

Злобин Дмитрий Владимирович

E-mail: dimmanuel@mail.ru

Kasatkin Boris Anatolyevich

Institute of Marine Technology Problems FEB RAS

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Flat 8, 2, Suchanova Street, Vladivostok, 690091, Russia, Ph.:(4232) 43-25-78

Zlobina Nadeshda Vladimirovna

E-mail: zlobina@marine.febras.ru

Statsenko Lubov Grigorievna

Far Eastern State Technical University

E-mail: rts@festu.ru

Flat 30, 83, Okeanskiy, Vladivostok, 690002, Russia, Ph.: (4232) 45-89-34

Zlobin Dmitriy Vladimirovich

E-mail: dimmanuel@mail.ru

УДК 551.463.621.391

В. И. Каевитсер, В. М. Разманов, А. В. Элбакидзе, И. В. Смольянинов

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО
ЛЧМ-ПРОФИЛОГРАФА**

Исходными данными для интерпретации результатов исследования структуры морского дна с помощью акустического профилографа являются профилограммы - зависимость мощности отраженного сигнала от задержки (глубины) вдоль трассы измерений. Использование в профилографах когерентных широкополосных сигналов, цифровая регистрация полного сигнала открывают возможность использования дополнительно к мощности (амплитуде) также спектральных характеристик отраженных сигналов для целей исследования структуры морского грунта.

ЛЧМ-сигнал; морские осадки; профилограф.

V. I. Kaevitser, V. M. Razmanov, A. V. Elbakidze, I. V. Smolyaninov

**SOME RESULTS OF ACOUSTIC SIGNALS CHARACTERISTICS
INVESTIGATION OF LOW FREQUENCY LFM-PROFILER**

Profilograms are the source data for the interpretation of investigation ocean floor results using acoustic profilograph. Profilogram is the dependence of echoic signal power on the time delay along measuring route. Using in profilographs wide-band signals and full signal digital data logging make it possible add spectral characteristics of reflected signals to the power (amplitude) ones for sea soil structure investigation.

LFM – signal; marine sediments; profiler.

Акустические профилографы в настоящее время являются одним из основных инструментов дистанционного исследования подповерхностной структуры морского грунта. Как правило, исходными данными для интерпретации результатов профилирования являются профилограммы – зависимость мощности отражен-

ного сигнала от задержки (глубины) вдоль трассы измерений. К сожалению, таких данных недостаточно для однозначного определения характеристик морского грунта. Для иллюстрации на рис. 1 приведены 2 примера геологической интерпретации данных профилирования, полученных в ходе работ по проектированию высокоширотной трансконтинентальной оптической линии связи "Поларнет". Следует отметить, что геологическая интерпретация в этих работах проводилась квалифицированным геологом как на основе данных профилирования, так и с учетом результатов пробоотборов грунта и априорной информации. Для данных примеров характерно наличие двух типов грунта – грязевой глины (mud) и более плотной глины (clay). Верхняя линия на приведенных рисунках отображает уровень дна. Нижняя граница слоя грязевой глины отображается второй линией, выше нижней линии расположен слой плотной глины. На верхнем рисунке данные профилирования достаточно хорошо совпадают с геологической интерпретацией, однако на нижнем рисунке сложная слоистая структура на профилограмме резко контрастирует с достаточно простой геологической интерпретацией.

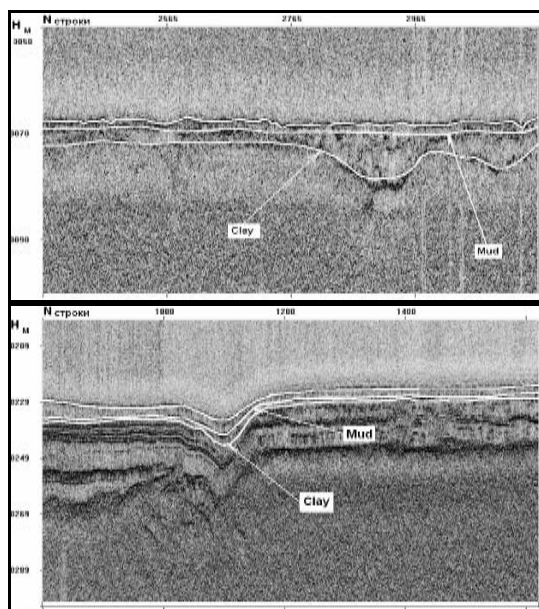


Рис. 1. Результаты профилирования (профилограммы) и их геологическая интерпретация (по вертикали отложена глубина (в метрах), по горизонтали – номер строки при последовательном зондировании)

никова РАН, со следующими характеристиками:

рабочая частота профилографа	5 кГц,
полоса частот порядка	4 кГц,
излучаемая мощность порядка	3 Квт.

В состав профилографа входят: многоэлементная антенная система, цифровой синтезатор зондирующих посылок, излучатель мощности, интерфейс ввода информации в РС. Для анализа использовались архивные данные, полученные в разное время и в различных районах [1].

1. Исследование изменения спектра ЛЧМ-сигналов в морском грунте

Анализ данных заключался в исследовании изменения спектра отраженного сигнала в зависимости от глубины H проникновения в морской грунт. Спектральный анализ проводился на фиксированных по длине последовательных интервалах времени (увеличения времени задержки) с перекрытием. Детально методика и основные результаты по данным измерений в Северном Ледовитом океане изложены в [2].

На рис. 2 приведены примеры изменения формы спектра отраженного сигнала по данным, полученным в ходе измерений в Арктике. Длина записи – 16 384 отсчета. Интервал спектрального анализа – 256 точек, равный длине модели. Скользящий спектральный анализ начинается со смещения в 512 точек от линии дна, сдвиг интервала оценивания – половина участка спектрального анализа, общее число спектров – 20, на графике показаны первые 12. В верхней части рисунка показан фрагмент профилограммы, на котором выделен участок обработки. На трех нижних рисунках показаны в виде трех групп последовательные спектры отраженного сигнала (номер спектра соответствует увеличению глубины отражения). Спектры с номерами 0 – 2 представляют спектры сигнала, отраженного от водной среды до дна. Спектры 4 – 5 соответствуют отражению от поверхности дна с характерным преобладанием высокочастотной части. По мере увеличения глубины начинает преобладать низкочастотная часть (спектры 6 – 7 и выше). Спектры выше 12 уже соответствуют шумовому сигналу.

Данные на рис. 2 качественно показывают трансформацию скользящего спектра отраженного сигнала, отмеченную в [1]. В окрестности отражения от поверхности раздела вода – грунт начинает преобладать высокочастотная часть спектра, по мере проникновения в грунт высокочастотная часть затухает, начинает преобладать низкочастотная часть спектра.

Отметим, что в предположении линейной зависимости затухания от частоты по степени асимметрии спектра отраженного сигнала можно определить коэффициент частотной зависимости затухания в пределах полосы сигнала.

Изменение формы спектра широкополосного сигнала с глубиной приводит к методу преобразования данных профилирования с целью выделения структуры морского дна по степени частотного затухания. Для того чтобы перейти от яркостных изображений к частотному затуханию, можно использовать интегральные характеристики формы, принятые в статистике.

2. Изменение числовых характеристик формы спектра отраженного сигнала

В статистике для характеристики формы функций распределения используются несколько интегральных характеристик. Эти величины можно использовать и для описания формы спектра $G(f)$. Это следующие основные характеристики [3]:

1. Средняя частота – центр тяжести спектра $f_0 = \int f \cdot G(f) df$.

2. Моменты спектра $M_n = \int (f - f_0)^n G(f) df$.

Второй момент $\sigma^2 = M_2 = \int (f - f_0)^2 G(f) df$.

Величина σ может рассматриваться как один из вариантов определения "ширины" спектра.

3. Коэффициент асимметрии k , характеризующий симметрию спектра

$$\text{относительно центральной частоты } f_0 \quad k = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}}.$$

4. Коэффициент эксцесса ν , характеризующий сглаженность спектра в окрестности центральной частоты: $\nu = \frac{M_4}{M_2^2} - 3$.

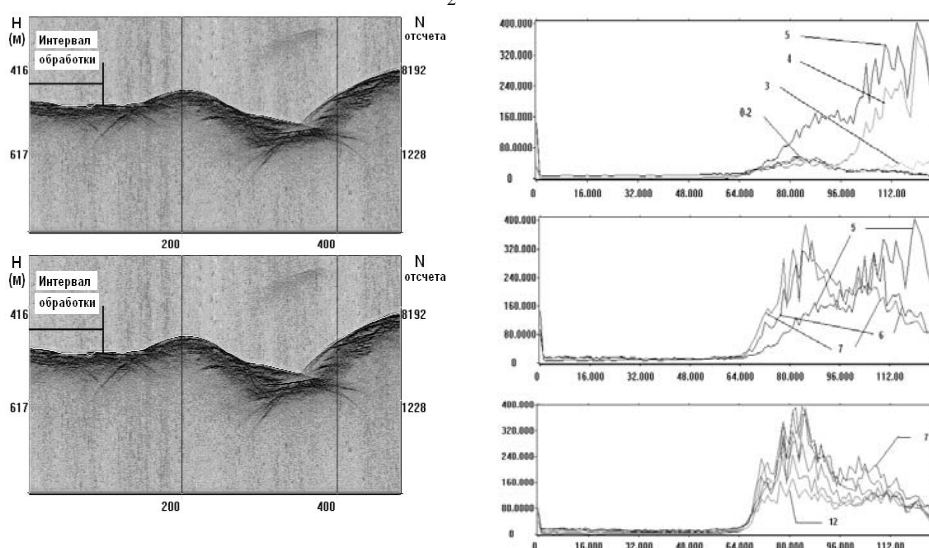


Рис. 2. Акустическое изображение (сверху) и последовательное изменение спектра сигнала (по оси абсцисс указан номер спектрального отсчета, пропорциональный частоте)

Алгоритм расчета отдельных характеристик формы спектра можно рассматривать как вариант преобразования данных профилирования, ориентированный на частотное затухание – изменение амплитуды по частоте в зависимости от глубины. Обработка данных проводилась следующим образом. Выбирался интервал спектрального анализа (для приведенных ниже примеров это 256 точек), обычно совпадающий с длиной модели. На этом интервале с помощью БПФ вычислялся спектр и для него находились коэффициенты, приведенные в начале этого раздела. Эти данные относились к середине интервала спектрального оценивания. Далее интервал смещался на один отсчет. Таким образом проводилось преобразование данных для всей строки. Для расчета спектров использовались как свернутые данные, так и несвернутые. Предусмотрено также усреднение вычисляемых спектров по соседним элементам и строкам.

На рис.3 приведены данные об изменении некоторых числовых характеристик формы спектра для одного фрагмента файла данных. Полностью этот файл содержит 3163 строки и характеризуется достаточно простой структурой: тонким слоем вдоль линии дна грязевой глины и слоем более плотной глины (рис. 3). Приведенный фрагмент относится к началу файла регистрации. На всех растровых рисунках по горизонтали отложен номер строки, соответствующий номеру послышки при последовательном зондировании.

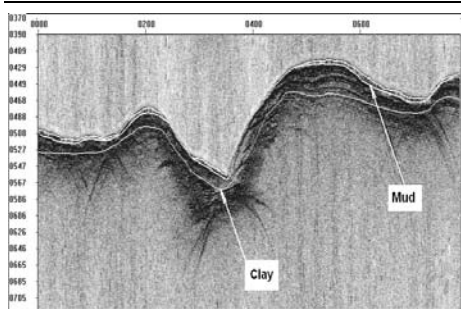


Рис. 3. Фрагмент акустического изображения (амплитуда отраженного сигнала в зависимости от номера строки) с геологической интерпретацией

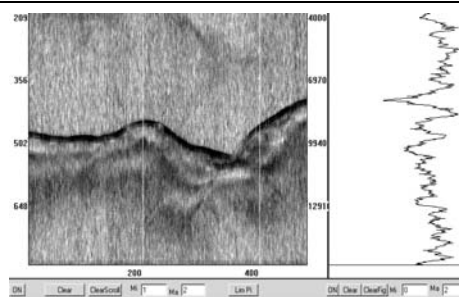


Рис. 4. Растровая развертка (слева) коэффициента асимметрии свернутого сигнала: шкала слева – глубина в метрах, справа – номер отсчета. График в правой части относится к последней строке растровой развертки

Показанные на рис. 4, 5 изменения коэффициента асимметрии и средней частоты (центра спектра) дополняют характер изменения спектра, представленный в предыдущем разделе. В узком придонном слое грязеподобной глины спектр имеет преимущественно высокочастотную часть, по мере увеличения глубины в плотной глине начинает превалировать низкочастотная область.

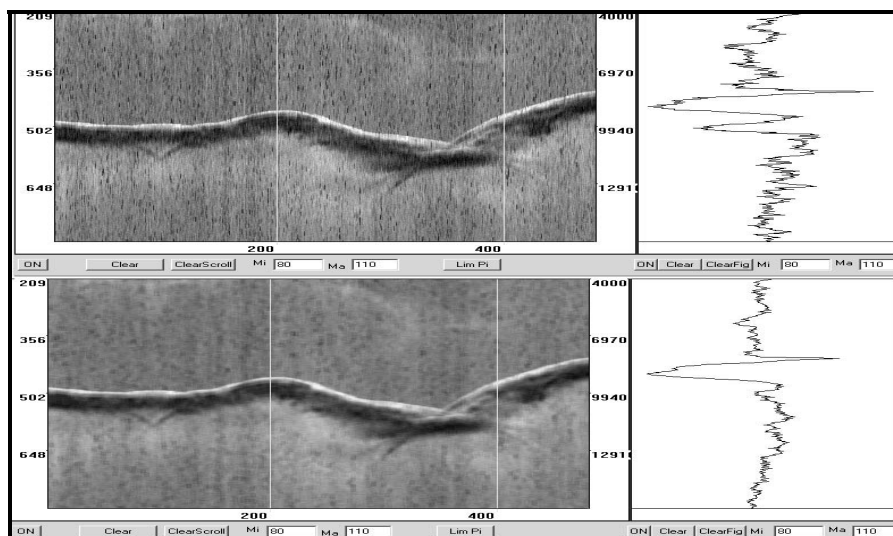


Рис. 5. Варианты развертки центра тяжести спектра: верхний график для несвернутых данных, нижний – несвернутые данные с усреднением по пяти смежным строкам. Справа указаны профили изменения для последней строки

Развертка ширины спектра σ , показанная на рис. 6, характеризует эффективную глубину профилирования по спектральным данным. График коэффициента эксцесса содержит какие-то детали, однако интерпретировать их трудно.

Из представленных примеров видно, что в них центральная частота f_0 лучше выделяет трансформацию спектра, чем коэффициент асимметрии. Одна из причин этого, возможно, заключается в том, что при расчетах центральных моментов использовалась вычисляемая центральная частота. Вероятно в данном случае более правильно было бы использование центра спектра модели (спектра зондирующего сигнала).

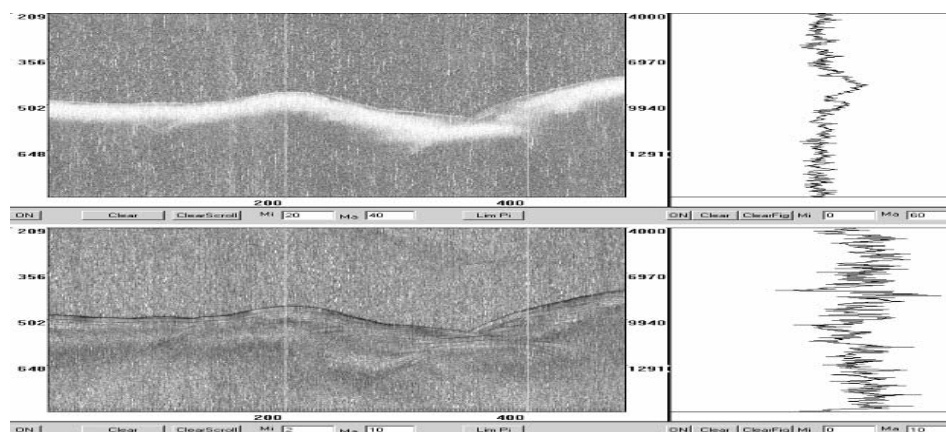


Рис. 6. Развертка ширины спектра σ (сверху) и коэффициента эксцесса (снизу)

Дальнейшим развитием подобной спектральной методики представления данных профилирования для определения структуры морского дна может являться расчет непосредственно частотного затухания.

3. Анализ изменения мгновенной частоты отраженного сигнала

Приведенным в разд. 2 данным об изменении отдельных характеристик формы спектра отраженного сигнала можно дать несколько иную интерпретацию. Рассмотрим представление комплексного отраженного сигнала $S(t)$ в форме зависящих от времени амплитуды $A(t)$, фазы $\Psi(t)$ и, соответственно, частоты $\Omega(t)$:

$$S(t) = A(t)e^{i\Psi(t)}, \quad \Omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt}.$$

С сигналом $S(t)$ связан его фазовый спектр $S(\omega)$ и энергетический спектр $G(\omega)$

$$S(t) = \int S(\omega)\exp(i\omega \cdot t)d\omega, \quad G(\omega) = |S(\omega)|^2.$$

Характеристики формы спектра $G(\omega)$ отраженного сигнала и их изменение с глубиной рассмотрены в предыдущем разд. 2. Оказывается, моменты спектра $G(\omega)$ связаны с мгновенной частотой $\Omega(t)$ и мгновенной амплитудой $A(t)$. В частности, в [4] показано, что центральная частота ω_0 энергетического спектра $G(\omega)$ связана с мгновенной частотой и амплитудой соотношением

$$\omega_0 = \frac{\int A^2(t)\Omega(t)dt}{\int A^2(t)dt}, \quad \omega_0 = 2\pi \cdot f_0.$$

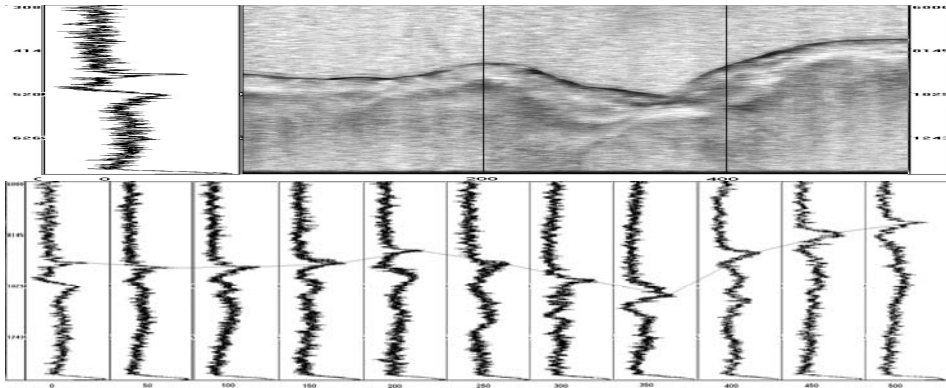


Рис. 7. Развертка приращения фазы (частоты) отраженного сигнала и профиль изменения для первой строки (вверху)

Таким образом, центральная частота спектра есть просто усредненная за период наблюдения средняя мгновенная частота $\omega_0 = \overline{\Omega}$. Это становится совсем точно, если считать амплитуду постоянной $A(t) \equiv 1$, тогда

$$\omega_0 = \frac{\int \Omega(t)dt}{T},$$

здесь T – время наблюдения.

Таким образом, отмеченная в разд. 2 трансформация скользящего спектра должна соответствовать изменению мгновенной частоты отраженного сигнала с глубиной (задержкой), и изменение мгновенной частоты может оказаться информативной характеристикой для выделения структуры морского дна.

Для иллюстрации связи мгновенной частоты и спектра отраженного сигнала ниже приведены результаты обработки данных, показанных на рис.3, характеризующиеся относительно простой структурой морского дна.

На рис. 7 показана растровая развертка мгновенной частоты (приращения фазы) и профили изменения для отдельных строк. Профили частоты для отдельных строк, начиная со строки 0 с шагом в 50 строк (внизу). Усреднение при обработке частоты по 9 строкам и 21 отсчету. Ломаная линия на нижней части соответствует линии дна. Видно, что для данного фрагмента частота имеет пик в окрестности дна, далее следует уменьшение в слое плотной глины и снова увеличение до примерно постоянного уровня.

Для сравнения на рис. 8 приведено изменение центральной частоты скользящего спектра, рассчитанной в соответствии с методикой разд. 2. Размерность БПФ – 256 точек. Использовались несвернутые данные. Профили изменения центральной частоты скользящего спектра для 5 строк (0, 50, 100, 150, 200).

Видно, что характер изменения мгновенной частоты отраженного сигнала и центральной частоты скользящего спектра практически одинаковы.

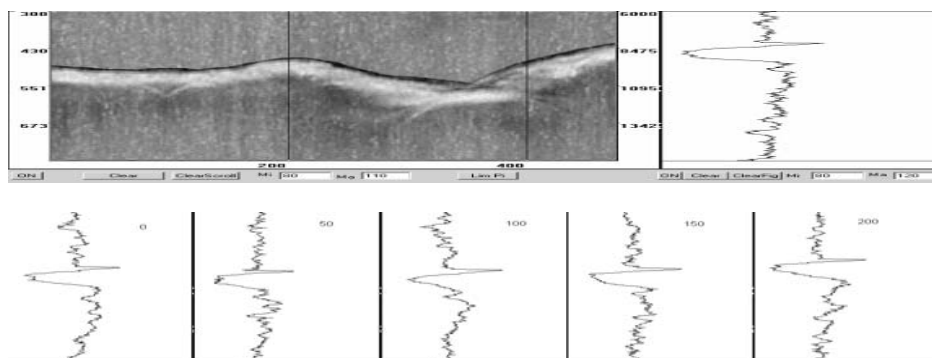


Рис. 8. Развертка центральной частоты скользящего спектра и профиль изменения для последней строки (справа)

Из представленных на рис.3 – 8 данных следует, что в данном случае спектральные характеристики хорошо отображают наличие тонкого приповерхностного слоя (грязевой глины) и нижележащего более толстого слоя (плотной глины). Приведенные данные об изменении характеристик скользящего спектра и мгновенной частоты позволяют сделать вывод, что подобная трансформация входных данных, ориентированная на изменение затухания с частотой, может оказаться полезной дополнительной информацией при изучении структуры морского грунта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А., Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // Радиотехника. 2008. № 8.
2. Долотов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Саворский А.В., Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ-зондирующим сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ. Таганрог, 2004. № 5.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1969.
4. Финк Л.М. Соотношение между спектром и мгновенной частотой сигнала // Проблемы передачи информации. Т. 11. 1966. Вып. 4.

Каевицер Владилен Иосифович

Федеральный институт радиоэлектроники (ФИРЭ) им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (РАН)

E-mail: kvi@ire.rssi.ru

111250, Россия, Москва, Е-250, Красноказарменная, 17

Разманов Владимир Михайлович

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

Элбакидзе Андрей Владимирович

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

Смольянинов Илья Вячеславович

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

Kaevitser Vladilen Iosifovich

Federal Institute of Radioelectronics by named V.A. Kotelnikov

E-mail: kvi@ire.rssi.ru

17, Krasnokazarmennay, Moscow, T-250, 111250, Russia

Razmanov Vladimir Michailovich

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

Elbakidze Andrei Vladimirovich

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

Smolyaninov Iia Viacheslavovich

E-mail: razvlmi@ire.rssi.ru

УДК 534.222.2

А.В. Воронин, С.П. Тарасов, В.П. Кузнецов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЕМНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНТЕНН В
ИССЛЕДОВАНИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ АКВАТОРИЙ**

В работе приводятся характеристики приемной параметрической антенны, работающей в среде с растворенными газовыми пузырьками. Показано, что изменение частоты волны накачки изменяет форму характеристики направленности, что может служить информативным признаком в экологическом мониторинге водных акваторий.

Приемная параметрическая антенна; характеристика направленности; антенна бегущей волны; взаимодействие акустических волн.

A.V. Voronin, S.P. Tarasov, V. P. Kuznecov

**USING THE RECEIVING PARAMETRIC ARRAYS IN INVESTIGATION
OF THE FEATURES WATER AREA**

Features receiving parametric array happen to in work, working in ambience with dissolved gas bubble. It is shown that change the frequency of the pumping waves changes form beam pattern that can serve by sign in ecological monitoring water area .

Reception parametric array; beam pattern; running wave array; interaction of the acoustic waves.

Взаимодействие акустических волн в приемных и излучающих параметрических акустических антеннах происходит в среде с изменяющимися характеристиками – плотностью среды, скоростью звука, затуханием звука, наличием различных неоднородностей. При изменении этих параметров меняются характеристики результирующего поля. И если такие характеристики для излучающих параметрических антенн достаточно хорошо изучены, чтобы по ним судить о параметрах среды взаимодействия, то характеристики приемных параметрических антенн в таких средах необходимо уточнить. Особенно сильно влияют на характеристики приемных параметрических антенн растворенные газовые пузырьки. Область резонансных частот таких пузырьков лежит в низкочастотном диапазоне. Поэтому применение приемных параметрических антенн для приема низких частот предполагает использование больших баз антенны и, следовательно, довольно низких частот волн накачки. Так, в одной из приемных антенн [1] использовалась частота