

15. Лобач В.Т. Радиолокационные измерения параметров слоистой среды. Изв. вузов. Радиоэлектроника. Военные радиоэлектронные технологии. Тем. выпуск. Т. 45. – №3. 2002. – С. 71-77.
16. Лобач В.Т. и др. Подповерхностная радиолокация в декаметровом радиодиапазоне. Труды международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». Таганрог, 2007.

УДК 534.222.2

**В.Ю. Волощенко**

### **ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДЛЕДНОГО ПЛАВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

В настоящее время задачи исследования и освоения обширных площадей мелководного Арктического шельфа России могут быть решены при использовании автономных подводных плавательных аппаратов, оснащенных специализированными локационными системами ближнего действия (ЛС БД), применение которых должно обеспечивать уклонение от столкновения с айсбергами и дном при движении в темное время года, под сплошным ледяным покровом в каналах, проливах между островами, а также возможность точного измерения толщины ледового покрова и обнаружения во льдах полыней и разводий, в связи с чем подводное гидроакустическое наблюдение ведется в трех направлениях – вперед, вниз и вверх. В [1] рассмотрено общее подледное гидролокационное оборудование автономных плавательных аппаратов типа «Стерджен», включающее себя 10 устройств активной локации: вертикальный обзор вверх обеспечивают семь гидролокаторов-эхоледомеров, три из которых сосредоточены в кормовой, один – в средней, один – в носовой частях главной палубы корпуса, два – на рубке, один из которых – высокочастотный узколучевой профилограф-эхоледомер используется для точного измерения расстояния от верха рубки до ближайшей границы льда, а также его толщины при движении; передний обзор – обнаружитель айсбергов, который непрерывно сканирует пространство впереди лодки в поисках айсбергов или глубоких выступов льда; вертикальный обзор вниз – два донных эхолота, расположенных в носовой и кормовой частях лодки. Данный пример наглядно демонстрирует важность получения в реальном масштабе времени достоверной информации о точном профиле нижней кромки льда и его толщине вдоль всего корпуса лодки с помощью гидроакустических средств обеспечения ближнего подводного наблюдения – гидролокаторов-эхоледомеров.

Известно, что более 70% бассейна Арктики занимают паковые льды, имеющие среднюю толщину: зимой (3–4) м, летом (0,5–1,5) м и среднеквадратичное отклонение крупномасштабных неровностей до 3 м на нижней кромке, осадка торосов может достигать (7–8) м, а отдельных выступов – (16–20) м. Под влиянием ветров и течений арктические льды находятся в постоянном движении, а ледовые поля изобилуют многочисленными трещинами, каналами и полынями [2]. Практика использования одночастотных эхоледомеров показала, что в данных условиях по записям рельефа границ раздела на регистраторах часто бывает трудно классифицировать характер поверхности, а точность измерения осадки и толщины льда оказывается недостаточной. Для устранения отмеченных недостатков было предложено в эхоледомерах использовать две частоты излучения – высокую и низкую,

что позволяет на низкой частоте получать рассеянный сигнал от границы раздела «лед – воздух», а на высокой – от границы раздела «вода-лед», и точно определять рельеф нижней границы ледяного покрова, причем при синхронном излучении обоих сигналов может быть измерена толщина ледяного покрова [3]. Однако такой двухчастотный эхоледомер имеет недостатки: 1) требует двух акустических антенн, одна из которых – низкочастотная – имеет большие массу и габариты; 2) используемые в эхоледомере «линейные» интерференционные антенны обладают протяженной ближней зоной дифракции Френеля и существенными по величине дополнительными максимумами диаграмм направленности, как в приеме, так и в излучении, что может привести к возникновению большой ошибки в определении угловых координат деталей рельефа; 3) проблема достоверной классификации характера лоцируемых границ раздела «вода-лед», «вода-воздух» не решена.

Описанный выше характер нижней кромки ледовых полей обуславливает необходимость применения многочастотной локационной аппаратуры, гидроакустические антенны которой способны формировать излучение с узким основным лепестком и без бокового поля. Эффективность использования ЛС БД в условиях сложной помеховой обстановки может быть существенно повышена при использовании излучающих параметрических антенн (ПА), формирующих узкий пучок сигналов разностной частоты (СРЧ) с малым уровнем бокового поля при небольших габаритах электроакустического преобразователя сигналов накачки с частотами  $f_1, f_2$ . Однако практическое использование для решения рассматриваемых задач существующих нелинейных параметрических приборов (НПП) в традиционном режиме имеет некоторые ограничения [4]. Между тем при работе ПА наряду с генерацией СРЧ в водной среде формируются высокочастотные спектральные компоненты – сигнал суммарной частоты (ССЧ)  $f_+ = f_2 + f_1$ , вторые гармоники сигналов накачки  $2f_1, 2f_2$ , акустические поля которых обладают следующими характеристиками:

1) эффективность генерации компонент высокочастотного излучения достаточно высока: на акустической оси для расстояний, составляющих всего полторы длины ближней зоны дифракции Френеля для преобразователя накачки, амплитуды звуковых давлений формирующихся акустических сигналов достигают максимумов, составляющих до 20% от уровней сигналов накачки, после которых закон убывания данных сигналов можно считать близким к сферическому;

2) угловые распределения амплитуд звукового давления акустических сигналов вторых гармоник определяются поперечными распределениями амплитуд сигналов накачки в акустическом пучке, возведенными во вторую степень, а для сигнала суммарной частоты – произведением угловых распределений амплитуд сигналов накачки, что позволяет на указанных выше расстояниях сформировать акустические пучки с ослабленным боковым полем и повышенной (в 1,5 – 2 раза) остротой главных максимумов по сравнению с аналогичными характеристиками преобразователя накачки на исходных частотах и на СРЧ;

3) направленный прием эхосигналов ВЧ-компонент спектра может быть осуществлен как с помощью исходного преобразователя накачки ПА, включенного через коммутатор приема-передачи, так и с помощью отдельного приемного малогабаритного преобразователя, причем близость частот генерируемых компонент спектра –  $f_+ = f_2 + f_1, 2f_1, 2f_2$ , кратность частот и фазовая связь ( $f_1, 2f_1$  и  $f_2, 2f_2$ ) при соответствующей обработке в приемных трактах локационных устройств могут обеспечить получение нового объема данных о ближней подводной

обстановке, в частности, при поиске с борта автономного плавательного аппарата полыньи для всплытия.

Рассмотрим технические решения [4-6] по модернизации существующих нелинейных параметрических приборов (НПП), имеющие своей целью расширение эксплуатационных возможностей, что достигается за счет осуществления приема и соответствующей обработки эхосигналов высокочастотных компонент спектра ПА.

На рис. 1 показана структурная схема параметрического эхоимпульсного локатора, на рис. 2 – эпюры напряжений в различных точках канала обработки фазовых характеристик эхосигналов ВЧ приемного тракта параметрического эхоимпульсного локатора [5].

Работа параметрического эхоимпульсного локатора происходит следующим образом. Генераторы 1 и 2 (рис. 1) вырабатывают высокочастотные гармонические сигналы  $U_1, U_2$  с частотами  $f_1, f_2$ , поступающие на два входа хронизатора-модулятора 3, приводящегося в рабочее состояние оператором по команде с блока управления 39, в результате чего на выходе хронизатора-модулятора получаем радиоимпульс  $U_3$  с бигармоническим ВЧ-заполнением. Данный радиоимпульс после усилителя мощности 4 поступает на электроакустический преобразователь накачки 5 параметрической антенны (ПА), излучающий зондирующий сигнал накачки в водную среду, обладающую нелинейностью своих упругих характеристик. При этом происходит нелинейное взаимодействие сигналов накачки с частотами  $f_1 = \omega_1/2\pi$ ,  $f_2 = \omega_2/2\pi$  в канале распространения, результатом которых является генерация в водной среде 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. Полигармонический зондирующий сигнал, содержащий спектральные составляющие с частотами  $f_1, f_2, f_+ = f_2 + f_1, F = f_2 - f_1, 2f_1, 2f_2$ , распространяется в среде лоцирования, имеющей акустическое сопротивление ( $Z_{CP} = \rho_{cp} c_{cp}$ ), где  $\rho_{cp}$  – плотность среды,  $c_{cp}$  – скорость звука в ней, достигает расположенных в среде подвижных и покоящихся относительно нее объектов с акустическим сопротивлением ( $Z_{OB} = \rho_{об} c_{об}$ )  $\neq (Z_{CP})$  и отражается от них. Амплитуды отраженных волн, несущих информацию об объектах, определяются их рассеивающими свойствами, которые определяются формой объектов, ракурсом облучения, волновыми размерами. Если акустическое сопротивление объекта  $Z_{OB}$  больше акустического сопротивления среды  $Z_{CP}$ , то отраженные волны имеют ту же фазу, что и падающие, если же  $Z_{OB} < Z_{CP}$ , то при отражении они изменяют фазу на  $\pi$  радиан, кроме того, в соответствии с эффектом Доплера перемещение объекта с радиальной скоростью  $v_p$  приведет к изменению частот отраженных акустических колебаний всех волновых процессов – доплеровским сдвигам частот ( $\pm f_{D(f_1)}$ ), ( $\pm f_{D(2f_1)}$ ), ( $\pm f_{D(f_2)}$ ), ( $\pm f_{D(2f_2)}$ ), ( $\pm f_{D(f_+)}$ ), ( $\pm f_{D(F)}$ ), где (+) и (–) соответствуют приближению или удалению объекта. Отраженные спектральные компоненты полигармонического сигнала достигают приемных преобразователей 6 и 11 НЧ и ВЧ приемных трактов параметрического локатора (акустический сигнал  $U_4$ ), причем все отраженные составляющие полигармонического сигнала несут определенную амплитудную, фазовую и частотную информацию об объектах лоцирования и границах раздела, позволяют судить об их отражательной способно-

сти, акустическом сопротивлении и характеристиках движения, а также о их удалении от приемно-излучающей системы 5, 6, 11.

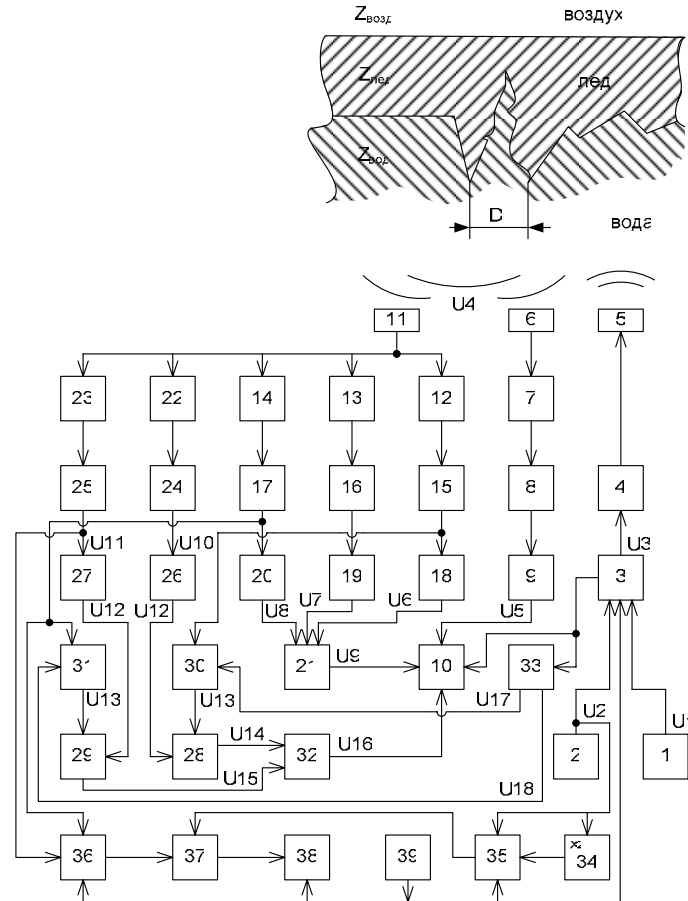


Рис. 1. Структурная схема параметрического эхоимпульсного лоатора

На выходе канала обработки амплитудных характеристик эхосигналов НЧ приемного тракта после фильтрации (полосовой фильтр 7), усиления (усилитель 8) и детектирования (детектор 9) выделяется видеоимпульсный электрический сигнал  $U5$ , соответствующий эхосигналам разностной частоты  $F = f_2 - f_1$  от облучаемых границ раздела и объектов, который подается на второй вход индикатора 10, запускаемого подачей синхроимпульса с дополнительного выхода хронизатора-модулятора 3.

На выходе канала обработки амплитудных характеристик эхосигналов ВЧ приемного тракта после фильтрации (полосовые фильтры 12, 13, 14), усиления (усилители 15, 16, 17), детектирования (детекторы 18, 19, 20) и перемножения (21) выделенных видеоимпульсных сигналов  $U6 (2f_1)$ ,  $U7 (f_+)$ ,  $U8 (2f_2)$  получаем результирующее напряжение  $U9 = U6 \times U7 \times U8$ , соответствующее эхосигналам для высокочастотного излучения от облучаемых границ раздела, которое подается на третий вход индикатора 10. Уровни каждого из электрических сигналов  $U6, U7, U8$  определяются амплитудной характеристикой направленности

$\mathfrak{R}_{2f_1}(\theta), \mathfrak{R}_+(\theta), \mathfrak{R}_{2f_2}(\theta)$  и чувствительностью  $Y_{2f_1}, Y_+, Y_{2f_2}$  в режиме приема преобразователя 11 для каждой из рассеянных объектами акустических волн с частотами колебаний  $2f_1, f_+, 2f_2$ , где  $\theta$  – угол прихода рассеянных волн, отсчитываемый от нормали к плоскости антенны. Вследствие близости частот  $2f_1, f_+, 2f_2$  отраженных акустических сигналов, пространственные характеристики направленности (ХН) для приемного преобразователя 11 на этих частотах аналогичны и близки по величине друг другу (расположение в пространстве главного и добавочных максимумов излучения, ширина главного максимума по первым направлениям нулевого излучения и по уровню 0,7, уровни добавочных максимумов и т.д.). Таким образом, перемножение электрических сигналов  $U_6 \times U_7 \times U_8$ , уровни каждого из которых пропорциональны аналогичным пространственным ХН приемного преобразователя 11, обеспечит сохранение электрических сигналов большой амплитуды, соответствующих главным максимумам на акустической оси приемно-излучающей системы 5, 6, 11, и ослабление электрических сигналов малой амплитуды, соответствующих добавочным максимумам для других внеосевых направлений, что эквивалентно уменьшению ширины главного максимума и подавлению дополнительных максимумов в результирующей характеристике направленности приемного преобразователя 11 [4].

Проиллюстрируем возможность получения различной точности отображения рельефа нижней кромки льда с использованием каналов обработки амплитудных характеристик эхосигналов ВЧ и НЧ приемного тракта. Например, на нижней кромке льда имеются два выступа одинаковой величины, расположенных на расстоянии  $D$  и разделенных глубокой трещиной (рис. 1), отметки, от которых на эхограмме могут сливаться в одну и тем самым увеличивать толщину льда практически вдвое. Рассчитаем величину угла  $\Delta\theta$ , при отклонении на который в области максимума диаграмм направленности (ДН) антенных систем обоих каналов оператор или решающий автомат уверенно зафиксирует уменьшение амплитуды сигнала от каждого из соседних выступов, т.е. они будут зарегистрированы отдельно с определенной точностью отображения рельефа нижней кромки льда. Величиной этого угла  $\Delta\theta$  характеризуют точность пеленгования. Для максимального метода пеленгования  $\Delta\theta = 0,6 \cdot \sqrt{\mu} \cdot \theta_{0,7}$ , где  $\mu$  – коэффициент, величина которого при использовании оператором визуального индикатора составляет (0,05–0,15); для слухового индикатора –  $\geq 0,2$ . Оценим точность максимального метода пеленгования НЧ и ВЧ амплитудными трактами макета параметрического гидролокатора ближнего действия [6], который может быть использован в режиме эхолодомера. В данном устройстве ширина эквивалентных ДН приемно-излучающей системы по уровню 0,7 составляет: ВЧ-канал – при предлагаемой обработке сигналов  $f_+ = 476$  кГц,  $2f_1 = 456$  кГц,  $2f_2 = 496$  кГц и  $\theta_{0,7 \text{ ВЧ рез}} = 1,6^0$  при отсутствии боковых лепестков; НЧ-канал – для сигнала разностной частоты  $F = 20$  кГц,  $\theta_{0,7 \text{ НЧ}} = 6,4^0$  при наличии боковых лепестков с уровнями до 13%, что должно обеспечить при вертикальном лоцировании с неподвижного автономного подводного аппарата, расположенного на глубине 20 метров, следующие величины разрешающей способности по углу  $D_{\text{ВЧ рез}} \sim 0,2$  м и  $D_{\text{НЧ}} \sim 0,8$  м соответственно. В данном случае при визуальном пеленговании выступов оператором ( $\mu=0,1$ ) с помощью данной локационной системы точность пеленгования  $\Delta\theta$  будет составлять: для ВЧ-тракта

при предлагаемой обработке  $\Delta\theta_{ВЧ\text{ рез}} = 0,28^0$ ; для НЧ-тракта на сигнале разностной частоты  $F = 20$  кГц –  $\Delta\theta_{НЧ} = 1,3^0$ .

Работоспособность фазового приемного тракта основана на применении способа получения фазочастотной характеристики (ФЧХ) границы раздела [7], реализуемого с использованием двух пар когерентных гармонических акустических сигналов кратных частот  $f_2, 2f_2$  и  $f_1, 2f_1$ . Информацию о наличии или отсутствии фазового сдвига на  $\pi$  радиан при отражении от границы раздела пары когерентных гармонических акустических сигналов кратных частот  $f_1, 2f_1$  можно получить после соответствующей обработки – фильтрации, усиления, приведения к одной частоте и фазового детектирования. В результате для обрабатываемых сигналов компенсируются начальные фазы ( $\phi_{02} = 2\phi_{01}$ ) и набег фазы как за счет двойного прохождения расстояния  $z$  до границы, так и за счет времени  $t_1$  до прихода эхосигналов, а остается только разность фазовых сдвигов, приобретенных при отражении сигналов от границы раздела, определяемая соотношением акустических сопротивлений поверхности объекта и среды лоцирования. Так, например, разность фаз, приведенных к одинаковой частоте фазосвязанных сигналов кратных частот  $\omega_2 = 2\pi \cdot (2f_1) = 2\omega_1$  и  $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ , будет равна

$$\begin{aligned} \Delta\phi_R &= 2\omega_1 t_1 - 2 \times \frac{2\omega_1 z}{c_0} + 2\phi_{01} + 2\phi_{R1}(\omega_1) - (2\omega_1)t_1 + 2 \times \frac{(2\omega_1)z}{c_0} - \phi_{02} - \phi_{R2}(\omega_2) = \\ &= 2\phi_{R1}(\omega_1) - \phi_{R2}(\omega_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\phi_{R1}(\omega_1)$  и  $\phi_{R2}(\omega_2)$  – величины приобретаемых фазовых сдвигов для звукового давления акустических сигналов при отражении от облучаемой поверхности. При облучении акустически «жестких» объектов (погруженная часть корпуса надводного судна, граница раздела «вода-лед») акустическое сопротивление  $Z_{ОБ}$  которого больше, чем акустическое сопротивление среды распространения  $Z_{СР}$ , отражение акустических сигналов кратных частот  $f_1, 2f_1$  происходит без фазового сдвига на  $\pi$  радиан, т.е.  $\phi_{R1}(\omega_1) = \phi_{R2}(\omega_2) = 0^0$  и  $\Delta\phi_R = 0^0$ . В случае обнаружения акустически «мягких» объектов (граница раздела «вода-воздух»), акустическое сопротивление  $Z_{ОБ}$  которых меньше, чем акустическое сопротивление среды распространения  $Z_{СР}$ , отражение акустических сигналов кратных частот  $f_1, 2f_1$  происходит с фазовым сдвигом на  $\pi$  радиан, т.е.  $\phi_{R1}(\omega_1) = \phi_{R2}(\omega_2) = 180^0$  и  $\Delta\phi_R = 360^0 - 180^0 = 180^0$ .

Таким образом, в канале обработки фазовых характеристик эхосигналов ВЧ приемного тракта (рис. 2) после фильтрации (полосовые фильтры 22, 23), усиления (усилители 24, 25) выделяются электрические сигналы  $U10, U11$  с частотами сигналов накачки  $f_1, f_2$ , которые удваивают по частоте  $U12, U12'$  (умножители частоты 26, 27) и с помощью фазовых детекторов (28, 29) определяют фазовый сдвиг для эхосигналов частот  $f_1$  и  $2f_1, f_2$  и  $2f_2$  при отражении от границ раздела при использовании в качестве опорных эхосигналов  $U13, U13'$  с частотами  $2f_1$  и  $2f_2$ , подаваемых на вторые входы фазовых детекторов (28, 29) через фазовраща-

тели (30, 31). Генерация акустических сигналов вторых гармоник  $2f_1, 2f_2$  при нелинейном взаимодействии исходных волн накачки  $f_1, f_2$  сопровождается следующими физическими особенностями процессов: при распространении из ближней в дальнюю зону преобразователя накачки ПА каждый из этих сигналов приобретает определенный дифракционный фазовый сдвиг, обусловленный трансформацией квазиплоской волны соответствующего сигнала у поверхности преобразователя накачки в расходящуюся квазисферическую на определенном удалении от него.

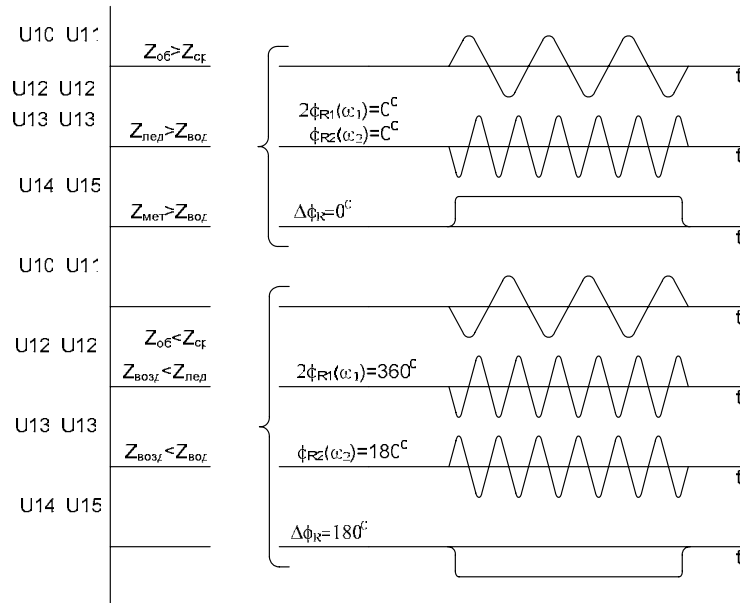


Рис. 2. Эпюры напряжений в различных точках канала обработки фазовых характеристик эхосигналов ВЧ приемного тракта параметрического эхоимпульсного лоатора

Компенсация разности дифракционных фазовых сдвигов для сигналов  $f_1$ ;  $2f_1$  и  $f_2, 2f_2$ , сформированных излучающей ПА, осуществляется с помощью фазовращателей (30, 31), на управляющие входы которых поступают электрические сигналы  $U17$  и  $U18$  соответственно, амплитуды которых во времени пропорциональны величинам образующихся разностей дифракционных фазовых сдвигов. Электрические сигналы  $U17$  и  $U18$  вырабатывает блок формирования управляющих напряжений (33) после поступления на его управляющий вход синхроимпульса от хронизатора-модулятора 3. Напряжения  $U14$  и  $U15$ , формируемые на выходах фазовых детекторов 28, 29, при лоцировании акустически мягкой границы раздела («вода-воздух») будет иметь одну полярность, а акустически жесткой («вода-лед») – другую. Сигналы  $U14$  и  $U15$  подают на два входа схемы совпадения 32, причем на ее выходе вырабатывается результирующий сигнал  $U16$  только в том случае, если сигналы  $U14$  и  $U15$  имеют одинаковую полярность. В случае возникновения результирующего сигнала  $U16$  он поступает на четвертый вход индикатора 10 и будет отображаться видеоимпульсами определенной полярности в соответствующих местах линии развертки электроннолучевой трубки ин-

дикатора, что позволит с борта автономного аппарата обнаруживать пригодные для всплытия полыньи и разводья или получать дополнительные данные о толщине льда над главной палубой.

В качестве индикатора 10 может служить многоканальный осциллограф, у которого запуск развертки лучей по оси «X» (текущее время  $t$ ) выполняется синхронным импульсом, поступающим с дополнительного выхода хронизатора-модулятора 3, а сигналы  $U5, U9, U16$  поступают на входы усилителей, отклоняющих лучи осциллографической трубки по оси «Y» [8]. На экране осциллографического индикатора при этом наблюдают видеосигналы  $U5, U9$ , амплитуды которых характеризуют отражательную способность обнаруженных объектов и границ раздела для сигналов с частотами как разностной  $F = f_2 - f_1$ , так и суммарной  $f_+ = f_2 + f_1$ , вторых гармоник  $2f_1, 2f_2$  волн накачки, а их задержка относительно начала развертки – расстояние  $z$  от преобразователей локатора ( $z = c_0 \Delta t / 2$ , где  $\Delta t$  – задержка сигналов  $U5, U9$  относительно начала развертки). Сигнал  $U16$ , наблюдаемый с той же задержкой на экране осциллографического индикатора 10, представляет собой видеоимпульсы, амплитуда и полярность которых будет зависеть от соотношений акустических сопротивлений сред распространения последовательно проходимых фазосвязанными акустическими сигналами кратных частот снизу вверх по прямому ходу луча.

Проанализируем информацию, отображаемую на экранах индикатора 10 на разных частотах: разностной  $F = f_2 - f_1$  – сигнал  $U5$ , на вторичных высокочастотных  $f_+, 2f_1, 2f_2$  – сигнал  $U9$ , на кратных акустических  $f_1$  и  $2f_1$ ;  $f_2$  и  $2f_2$  – сигнал  $U16$  для различных границ раздела:

1) «вода-воздух». Видеоимпульсные сигналы  $U5, U9$  будут регистрироваться с одинаковой задержкой относительно начала развертки, но с разной длительностью убывания флюктуирующих амплитуд, причем  $U9$  будет иметь меньший по длительности маскирующий шлейф. Сигнал  $U16$  будет регистрироваться в виде стабильного по амплитуде, знаку и расположению на линии развертки видеоимпульса отрицательной полярности (неволнованная поверхность моря) или меняющегося по амплитуде, знаку и расположению на линии развертки видеоимпульса (вволнованная поверхность моря), что позволит уточнить дистанцию до морской поверхности и ее состояние.

2) «вода-лед». Передние фронты видеоимпульсных сигналов  $U5, U9$  от нижней границы льда на линии развертки будут не совпадать (левее относительно  $U9$  будет  $U5$ ), что обеспечит завышение измеряемой толщины льда в НЧ амплитудном приемном тракте. Сигнал  $U16$  на линии развертки будет совпадать с эхосигналом  $U9$  и регистрироваться в виде стабильно расположенного на линии развертки, но меняющегося по амплитуде и знаку видеоимпульса.

3) «лед-воздух». Амплитуды видеоимпульсных сигналов  $U5, U9$  от верхней кромки льда вследствие значительного затухания будут достаточно сильно отличаться по величине, причем в ВЧ-тракте влияние маскирующей реверберационной помехи вследствие затухания будет меньше. Сигнал  $U16$  будет иметь вид видеоимпульса постоянной амплитуды и отрицательной полярности, стабильно расположенного на линии развертки, что позволит уточнить расположение верхней кромки льда.

Работоспособность приемного тракта для обработки частотных признаков эхосигналов основана на измерении изменений спектров эхосигналов по отноше-



нию к спектру зондирующего сигнала в соответствии с эффектом Доплера. В канале обработки частотных характеристик эхосигналов ВЧ приемного тракта после фильтрации (полосовые фильтры 14, 23), усиления (усилители 17, 25) выделяются электрические сигналы с частотами  $(f_2 \pm f_{D(f_2)})$  и  $(2f_2 \pm f_{D(2f_2)})$ , которые поступают на первый и второй сигнальные входы двухвходового аналогового ключа 36, с выхода которого поступает на первый вход частотного дискриминатора 37 тот или иной электрический сигнал с доплеровским сдвигом частоты. На второй вход частотного дискриминатора 37 с выхода второго двухвходового аналогового ключа 35 подаётся один из сигналов с частотой  $f_2, 2f_2$  соответственно без доплеровского смещения. Для этого оба входа второго аналогового ключа 35 соединены с выходом высокочастотного генератора 2 с частотой  $f_2$ : первый вход – напрямую, а второй – через умножитель частоты 34 с коэффициентом умножения 2. Выбор той или иной пары сигналов  $(f_2 \pm f_{D(f_2)})$ ,  $f_2$  или  $(2f_2 \pm f_{D(2f_2)})$ ,  $2f_2$  производится оператором и осуществляется путём подачи с блока управления 39 соответствующих сигналов на управляющие входы аналоговых ключей 36 и 35.

На выходе частотного дискриминатора 37 выделяется электрический сигнал с частотой, соответствующей доплеровскому смещению  $(f_{D(f_2)}, f_{D(2f_2)})$ , что позволяет в блоке вторичной обработки доплеровской информации 38 рассчитать два значения радиальной составляющей скорости  $v_{P(f_2)}, v_{P(2f_2)}$  относительного сближения (+) или удаления (–) объекта и судна – носителя параметрического локатора, измеренная на соответствующем акустическом сигнале на основе эффекта Доплера по соотношениям:

$$v_{P(f_2)} = \pm \frac{c \times f_{D(f_2)}}{2 \times f_2} = \pm \frac{f_{D(f_2)}}{K_{V(f_2)}}, \quad (2)$$

$$v_{P(2f_2)} = \pm \frac{c \times f_{D(2f_2)}}{2 \times 2f_2} = \pm \frac{f_{D(2f_2)}}{K_{V(2f_2)}}, \quad (3)$$

где  $K_{V(f_2)}, K_{V(2f_2)}$  – скоростные чувствительности частотного приемного тракта параметрического локатора для акустических сигналов на частотах  $f_2$  и  $2f_2$ , представляющие собой приращение доплеровской частоты при изменении скорости на 1 узел;  $c$  – скорость звука в водной среде.

Как следует из представленного выше описания сигнала  $U16$ , отображаемого на экране индикатора 10 и вырабатываемого фазовым приемным трактом устройства, при облучении взволнованной поверхности моря и неровной нижней кромки льда существенным отличием информационного сигнала в первом случае от второго есть лишь периодическое изменение его расположения на линии развертки меняющегося по амплитуде, знаку видеоимпульса, что обусловлено подвижностью свободной водной поверхности в отличие от статичной неровной нижней кромки льда, причем именно данный признак – измерение скорости вертикальных перемещений подвижной свободной поверхности «вода-воздух» – следует использовать для увеличения достоверности классификации лоцируемых границ раздела при обнаружении полыней и разводий во льдах, пригодных для всплытия на поверхность автономного плавательного аппарата. В данном случае именно точное определение отсутствия или наличия элементов движения неровной отражающей границы за счет обработки частотных признаков эхосигналов позволит

однозначно установить *статичность* («вода-лед») или *подвижность* («вода-воздух») облучаемой границы раздела, причем использование описываемого тракта позволяет регулировать точность проводимых измерений на акустических сигналах накачки с частотой  $f_2$  и его второй гармонике  $2f_2$ . Дело в том, что для второй гармоники острота главного максимума излучения в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем для сигнала основной частоты, т.е.  $\theta_{0,7(f_2)} = \sqrt{2} \cdot \theta_{0,7(2f_2)}$ , и на взволнованной границе раздела «вода-воздух», совершающей вертикальные перемещения со скоростью  $U_p$ , облучаются две концентрические площадки  $S_{(f_2)}$  и  $S_{(2f_2)}$ , что обусловит появление доплеровских спектров частот, ширина которых по уровню половинной мощности определяется приближенным соотношением [9]:

$$\Delta f_{D(nf_2)} \approx 4 \cdot (nf_2) \cdot \frac{v_p}{c} \cdot \sin \Theta_D \cdot \frac{\theta_{0,7(nf_2)}}{2}, \quad (4)$$

где  $\Theta$  – угол скольжения акустического луча относительно границы раздела,  $n = 1, 2$  – номер гармонической составляющей. Расширение спектров частот эхосигналов затрудняет выделение доплеровских приращений частот, что вызовет погрешности их измерений, которые будут тем значительней, чем шире диаграмма направленности антенны. Так, среднеквадратичная погрешность  $\delta F_D$  измерения доплеровского сдвига частот из-за флуктуаций средней частоты спектра может быть оценена из приближенного соотношения  $\delta F_D \approx m \cdot \Delta f_D$ , где  $m$  – некоторый постоянный коэффициент,  $\Delta f_D$  – ширина доплеровского спектра сигнала на уровне половинной мощности [9].

Предложенные технические решения [4-6] расширяют эксплуатационные возможности существующих нелинейных параметрических приборов (НПП) и демонстрируют перспективность их использования в качестве гидроакустических средств обеспечения ближнего подводного наблюдения при подледном плавании.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Макларен А.С.* Краткий исторический обзор исследований Арктического бассейна и прилегающих зон ледяной кромки с помощью подводных лодок // Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – С.144-154.
2. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Ляшков А.П.* и др. Справочник по гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
3. *Богородский В.В., Яковлев Г.В., Корепин Е.А., Должиков А.К.* Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 263 с.
4. *Волощенко В.Ю.* Патент 2133047(РФ). Параметрический эхо-импульсный локаатор. МКИ G01S 15/60, опубл.10.09.1999. Бюл. №19.
5. *Волощенко В.Ю., Максимов В.Н., Тарасов С.П., Волощенко А.П.* Патент 69646 (РФ). Параметрический эхоимпульсный локаатор. МКИ G01S 15/60, G01N 29/04, опубл. 27.12.2007. Бюл. №36.
6. *Волощенко В.Ю.* Гидролокатор ближнего действия с излучающей параметрической антенной. Деп. в ВИНТИ 23.6.92, №2037 – В92. – Таганрог, ТРТИ, 1992. – 25 с.
7. *Волощенко В.Ю.* О возможности различения акустического сопротивления границ раздела в водной среде по фазовым признакам эхосигналов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. – 2008. – №3. – С. 41-45.
8. *Кузнецов А.С.* Трехканальный осциллограф. – М.: Радио и связь, 1981. – 112 с.
9. *Букатый В.М., Дмитриев В.И.* Гидроакустические лаги. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 176 с.