

ДАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН В ПРОСВЕТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

А. Е. Малашенко, М. В. Мироненко, А. М. Василенко, Р. В. Леоненков

Обосновано нелинейное взаимодействие и параметрическое преобразование акустических просветных волн с измеряемыми или передаваемыми информационными волнами различной физической природы. Рассмотрены практические пути решения задачи дальнего параметрического приема и передачи информационных волн в просветных системах мониторинга и контроля морских акваторий, формируемых с использованием измерительных радиогидроакустических средств морского приборостроения.

Ключевые слова: просветная гидроакустическая система, нелинейное взаимодействие волн, параметрическое преобразование волн различной физической природы, дальний параметрический прием и передача информационных волн, радиогидроакустические средства морского приборостроения.

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от классических высокочастотных параметрических устройств излучения и приема сигналов просветная система контроля морских акваторий, основанная на реализации закономерностей нелинейной акустики, представляет собой многоканальную широкомасштабную параметрическую антенну с низкочастотной подсветкой (накачкой) среды. Параметрическое взаимодействие просветных и информационных сигналов, а также преобразование их полями (или специальными излучениями) объектов происходит на всем пути их распространения в водной среде. Наиболее эффективное параметрическое взаимодействие осуществляется в сопутствующей движущимся объектам нелинейной области, которая имеет достаточно большие величины, например, в случае возмущения среды кильватерным следом она может составлять единицы кубических километров [1–3].

Задача, решение которой приведено в работе, заключается в представлении просветной гидроакустической системы мо-

нитинга и контроля морских акваторий как многолучевой параметрической системы, обеспечивающей дальний и сверхдальний параметрический прием и передачу информационных волн различной физической природы в морской среде.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НИЗКОЧАСТОТНОГО ПРОСВЕТНОГО МЕТОДА ГИДРОЛОКАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРОТЯЖЕННОГО ОКЕАНИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Для обоснования просветной активно-пассивной системы гидролокации как параметрической с низкочастотной накачкой (подсветкой) контролируемой среды или рубежа, рассмотрим закономерность формиро-

вания структуры просветного поля при распространении акустической энергии из точки излучения в точку приема.

На рис. 1 приведена качественная картина пространственной структуры зон Френеля между точками излучения и приема просветных сигналов. Каждая из зон (на рис. 1 они обозначены в порядке возрастания от 1 до h_n) в пространстве образуют эллипсоиды вращения. Причем первая зона образует ту область пространства, которая в основном определяет перенос энергии просветных акустических волн из точки излучения в точку приема. Энергия сигнала из точки излучения A в точку приема B распространяется в пределах области пространства,

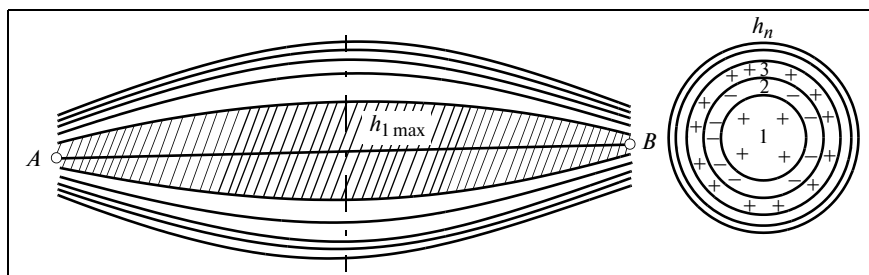


Рис. 1. Пространственная структура зон Френеля между точками излучения и приема акустических волн

границы которой определяются на основе принципа Гюйгенса и построения зон Френеля.

Действие всех остальных зон в результате их попарной нейтрализации (вследствие отличия по фазе на 180°) эквивалентно действию примерно половины первой зоны. Это означает, что для получения в точке приема энергии сигнала такой же величины, как и в свободном пространстве, необходимо, чтобы первая зона на всем пути распространения волн оставалась “чистой” от экранирования препятствиями или преобразования рассеивающими неоднородностями. Как следует из рис. 1 радиус h зоны Френеля номера n определяется по формуле

$$h_n = \sqrt{(R_1 R_2 \lambda n) / (R_1 + R_2)},$$

где R_1 , R_2 — расстояния, определяющие положение объекта на линии излучения-приема, λ — длина просветной акустической волны, n — номер зон Френеля (достаточно взять нечетное число зон, например три или пять).

Структура зон Френеля как пространственных трубок переноса акустической энергии из точки излучения в точку приема в многолучевом канале распространения волн представлена на рис. 2. При этом каждый луч просветного акустического поля выполняет функцию бестелесной параметрической антенны бегущей волны.

В случае расположения в пределах пространства первой зоны Френеля излучающего объекта с сопутствующей ей нелинейной неоднородностью среды будет происходить не только экранирование проходящих волн, но также их интенсивное параметрическое преобразование на рассеивателях этой неоднородности. В этом случае первая зона Френеля выполняет функции бестелесной простран-

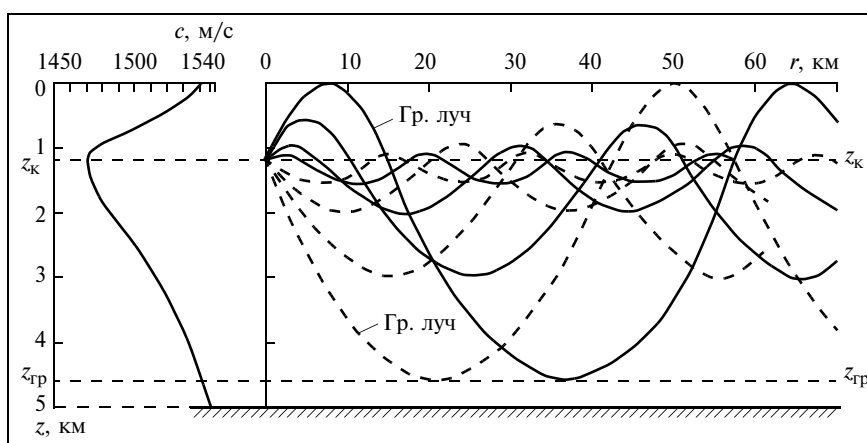


Рис. 2. Лучевая структура просветного поля в гидроакустическом канале:

c — скорость звука; r — расстояние; z — глубина; z_k — глубина оси подводного звукового канала; $Гр. луч$ — граничные лучи подводного звукового канала, глубины заворота которых совпадают с глубинами границ канала (границами подводного звукового канала являются поверхность и горизонт на глубине $z_{гр}$)

ственной параметрической просветной антенны бегущей волны. Особенностью реализации просветного метода гидролокации как параметрического в океаническом волноводе является то, что гидроакустическая система контроля среды в этом случае представляет многолучевую приемоизлучающую антенну.

Переходя к обоснованию нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных и информационных волн, отметим, что классическое выражение взаимодействия волн применительно к низкочастотному просветному методу не может быть использовано непосредственно. В этом случае взаимодействие может происходить на больших (десятки-сотни километров) удалениях от приемника. Исходя из этого, в выражениях взаимодействия просветных волн с объектами следует учитывать [1]:

— наличие затухания просветной волны, обусловленное ее расхождением при распространении в волноводе в соответствии с известными принци-

пами, которое обратно пропорционально квадрату расстояния;

— взаимодействие волн по объему нелинейно-возмущенной среды;

— повышенную степень нелинейности среды в объеме взаимодействия;

— малое отличие частот просветных волн ω_n и полезного сигнала ω_c , что обеспечивает их более интенсивное взаимодействие.

С учетом этих поправок аналитические зависимости для амплитуд комбинационных волн и индекса фазовой модуляции могут быть представлены в следующем виде [1–4]:

$$p_k = \frac{(\gamma + 1)\omega_n\omega_c p_n p_c V}{4\rho_0(c_0)^3 R^2};$$

$$\Delta\varphi = \frac{(\gamma + 1)\omega_c p_c V}{2\rho_0(c_0)^3 R^2}, \quad (1)$$

где V — объем среды нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн; R — расстояние от точки излучения до точки расположения объема локации; γ — коэффициент нелинейности морской среды; p_n — давление просветного

сигнала; p_c — давление инфо-
мационного сигнала; ρ_0 , c_0 —
плотность и скорость звука в не-
возмущенной среде.

Как видно из выражений (1),
давление комбинационных волн
и индекс фазовой модуляции
аналогичны классической зави-
симости, но в этом случае воз-
растет полезная фазовая моду-
ляция просветных сигналов ин-
формационными низкочастот-
ными, что обусловлено усиле-
нием взаимодействия волн в
объеме среды с повышенной
нелинейностью. Характеристи-
ка направленности просветной
приемопередающей параметри-
ческой антенны подобна про-
странственной антенне бегущей
волны и поэтому обладает высо-
кой направленностью и поме-
хозащищенностью. Она может
быть представлена в виде

$$\theta_{\text{рад}} = 2 \arctg(h_n/R),$$

где h_n — радиус зоны Френеля
номера n .

Таким образом, ширина ха-
рактеристики направленности
просветной приемопередающей
параметрической антенны огра-
ничивается пределами первых
зон Френеля, которые, в свою
очередь, определяются длиной
волны просветных сигналов и
протяженностью барьерной ли-
нии. Исходя из этого следует,
что в отдельных случаях направ-
ленность и помехозащищен-
ность приемопередающей про-
светной антенны могут значи-
тельно превосходить классиче-
ские. Понятие ширины харак-
теристики направленности на
уровне половины мощности для
такой антенны практически от-
падает, что также обеспечивает
ее преимущество.

Итак, совместное распро-
странение в нелинейной мор-
ской среде просветной звуковой
волны с информационными вол-
нами “малых амплитуд” сопро-

вождается их взаимодействием
и параметрическим преобразо-
ванием. Следует отметить также,
что преобразование просветных
акустических волн может осу-
ществляться излучениями (вол-
нами) различной физической
природы (акустическими, элект-
ромагнитными, гидродинами-
ческими). Результатом парамет-
рического преобразования взаи-
моделирующих волн является
их взаимная амплитудно-фазо-
вая модуляция. Сформирован-
ные в результате преобразова-
ния просветных волн парамет-
рические составляющие суммар-
ной и разностной частоты при
обработке эффективно выделя-
ются как признаки фазовой мо-
дуляции, что обосновано мате-
матическими зависимостями и
подтверждено результатами мор-
ских экспериментов [4, 5].

Итак, просветная приемопе-
редающая параметрическая ан-
тенна, основанная на низкочас-
тотной подсветке контролируе-
мой среды, формируется по
каждому отдельному акустиче-
скому лучу. Совокупность про-
светных лучевых трубок в верти-
кальной плоскости обеспечи-
вает формирование многолучевой
приемопередающей параметри-
ческой антенны пространствен-
но развитой по протяженности
контролируемой акватории.

СУЩНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Известно, что характери-
стики гидрофизических полей мор-
ской среды различной физичес-
кой природы, в которой распро-
страняется гидроакустическая
волна, влияют на ее параметры.
Это связано с тем, что влияние
гидрофизических полей осуще-
ствляется через изменение плот-
ности и коэффициента упругос-
ти среды. По своей физической

сущности изменение плотности
водной среды в рабочей зоне па-
раметрического приема являет-
ся следствием воздействия на
нее информационными полями.

Любые изменения плотнос-
ти среды при постоянной тем-
пературе приводят к изменению
фазовой скорости звука в зоне
взаимодействия электромагнит-
ной волны с упругой через мор-
скую среду, проводящую элект-
рический ток. В отличие от
классических уравнений гидро-
динамики для идеальной жид-
кости, которые используются в
теории нелинейных параметри-
ческих излучателей, в уравнени-
ях для нелинейной промодули-
рованной среды фазовая ско-
рость упругой волны изменяется
во времени и пространстве по
закону изменения электромаг-
нитной волны.

Таким образом, если в рабо-
чей зоне просветной парамет-
рической системы распростра-
няется электромагнитная волна
гармонической частоты $\Omega_{\text{ЭМ}}$, то
фазовая скорость упругой (про-
светной акустической) волны $c_{(f)}$
также будет меняться с той же
частотой $\Omega_{\text{ЗВ}} = \Omega_{\text{ЭМ}}$. Количес-
твенные характеристики глубины
модуляции можно получить, ис-
пользуя конкретные инженер-
ные модели реализации способа.

Исходя из этого, в работах
[1—3, 6, 7] показано, что любые
инфранизкочастотные волны,
сформированные морскими ис-
точниками или стихийными яв-
лениями, например, землетря-
сениями или цунами, будут на-
дежно зарегистрированы.

Морскими эксперименталь-
ными исследованиями обосно-
ваны закономерность и эффек-
тивность “тройного” взаимодей-
ствия акустических просветных
волн с акустическими и элект-
ромагнитными полями источ-
ников морской среды [5]. Ана-

литический вид такого преобразования представляется в следующем виде:

$$P^*(t) = 0,5P^2\{J_0(m_p)\cos 2\omega_1 t + J_1(m_p)[\cos(2\omega_1 - \Omega)t - \cos(2\omega_1 + \Omega)t] + J_2(2A/P)[\cos(2\omega_1 - 2\Omega)t + \cos(2\omega_1 + 2\Omega)t] + J_3(2A/P)[\cos(2\omega_1 - 3\Omega)t - \cos(2\omega_1 + 3\Omega)t] + \dots\},$$

где $P^*(t)$, $P(t)$ — соответственно результирующее (промодулированное) и мгновенное значения просветной акустической волны; ω_1 , ω_2 — круговая частота акустической просветной и электромагнитной объектных волн; Ω — низкочастотная акустическая волна от объекта; φ — начальная фаза просветной волны; t — текущее время; J_n — функции Бесселя n -го порядка; A_0 , A_m — амплитуды исходной и промодулированных волн; m — коэффициент модуляции.

Анализ этого выражения показывает, что спектр колебаний взаимодействующих волн состоит из бесконечного числа составляющих, расположенных симметрично относительно удвоенной центральной частоты 2ω (равной $\omega_1 + \omega_2$), значения частот которых отличаются от 2ω на $n\Omega$, где n — любое целое число. Амплитуды n -х боковых составляющих будут определяться выражением $J_n(2A_m/P)0,5P^2$, из которого следует, что вклад различных боковых составляющих в суммарную мощность модулированного колебания определяется величиной $2A_m/P$. Причем при малых значениях коэффициента модуляции m_p спектр колебания будет состоять приближенно из гармоник центральной частоты 2ω (суммарной) и двух боковых частот: верхней ($2\omega + \Omega$) и нижней ($2\omega - \Omega$).

На рис. 3 показано, что морские источники могут быть обнаружены по признакам преобразования их упругими и электромагнитными полями, распро-

страняющихся в среде просветных акустических волн.

На рисунке просветная волна имеет частоту 388 Гц, электромагнитное излучение судна —

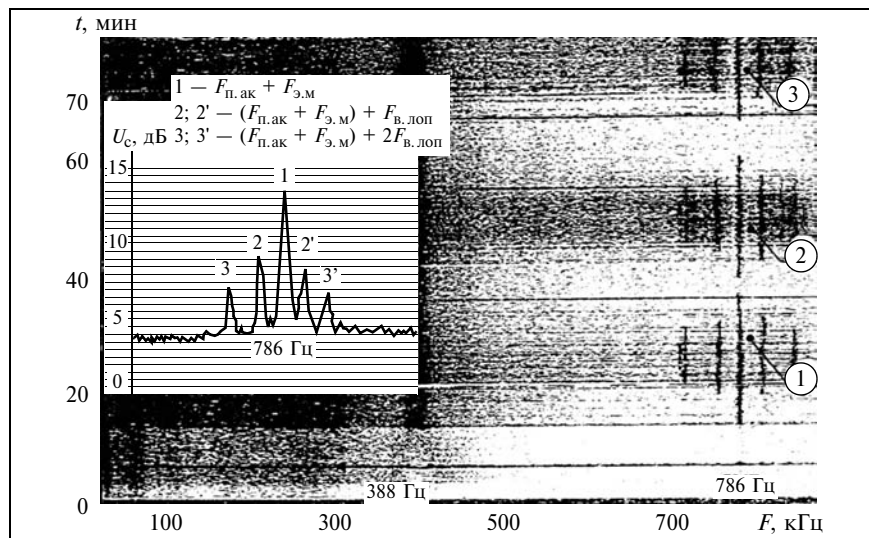


Рис. 3. Спектр излучений морского судна. Параметрические измерения акустических и электромагнитных волн (“тройное” взаимодействие просветных $F_{п.ак}$, электромагнитных $F_{эм}$ и упругих вально-лопастных $F_{в.лоп}$ волн):

кривая 1 — $F_{п.ак} + F_{эм}$; кривые 2—2' — $(F_{п.ак} + F_{эм}) \pm F_{в.лоп}$; кривые 3—3' — $(F_{п.ак} + F_{эм}) \pm 2F_{в.лоп}$

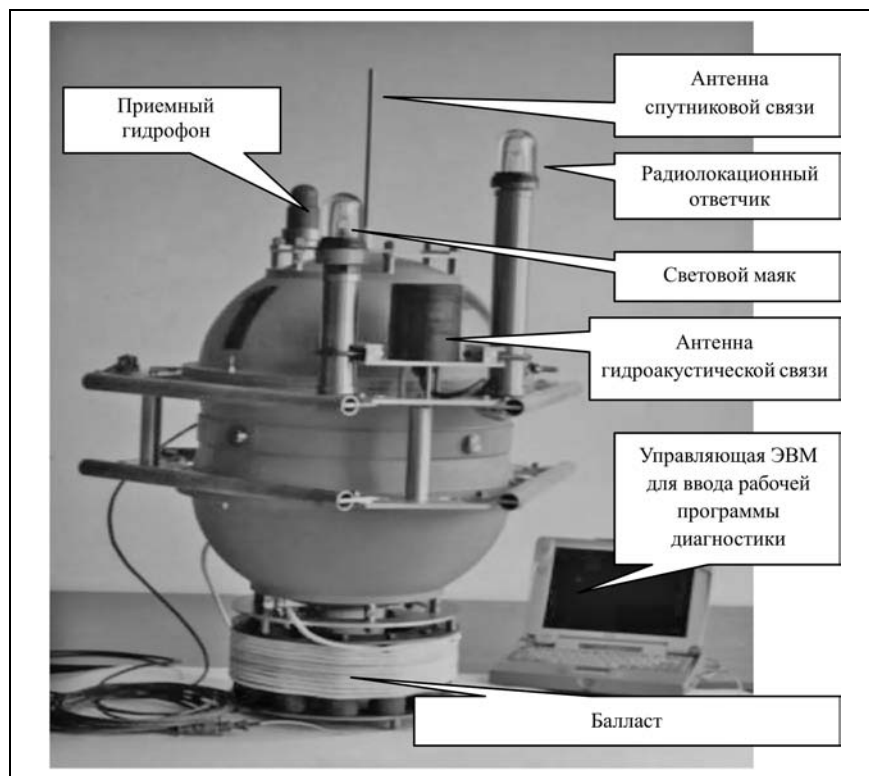


Рис. 4. Общий вид контрольно-измерительного радиогидроакустического комплекса

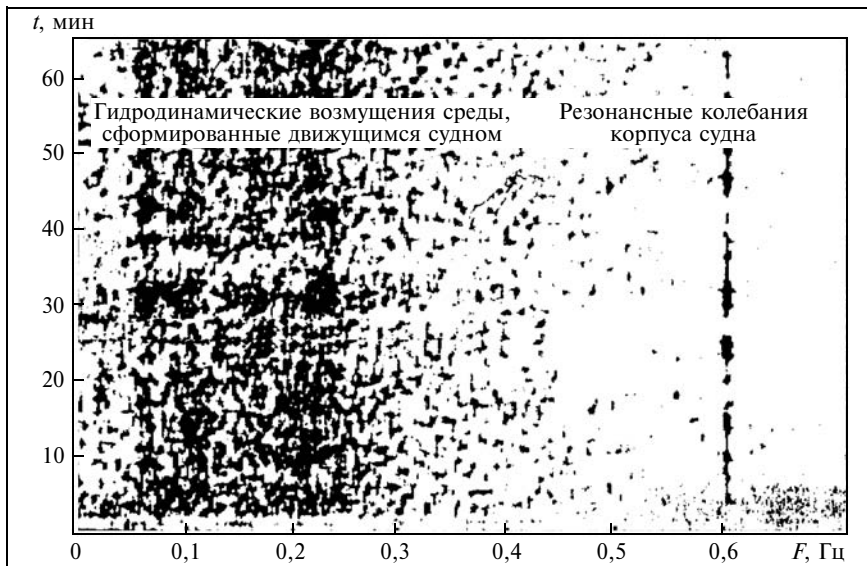


Рис. 5. Спектр шумоизлучения морского судна. Параметрические измерения гидродинамических и акустических (резонансных) волн

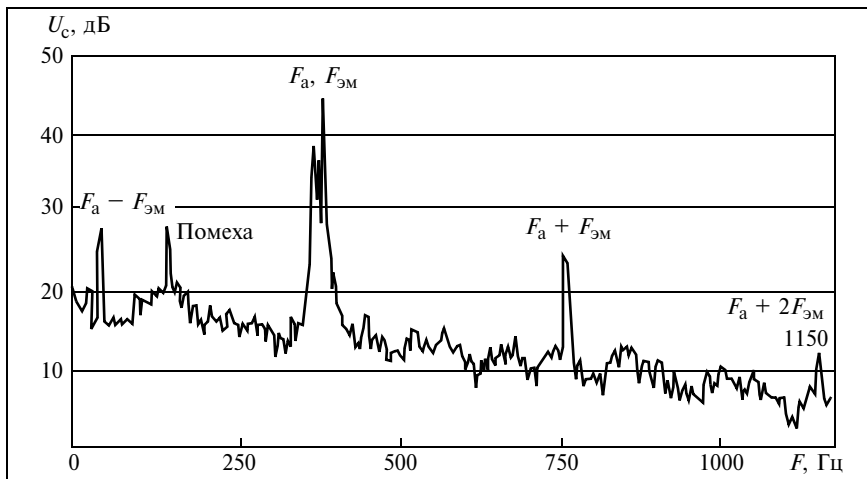


Рис. 6. Спектр излучений морского судна. Параметрические измерения электромагнитных волн

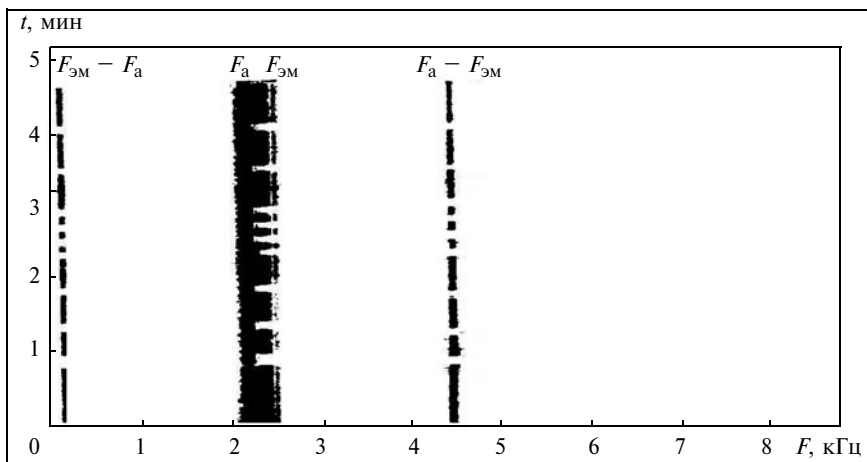


Рис. 7. Пример передачи информационных электромагнитных волн (передача сигналов SOS)

частоту 400 Гц, суммарная волна ($F_{п.ак} + F_{ЭМ}$) имеет частоту 786 Гц, $(F_{п.ак} + F_{ЭМ}) \pm F_{в.лоп}$ — “тройное” взаимодействие волн в морской среде.

На рис. 4 представлена конструкция измерительного радиогидроакустического комплекса, используемого в системах контроля морских акваторий. Экспериментальными исследованиями просветных параметрических систем подтверждена их эффективность. Информационные волны различной физической природы в диапазоне частот сотни-десятки-единицы-доли герца надежно принимаются и передаются на большие расстояния.

Результаты экспериментальных исследований эффективности дальнего параметрического приема и передачи волн различной физической природы (акустических, электромагнитных, гидродинамических) на просветных линиях протяженностью десятки-сотни километров приведены на рис. 5—7.

ВЫВОДЫ

Просветная приемопередающая параметрическая антенна, основанная на низкочастотной подсветке пространства или заданного рубежа контролируемой среды, формируется по отдельному акустическому лучу. Каждый луч просветной системы представляет собой протяженную объемную параметрическую антенну, обеспечивающую эффективное решение задачи дальнего параметрического приема волн различной физической природы в широком диапазоне частот. Совокупность лучей просветного поля в вертикальной плоскости обеспечивает формирование многолучевой приемопередающей параметрической антенны, пространственно развитой по протяженности контролируемой акватории.

Построение протяженных многолучевых просветных параметрических антенн приема и передачи информационных волн в морской среде обеспечивает дальний и сверхдальний параметрический прием и передачу волн различной физической природы в диапазоне частот сотней десяти-единицы-доли герца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироненко М. В., Малашенко А. Е., Василенко А. М. и др. Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды. — Владивосток: СКБ САМИ ДВО РАН, 2006. — 172 с.
2. Малашенко А. Е., Мироненко М. В. и др. Создание и эксплуатация радиогидроакустических систем мониторинга гидрофизических полей морских акваторий. — Владивосток: СКБ САМИ ДВО РАН, 2012. — 263 с.
3. Мироненко М. В., Короченцев В. И. Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской воде // Междунар. симп. “Подводные технологии — 2000”. Япония, Токио, май 2000. — С. 105—109.
4. Малашенко А. Е., Мироненко М. В., Василенко А. М., Таболяков А. А. Параметрическая модель и реализация низкочастотного просветного метода гидролокации в условиях протяженного океанического волновода // IV Всерос. симп. “Сейсмоакустика переходных зон”. — Владивосток: Дальнаука, ТОИ ДВО РАН, 2005. — С. 206—210.
5. Шостак С. В., Мироненко М. В., Сургаев И. Н. Амплитудно-фазовая модуляция просветных акустических волн при их взаимодействии с электромагнитными в морской среде: Сб. статей. — Владивосток: ТОВМИ, 2001. — Вып. 22. — С. 82—88.
6. Пат. РФ RU 2453930 С1. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде / М. В. Мироненко, А. Е. Малашенко, Л. Э. Карачун, А. М. Василенко // Бюл. — 2010.
7. Пат. РФ RU 2472236 С1. Способ передачи информационных волн в морской среде / М. В. Мироненко, А. Е. Малашенко, Л. Э. Карачун, А. С. Корытко // Бюл. — 2011.

Анатолий Емельянович Малашенко — канд. техн. наук, директор, главный конструктор Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН;

☎ (4242) 75-20-60

E-mail: aemalashenko@skbsami.ru

Михаил Владимирович Мироненко — д-р техн. наук, профессор, гл. научн. сотрудник лаборатории гидрофизики СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4232) 227-67-10

E-mail: professor@mail.primorye.ru

Анна Михайловна Василенко — научн. сотрудник ВУНЦ ВМФ “ВМА” (филиал, г. Владивосток);

☎ (4232) 245-87-86

E-mail: kahunya@gmail.com

Роман Викторович Леоненков — инженер-конструктор СКБ САМИ ДВО РАН.

☎ (4242) 55-03-27

E-mail: roma1313@mail.ru

□

УДК 551.465:556.08

АВТОНОМНЫЙ ЦИКЛИРУЮЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ “АКВАЗОНД”

А. Е. Малашенко, В. В. Перунов, А. И. Чудаков

Представлена работа по созданию автономной многофункциональной станции для мониторинга гидрофизических параметров акваторий, обеспечивающего контроль и прогнозирование состояния водной среды. Станция производит измерения различных параметров морской среды в течение длительного времени, сохраняет полученные данные и осуществляет их передачу в централизованные пункты сбора.

Ключевые слова: автономная гидрофизическая станция, мониторинг водной среды, передача данных по радиоканалу.

Одним из важнейших аспектов исследований процессов, происходящих в океане, является оценка и прогноз глобального изменения климата на основании результатов долгопериодных наблюдений в рамках мониторинга морской среды. Основной проблемой при выполнении прогнозных оценок состояния морской среды является получение и анализ натурных данных.

К настоящему времени в результате многолетних наблюдений уже накоплен обширный фактический материал, не только характеризующий состояние отдельных компонентов контролируемых

акваторий, но и позволяющий проследить многолетнюю динамику их важнейших структурных и функциональных показателей как в рамках естественных межгодовых вариаций, так и под влиянием антропогенных факторов.

В связи с бурным развитием средств освоения шельфовых зон морских акваторий становится актуальным проведение мониторинга гидрофизических характеристик среды в условиях постоянно возрастающего антропогенного воздействия на экосистему. Проводимый мониторинг должен обеспечивать оценку вариации измеряемых гид-