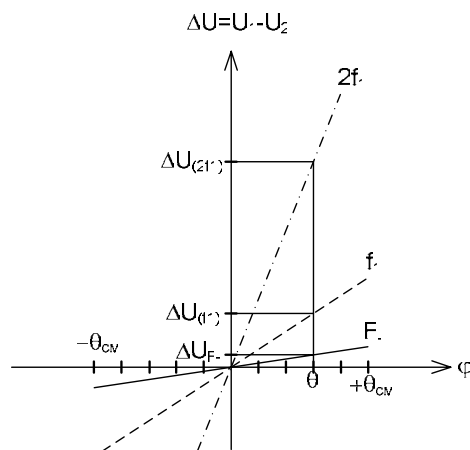


Рис. 3. Пеленгационные характеристики метода равносигнальной зоны на рабочих частотах устройства

Пеленгационные характеристики метода равносигнальной зоны на частотах  $(f_1 \pm f_{D(f_1)})$ ,  $(2f_1 \pm f_{D(2f_1)})$ ,  $(F \pm F_D)$  для предлагаемого устройства представлены на рис. 3 и обозначены пунктирной, штрих-пунктирной и сплошной линиями соответственно. Как видно из чертежа, крутизна пеленгационной характеристики  $S = dU(\theta)/d\theta$ , а следовательно, и пеленгационная чувствительность максимальны при ориентации линии равносигнального направления на маяк (в этом случае  $\Delta U = 0$ ), причем для сигнала второй гармоники  $2f_1$  пеленгационная чувствительность наивысшая, а для сигнала разностной частоты — наименьшая. Это обусловлено величиной разности видеоимпульсных напряжений  $\Delta U = U_1 - U_2$  (точки  $\bullet 1, \bullet 2, \Delta U_F, \circ 1', \circ 2', \Delta U_{f_1}, \square 1'', \square 2'', \Delta U_{2f_1}$ ) для любого угла  $\theta$  отклонения от линии равносигнального направления, что определяется обострением

основных лепестков ДН-групп акустических преобразователей 7, 8 в режиме приема для более высокочастотных сигналов.

Проиллюстрируем вышесказанное следующим численным примером. Общими блоками для всех трех приемных трактов являются две группы акустических преобразователей 7, 8, имеющих идентичные диаграммы направленности без дополнительных максимумов, которые сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\theta_{см}$  (рис. 2), где  $\theta_{см} = (0,5 - 0,7) \cdot \theta_{0,7}$ ,  $\theta_{0,7}$  – ширина характеристики направленности группы акустических преобразователей для сигнала накачки по уровню 0,7. Следует учитывать, что острота направленного действия каждой группы акустических преобразователей существенно зависит от волновых размеров их апертуры, т.е. от соотношения  $D/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны принимаемого сигнала,  $D$  – их поперечный размер. Так, например, ширина характеристики направленности  $\theta_{0,7}$  (в радианах) одного многоэлементного плоского круглого преобразователя 7 или 8 с амплитудным распределением по поверхности, описываемом соотношением  $(1 - r^2)^4$ , где  $r$  – радиальная текущая координата, отсчитываемая от центра круговой поверхности антенны, рассчитывается как отношение  $1,81 \cdot \lambda/D$  при уровне первого бокового максимума 0,9% от величины основного [5]. Тогда для диаметра преобразователя 10 см и длинах волн принимаемых сигналов –  $\lambda_F = 75$  мм (20 кГц),  $\lambda_f = 15$  мм (100 кГц) и  $\lambda_{2f} = 7,5$  мм (200 кГц) величины ширины основного лепестка по уровню 0,7  $\theta_{0,7}$  составят  $\sim 78^\circ$ ,  $16^\circ$  и  $8^\circ$  соответственно, что при соблюдении условия  $\theta_{см} \approx (0,5 - 0,7) \cdot \theta_{0,7}$  для двух групп акустических преобразователей 7, 8 обеспечит сектора обзора по уровню 0,7  $\theta_{0,7(зр\ np)} \sim 136^\circ$ ,  $13^\circ$  и  $6,4^\circ$  соответственно. Таким образом, пеленгование на сигнале разностной частоты целесообразно для осуществления дальнего привода с невысокой точностью судна с параметрической навигационной системой к маяку, пеленгование на сигнале накачки оптимально при уточнении выбора позиции для средних дистанций до маяка, а пеленгование на сигнале суммарной частоты актуально при маневрировании в непосредственной близости от маяка. Точность осуществляемой многочастотной пеленгации можно численно оценить, используя следующее: угол  $\Delta\theta_{\min}$ , при котором оператор или автоматическое устройство уверенно фиксирует наличие разницы в напряжениях  $U_1, U_2$ , определяется выражением [6]:

$$\Delta\theta_{\min} = 0,089 \cdot \mu \cdot (\theta_{0,7(зр\ np)})^2 / \theta_{см}, \quad (2)$$

причем при пеленговании оператором с использованием визуального или слухового индикатора величина  $\mu$  составляет 0,05–0,15 или  $\geq 0,2$  соответственно. Таким образом, применение параметрической навигационной системы позволяет осуществить пеленгование маяка методом равносигнальной зоны с точностью, возрастающей для более высокочастотных сигналов. Описанный выше способ увеличения точности пеленгования источника мощных тональных сигналов основной частоты  $f$  за счет приема и последующей обработки акустических сигналов высших гармоник  $2f, 3f, \dots, nf$ , генерируемых в нелинейной водной среде, реализован

в акустическом пеленгаторе [7], использование которого предполагается в составе гидроакустической аппаратуры средств обеспечения судовождения.

С помощью данного устройства можно дополнительно произвести пеленгование маяка в вертикальной плоскости с использованием эффекта Доплера, обусловленное тем, что при движении судна-носителя устройства с горизонтальной скоростью  $U$  относительно дна происходит изменение частот всех спектральных составляющих полигармонического сигнала, сформированного в водной среде параметрической антенной маяка и принимаемого двумя группами акустических преобразователей 7, 8 (см. соотношение (1)). Учитывая особенности конструкции приемной антенны, состоящей из двух групп акустических преобразователей 7, 8, имеющих идентичные диаграммы направленности без дополнительных максимумов, акустические оси которых сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\theta_{cm}$  и расположены в вертикальной плоскости судовых координат, а также условия применения используемого для пеленгования маяка в устройстве метода равносигнальной зоны, можно сделать вывод о том, что основные лепестки ДН групп акустических преобразователей будут всегда ориентированы по-разному относительно направления от источника к приемнику (угол места  $\theta_B$ ) и, соответственно, углы между направлением вектора скорости  $U$  судна-носителя и направлениями основных лепестков при точной пеленгации маяка будут равны  $(\theta_B + 0,6\theta_{0,7})$  и  $(\theta_B - 0,6\theta_{0,7})$ . Как следует из (1), это приведет к тому, что и доплеровский сдвиг частот для каждой группы акустических преобразователей 7, 8 будет разным и зависящим от местоположения судна относительно маяка: при приближении к местоположению над донным маяком тупой угол  $\vartheta$  уменьшается и стремится к  $90^\circ$ , что приведет к постепенному снижению величины доплеровского сдвига частот ( $+f_D \downarrow$ ) до минимального значения (при нахождении судна вертикально над маяком угол места  $\theta_B = \vartheta$ ), а затем к постепенному росту величины доплеровского сдвига ( $-f_D \uparrow$ ) при удалении, причем для более высокочастотных сигналов этот сдвиг будет большим по величине, динамика изменения частот более значительной, т.е. обеспечена большая чувствительность дополнительного пеленгационного тракта.

В дополнительном пеленгационном тракте на основе эффекта Доплера в первом частотном дискриминаторе 17 могут обрабатываться пары электрических сигналов с частотами  $(f_1 \pm f_{D(f_1)})_{1к}$  и  $(f_1 \pm f_{D(f_1)})_{2к}$  или  $(2f_1 \pm f_{D(2f_1)})_{1к}$  и  $(2f_1 \pm f_{D(2f_1)})_{2к}$  из первого и второго каналов, которые через двухходовые аналоговые ключи 16 поступают с выходов соответствующих усилителей 11. Выходной сигнал первого частотного дискриминатора 17 пропорционален разности доплеровских частот указанных пар данных электрических сигналов и отображается устройством отображения информации 15. При нахождении судна-носителя непосредственно над маяком равносигнальное направление групп акустических преобразователей 7, 8 будет совпадать с вертикалью, что в силу конструктивных особенностей приемной антенны обусловит следующее расположение в пространстве основных максимумов групп акустических преобразователей 7, 8: один под углом  $(90^\circ - \theta_{cm})$ , а другой  $(90^\circ + \theta_{cm})$  относительно вектора скорости судна-носителя, что обеспечит разные знаки («+» – канал 1 и «-» – канал 2) наименьшего допле-



ровского сдвига в обоих каналах на исходных частотах накачки в соответствии с соотношениями

$$f_{D1K(f_1)} = v \cdot f_1 \cos \theta_{1K} / c = v \cdot f_1 \cos(90^\circ - \theta_{cm}) / c = + v \cdot f_1 \sin(0,6 \cdot \theta_{0,7(f_1)}) / c, \quad (3)$$

$$f_{D2K(f_1)} = v \cdot f_1 \cos \theta_{2K} / c = v \cdot f_1 \cos(90^\circ + \theta_{cm}) / c = - v \cdot f_1 \sin(0,6 \cdot \theta_{0,7(f_1)}) / c. \quad (4)$$

На акустических сигналах вторых гармоник за счет увеличения  $\sim \sqrt{2}$  раз остроты главных максимумов диаграмм направленности групп преобразователей 7, 8 и использования более высокой частоты наименьший доплеровский сдвиг в соседних каналах («+» – канал 1 и «-» – канал 2) будет иметь другую величину

$$f_{D1K(2f_1)} = v \cdot 2f_1 \cos \theta_{1K} / c = v \cdot 2f_1 \cos(90^\circ - \theta_{cm}) / c = + v \cdot 2f_1 \sin(0,8 \cdot \theta_{0,7(2f_1)}) / c, \quad (5)$$

$$f_{D2K(2f_1)} = v \cdot 2f_1 \cos \theta_{2K} / c = v \cdot 2f_1 \cos(90^\circ + \theta_{cm}) / c = - v \cdot 2f_1 \sin(0,8 \cdot \theta_{0,7(2f_1)}) / c. \quad (6)$$

На выходе первого частотного дискриминатора 17 вырабатывается сигнальное напряжение  $U_B$ , амплитуда которого пропорциональна разности доплеровских частот первого и второго каналов на используемых рабочих сигналах, что с учетом знаков («+» – канал 1 и «-» – канал 2) наименьших доплеровских сдвигов частот приведет к их удвоению:

$$\begin{aligned} [f_{D1K(f_1)} - f_{D2K(f_1)}] &= 2 \cdot v \cdot f_1 \cdot \sin(0,6 \cdot \theta_{0,7(f_1)}) / c, \\ [f_{D1K(2f_1)} - f_{D2K(2f_1)}] &= 2 \cdot v \cdot 2f_1 \cdot \sin(0,8 \cdot \theta_{0,7(2f_1)}) / c. \end{aligned}$$

Тогда в соответствии с АЧХ частотного дискриминатора для более высокочастотных рабочих сигналов и, соответственно, больших разностей доплеровских сдвигов в первом и втором каналах, величина сигнального напряжения имеет большую величину ( $U_{B(2f_1)} > U_{B(f_1)}$ ), что увеличивает как отношение «сигнал/шум», так и помехоустойчивость рассматриваемого приемного тракта.

Выбор того или иного рабочего сигнала осуществляется путем подачи оператором с блока управления 24 сигналов на управляющие входы как пятиходовых (13), так и двухходовых (16) аналоговых ключей, что в свою очередь определяется необходимой точностью выполнения задачи определения местоположения донного маяка с судна-носителя устройства в вертикальной плоскости.

Приемный тракт для определения параметров движения судна-носителя данной навигационной системы относительно маяка работает на двух сигналах кратных частот, что позволяет регулировать точность измерений. С выходов соответствующих усилителей 11 первого канала через первый аналоговый ключ 16 электрические сигналы с частотами ( $f_1 \pm f_{D(f_1)}$ ) или ( $2f_1 \pm f_{D(2f_1)}$ ) поступают на первый вход второго частотного дискриминатора 17, на второй вход которого с выхода третьего аналогового ключа 18 подаются соответственно один из сигналов с частотой  $f_1$  или  $2f_1$  без доплеровского смещения. Для этого первый и второй входы третьего аналогового ключа 18 соединены с выходом дополнительного генератора 19 гармонического сигнала с частотой  $f_1$  напрямую и через умножитель частоты 20 с коэффициентом умножения «2» соответственно. Выбор того или иного сигнала осуществляется путём подачи с блока управления 24 соответствующую

щих сигналов на управляющие входы первого и третьего аналоговых ключей 16, 18, а также блока обработки вторичной доплеровской информации 21. На выходе частотного дискриминатора 17 выделяется электрический сигнал с частотой, соответствующей доплеровскому смещению ( $f_{D(f_1)}$ ) или ( $f_{D(2f_1)}$ ), что позволяет в блоке обработки вторичной доплеровской информации 21 рассчитать значения скорости судна-носителя устройства на основе эффекта Доплера по соотношению

$$v_{(nf)} = \pm c \cdot f_{D(nf)} / 2nf \cdot \cos(\theta_B - \theta_{cm}) = \pm f_{D(nf)} / K_{V(nf)}, \quad (7)$$

где  $K_{V(nf)}$  – скоростная чувствительность приемного тракта для акустического сигнала на частоте  $nf$ , представляющая собой приращение доплеровской частоты при изменении скорости на 1 узел;  $v_{(nf)}$  – скорость относительного сближения (+) или удаления (–) маяка-пингера и судна, измеренная на соответствующем акустическом сигнале;  $nf$  – частота акустического сигнала, используемого для измерения параметров движения;  $\theta_B$  – измеренное значение угла места пеленгуемого донного маяка в вертикальной плоскости;  $n = 1, 2$  – номер используемой гармоники;  $c$  – скорость звука в водной среде.

Предположим, что осуществляется завершающая стадия точного определения местоположения маяка при маневрировании судна-носителя, в процессе выполнения которой целесообразно кроме измерения пеленга (курсовой угол  $\theta_r$  и угол места  $\theta_B$ ) маяка иметь возможность получения информации и о дальности до него. В данном случае для определения расстояния до пеленгуемого маяка можно использовать физические особенности нелинейной генерации акустических сигналов суммарной  $f_+ = f_2 + f_1$  частоты, вторых гармоник  $2f_1, 2f_2$  волн накачки при распространении в водной среде, осевые распределения уровней звуковых давлений, которых описываются следующими зависимостями [8]:

$$P_+ = \frac{\varepsilon \omega_+ p_{01} p_{02} l_{\mathcal{D}}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0,25 \ln^2(1 + Z_H^2) + \arctg^2 Z_H}{1 + Z_H^2}} \cdot \exp(-\alpha_+ z), \quad (8)$$

$$P_{2f_{1,2}} = \frac{\varepsilon \omega_{1,2} p_{01,02}^2 l_{\mathcal{D}1,2}}{2 \rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{0,25 \ln^2(1 + Z_{H1,2}^2) + \arctg^2 Z_{H1,2}}{1 + Z_{H1,2}^2}} \cdot \exp(-\alpha_{2f_{1,2}} z), \quad (9)$$

где  $\omega_+ = 2\pi(f_1 + f_2)$ ,  $\omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2}$ ,  $p_{01,02}$  – амплитуды звукового давления сигналов накачки с частотами  $f_{1,2}$  у поверхности антенны;  $l_{\mathcal{D}} = a^2 \omega_0 / 2c_0$ ,  $l_{\mathcal{D}1,2} = a^2 \omega_{1,2} / 2c_0$  – длины зон дифракции Френеля для сигналов с центральной частотой накачки  $f_0 = (f_1 + f_2) / 2$  и исходных частот  $f_1, f_2$ ;  $Z_H = z / l_{\mathcal{D}}$ ,  $Z_{H1,2} = z / l_{\mathcal{D}1,2}$  – нормированная продольная координата;  $\alpha_+, \alpha_{2f_{1,2}}$  – коэффициенты затухания акустических сигналов суммарной частоты, вторых гармоник исходных волн накачки. Как видно из (8) и (9), второй и третий множители и определяют продольное распределение амплитуд звукового давле-

ния данных сигналов на оси параметрической антенны маяка, причем анализ нелинейной генерации высокочастотных сигналов комбинационных частот параметрической антенной, образованной коллинеарными акустическими пучками с гауссовым поперечным распределением накачки средней интенсивности, что позволяет сделать следующий вывод: на оси параметрической антенны маяка при увеличении продольной координаты  $z$  амплитуды звуковых давлений высокочастотных сигналов монотонно возрастают, достигая максимумов различной величины (эффективность генерации прямо пропорциональна квадрату частоты акустического сигнала) на близко расположенных расстояниях  $z_{M(+)} = 1,425 \cdot l_d$ ,  $z_{M(2f_{1,2})} = 1,425 \cdot l_d \cdot (f_{1,2}/f_0)$ , после чего происходит спад уровней, обусловленный дифракционной расходимостью, причем учет затухания высокочастотных сигналов (при  $f_1 < f_2$ ,  $P_{01} = P_{02} = P_0$ ) оказывает заметное влияние на уровни амплитуд звуковых давлений в дальней зоне преобразователя накачки параметрической антенны маяка, выражающееся в их уравнивании и слиянии всех трех осевых распределений, что обусловлено следующим соотношением пространственных коэффициентов затухания:  $\alpha_{2f_2} > \alpha_+ > \alpha_{2f_1}$ .

Исходя из представленных выводов и соотношений (8)-(9), приблизительную оценку дальности нахождения маяка от судна-носителя предлагаемого устройства можно осуществить, например, разделив друг на друга аналитические выражения вида (9) для амплитуд звуковых давлений  $P_{2f_1}$  и  $P_{2f_2}$  вторых гармоник исходных сигналов накачки с учетом того, что вторые сомножители, описывающие осевые распределения данных сигналов, приблизительно равны друг другу при условии, что частоты накачки  $f_1 \approx f_2$ . В этом случае мы получим

$$P_{2f_1} \approx (f_1/f_2)^2 \cdot P_{2f_2} \cdot \exp[(\alpha_{2f_1} - \alpha_{2f_2}) \cdot z]. \quad (10)$$

Взяв натуральный логарифм от (10), можно рассчитать дальность нахождения маяка

$$z \approx \frac{\ln(P_{2f_1} \cdot f_2^2 / P_{2f_2} \cdot f_1^2)}{\alpha_{2f_1} - \alpha_{2f_2}}. \quad (11)$$

Аналогичные соотношения для этой же дальности  $z$  маяка можно получить и для других отношений амплитуд звуковых вторичных высокочастотных компонент –  $P_+/P_{2f_1}$ ,  $P_{2f_2}/P_+$ , что позволит увеличить точность расчета за счет усреднения. Приемный тракт для расчета дистанции до маяка включает в себя три измерителя амплитуд 22 и вычислительный блок 23, причем входы измерителей амплитуд 22 соединены с выходами детекторов 12 во втором канале, вырабатывающих видеоимпульсные напряжения  $U_{2(2f_1)}$ ,  $U_{2(2f_2)}$ ,  $U_{2(f_+)}$ , измеренные величины которых поступают на входы вычислительного блока 23, причем в момент точной пеленгации маяка по сигналу с блока управления 24 производятся необходимые вычисления, результаты которых поступают на четвертый вход устройства отображения информации 15.

Данная параметрическая навигационная система с гидроакустическими маяками может быть использована в качестве гидроакустической измерительной подсистемы, входящей в состав судовой системы как для обеспечения удержания суд-

на-носителя в точке проведения работ, так и для получения необходимой информации о ходе работ на грунте, связанных с использованием механизмов или со строительством подводных сооружений, а также для обеспечения безопасности движения судов по маршруту, предназначенному для плавания и маневрирования в пределах естественных узкостей, фарватеров, при входах в гавани и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бородин В.И., Смирнов Г.Е., Толстякова Н.А., Яковлев Г.В.* Гидроакустические навигационные средства. – Л.: Судостроение, 1983. – 264 с.
2. *Простаков А.Л.* Электронный ключ к океану: Гидроакустическая техника сегодня. – Л.: Судостроение, 1978. – 192 с.
3. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 264 с.
4. *Маленькая энциклопедия. Ультразвук.* Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400с.
5. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляликов А.П.* и др. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
6. *Колчеданцев А.С.* Гидроакустические станции. – Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.
7. *Волощенко В.Ю.* Пат. № 2138059 (РФ). Акустический пеленгатор. МКИ G01S 3/00,3/80,15/08, опубл. 20.09.1999, Бюл. № 26.
8. *Волощенко В.Ю.* Исследование и разработка параметрической антенны в режиме генерации акустических сигналов суммарной частоты для использования в гидроакустических системах ближнего действия: Дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1993. – 165 с.