

РЕГИСТРАЦИЯ МОДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

С.А. Шпак, К.П. Бойко, В.С. Колмогоров

Одним из важнейших свойств подводных морских объектов является их скрытность. Подводный шум морского объекта является её демаскирующим фактором. По характерным особенностям шума морского объекта возможно определение класса морского объекта и определение элементов его движения. К основному направлению повышения эффективности регистрации первичного поля малозумных подводных объектов следует отнести расширение номенклатуры измеряемых характеристик, включая спектральные, в том числе и модуляционные характеристики. В статье рассматриваются модуляционные характеристики первичного гидроакустического поля морского объекта, полученные экспериментально в мелком море. Моделирование акустического поля, создаваемое точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе, подтвердило формирование частотно-пространственной модуляции широкополосного сигнала в мелководной акватории за счет интерференции прямого и отраженного от поверхности моря сигнала. Моделирование показало, что для регистрации частотно-пространственной модуляции широкополосного сигнала в мелководной акватории при малых траверзных расстояниях прохода морского объекта необходимо использование распределенных в вертикальной плоскости приемников. Показано, что регистрация модуляционных характеристик шумоизлучения морских объектов в виде дискретных составляющих спектра демодулированного сигнала возможна с использованием гомоморфной фильтрации на основе кепстральной обработки сигнала.

Ключевые слова: первичное гидроакустическое поле, частотно-пространственная интерференция, модуляционные характеристики, кепстральная обработка сигнала, гомоморфная фильтрация.

Введение

Уровни и спектральный состав подводного шума, излучаемого морскими объектами, в настоящее время стоят в одном ряду с такими традиционно важными тактико-техническими их характеристиками, как скорость полного хода, живучесть энергетической установки, параметры вооружения и т.д. В соответствии с этим задача измерения акустических параметров морских объектов является одной из важнейших [1, 2].

Малозумные морские объекты (ММО), и в частности автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА), способны выполнять поставленные задачи как в океане, так и в мелководных морских районах, которые имеют специфику формирования первичного гидроакустического поля (ПГАП) из-за наличия и существенного влияния поверхности и дна морской акватории.

Как показали экспериментальные исследования, основной вклад в шумоизлучение АНПА при движении в мелководной акватории вносит кавитационный шум винтов [3, 4], который имеет широкополосный характер, поскольку он образуется за счет коротких импульсных сигналов схлопывания воздушных пузырьков. Другой весомой причиной широкополосного шума движущегося АНПА является обтекание водой его корпуса. При этом турбулентными потоками воды кроме создания гидродинамического широкополосного шума возбуждаются резонансные колебания корпуса аппарата, добавляющие в шум АНПА дополнительные дискретные составляющие [3]. Поэтому широкополосный шум АНПА, имеющий высокоскоростные винты, является характерной особенностью шумоизлучения АНПА в мелководной акватории.

Широкополосный шум в условиях кавитации модулируется частотами вращения винтов АНПА,

создавая так называемый вально-лопастной звукояд (ВЛЗР). При этом коэффициент модуляции существенно зависит от скорости вращения винта. Резкий рост коэффициента модуляции начинается со скорости, на которой появляется кавитация на гребном винте [3–6].

К модуляционным процессам в условиях многолучевости распространения акустических сигналов в морской среде следует также отнести интерференционные явления за счет сложения акустических лучей в точке приема.

Модуляционные характеристики шумоизлучения морских объектов, и в частности вально-лопастная модуляция и интерференционная модуляция, требуют оценки и регистрации при контроле уровня и спектрального состава ПГАП АНПА. В работе [7] рекомендуется к основному направлению повышения эффективности регистрации первичного поля малошумных подводных объектов отнести расширение номенклатуры измеряемых характеристик, включая модуляционные характеристики. Необходимость расширения номенклатуры измеряемых характеристик и контролируемых параметров гидроакустических полей морских объектов обусловлена возможностями иностранных средств обнаружения регистрировать модуляционные характеристики шумоизлучения, по которым возможны классификация морских объектов и определение их элементов движения [8].

Поэтому эффективность регистрации ПГАП малошумных подводных объектов в мелководных акваториях будет зависеть не только от повышения помехоустойчивости и точности измерений [7], но и за счет расширения номенклатуры измеряемых характеристик шумоизлучения, включая модуляционные характеристики ПГАП ММО.

1. Акустическое поле, создаваемое точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе

Существует два теоретических подхода к описанию акустического поля в мелком море – волновой подход и лучевой. Оба подхода используют функции, являющиеся решениями волнового уравнения.

В ряде работ анализируется акустическое поле, создаваемое широкополосным сигналом в морском волноводе, которое приводит к частотно-пространственной интерференции в морской среде. Так, в [9–12] показано, что акустическое поле может быть описано на основе волновой теории с использованием модовой структуры акустического поля. Благодаря дисперсии нормальных волн в морском волноводе

формируется устойчивая интерференционная картина в переменных частота–расстояние или частота–время.

Но как показано в [13], при описании акустического поля лучевая теория более удобна, особенно для малых расстояний, где вклад мнимых источников высоких порядков быстро ослабевает из-за потерь при отражении от границ волновода. Это характерно для решения задач регистрации уровня и спектрального состава шумоизлучения морского объекта в мелководной акватории.

Одним из способов описания акустического поля в морском волноводе на основании лучевой теории является способ с использованием мнимых источников [9]. Акустическое поле в этом случае описывается путем сложения прямого и отраженных от границ акустического волновода широкополосных сигналов. При этом возникает виртуальная антенна, состоящая из мнимых источников звука.

Виртуальная антенна с определенным амплитудно-фазовым распределением по её апертуре имеет интерференционную зону (Френеля), размер которой определяется выражением $r = 2L/\lambda^2$, где L – размер виртуальной антенны, определяемый глубиной погружения АНПА (h_u), глубиной моря (H_m) и коэффициентами отражения от границ волновода.

В этом случае расчет акустического поля сводится к расчёту зоны Френеля виртуальной антенны. На рис. 1 для примера представлены демонстративные расчеты распределения звукового давления с расстоянием в зоне Френеля излучателя для различных частот.

Как видно из рис. 1, на расстоянии r_1 наибольший вклад в общее звуковое поле будет вносить спектральная составляющая на частоте f_2 , а на расстоянии r_2 – спектральная составляющая на частоте f_1 и т.д. Поэтому в ближнем поле излучателя с расстоянием будет происходить перераспределение уровня спектральных составляющих, приводящих к формированию частотно-пространственной интерференции от широкополосного излучателя (шумоизлучение АНПА).

Таким образом, частотно-пространственную интерференцию шумоизлучения АНПА можно рассматривать как звуковое поле антенной решетки, состоящей из мнимых источников, с амплитудно-фазовым распределением по апертуре виртуальной антенны, зависящего от коэффициентов отражения от дна и поверхности для каждого луча. Коэффициенты отражения от взволнованной поверхности и неровного дна будут определяться параметром Рэлея $ReI = 2\pi h \cdot \cos\theta/\lambda$, где h – среднее значение высоты неровностей поверхности; λ – длина гидроакустической волны; θ – угол скольжения падающей волны.

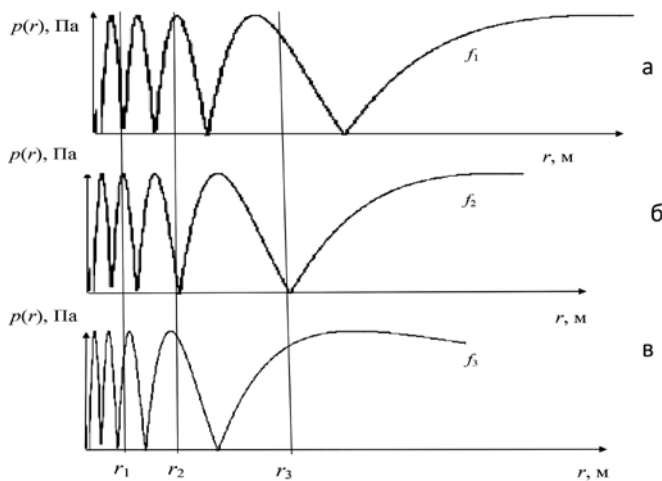


Рис. 1. Распределение звукового давления в зоне Френеля излучателя для различных частот

При этом в акустическом волноводе акустическое поле определяется дискретным набором мод (лучей) [9]. Тогда когерентное звуковое давление, определяющее интерференционные явления в мелководной прибрежной области, будет описываться выражением:

$$p(r) = p_0 \sum_{i=0}^N \frac{K_{\text{отр}_i}(\text{Rel}, \theta, \rho c) \cdot p_i(r) \cdot e^{jk r_i}}{r_i}, \quad (1)$$

где p_0 – звуковое давление, создаваемое источником звука на единичном расстоянии;

$K_{\text{отр}_i}(\text{Rel}, \theta, \rho c)$ – коэффициент отражения от границ морской среды для i -го мнимого источника;

ρc – удельное акустическое сопротивление отражающей среды;

Rel – параметр Рэлея;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число излученного сигнала;

r_i – расстояние от источника звука до точки поля для i -го мнимого источника.

Как видно из выражения (1), формирование интерференционного акустического поля в морской среде зависит от параметра Рэлея, который, в свою очередь, определяется частотой сигнала. Интерференционное поле формирует когерентная составляющая индикатрисы рассеяния отраженного сигнала шумоизлучения. При этом коэффициент отражения когерентной компоненты акустического сигнала, зеркально отраженного от поверхности, можно оценить с использованием выражения:

$$K_{\text{отр}} = |K_0| \cdot e^{-(\text{Rel})},$$

где K_0 – коэффициент отражения от гладкой поверхности моря.

В реальных средах когерентность может нарушаться не только из-за высокого показателя Рэлея, но и из-за воздействия флуктуаций показателя прелом-

ления на амплитуду и фазу интерферирующих волн.

В результате интерференции лучей спектр сигнала в точке приема будет определяться [11] как:

$$p_{\omega}(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta) = \sum_{i=1}^M A_i(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta) s(t) \exp[-i\omega \tau_i(r, h_u, h_{np}, \theta) - \varphi_i],$$

где $A_i(\omega, r, h_u, h_{np}, \theta)$ – амплитуда сигнала по i -му лучу; $s(t)$ – излучаемый сигнал;

τ_i – время распространения по i -му лучу;

φ_i – учитывает изменение фазы волны при отражении от границ.

В спектральном представлении акустический волновод следует рассматривать как пространственный фильтр со своей амплитудно-частотной характеристикой, преобразующий первоначальный спектр шумоизлучения АНПА и приводящий к частотно-пространственной модуляции широкополосного спектра шумоизлучения АНПА.

2. Экспериментальные исследования в мелководной акватории

Экспериментальные исследования в мелководных районах моря показали наличие частотно-пространственной интерференции. Так на рис. 2 представлены спектрограммы шумоизлучения АНПА ММТ-300 и АНПА «Клавесин» в широкой полосе при проходе в районе приемной базы (гидрофона).

На рис. 2, б наблюдается несколько проходов АНПА в районе измерительного гидрофона, что соответствовало схеме маневрирования АНПА.

Экспериментальные исследования в мелководных районах моря также показали наличие вально-лопастной модуляции широкополосного шумоизлучения АНПА, которая проявлялась в виде ВЛЗР. На рис. 3 представлены спектрограмма ВЛЗР шумоизлучения в мелководной акватории и внешний вид АНПА типа ММТ-300.

Как видно из рис. 3, шумоизлучение АНПА имеет дискретные составляющие ВЛЗР, соответствующие скорости вращения винтов АНПА.

На рис. 3 видно, что частота ДС имеет девиацию в зависимости от скорости вращения винтов АНПА. Средняя скорость движения АНПА при проведении эксперимента составляла $v \approx 1$ м/с, при скорости вращения винта $n \approx 1400$ об/мин. При нестационарном режиме движения АНПА происходит расщепление дискретных составляющих ВЛЗР за счет разницы скоростей вращения винтов АНПА.

Экспериментальные исследования показали, что шумоизлучение АНПА имеет модуляционные харак-

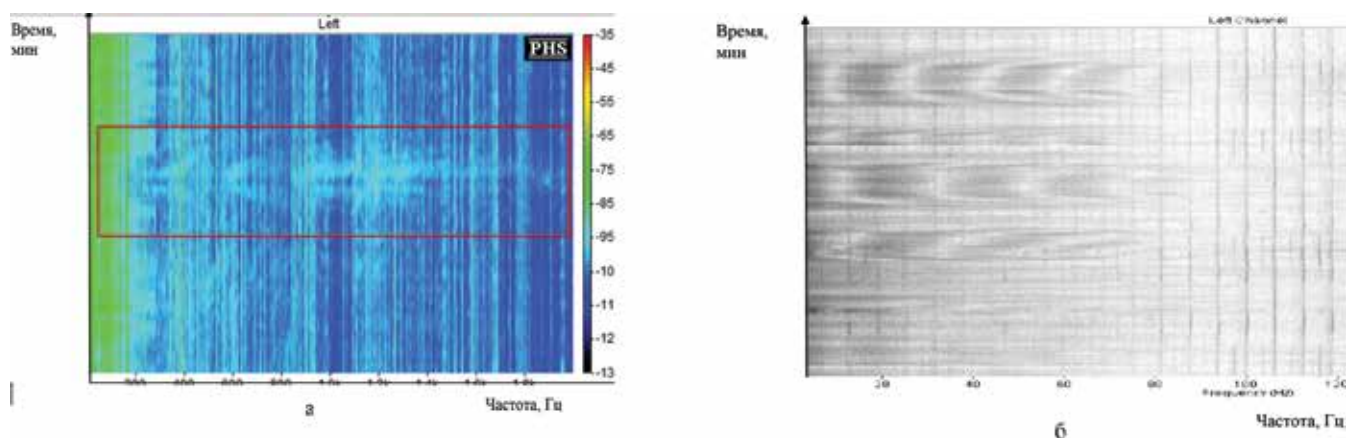


Рис. 2. Спектрограммы шумоизлучения АНПА ММТ-300 (а) и АНПА «Клавесин» (б) при проходе в районе приемного гидрофона

теристики. Кроме вально-лопастной модуляции, при проходе морской цели, имеющей широкий спектр шумоизлучения в мелководной акватории, наблюдается частотно-пространственная интерференция. В спектре сигнала присутствуют интерференционные максимумы и минимумы. Поэтому спектр шумоизлучения АНПА имеет вид модулированного сигнала с определенным частотным интервалом модуляции.

Известно, что при измерении характеристик шумоизлучения морского объекта контрольным является участок траектории движения с минимальным «траверсным» расстоянием между измерительным гидрофоном и морским объектом [14]. Как показывают экспериментальные и модельные эксперименты, оценка времени прохода ММО на траверсном расстоянии возможна путем анализа интерференционной картины шумоизлучения ММО.

3. Моделирование частотно-пространственной интерференции широкополосного сигнала на одиночном гидрофоне

Для оценки особенностей формирования акустического поля, создаваемого точечным источником широкополосного сигнала в морском волноводе, было произведено моделирование в среде Matlab подсистемы Simulink с использованием генератора широкополосного сигнала при приеме его на одиночный гидрофон. Схемы моделирования траектории движения источника широкополосного сигнала в горизонтальной и вертикальных плоскостях показаны на рис. 4.

Исходными данными для расчетов являлись: глубина погружения источника шумоизлучения широкополосного сигнала h_u ; глубина приемного гидрофона $h_{пр}$; траверзное расстояние прохода источника звука от приемного гидрофона $r_{тр}$; расстояние начала моделирования $r_{нач}$; частотный диапазон шумоизлучения источника звука.

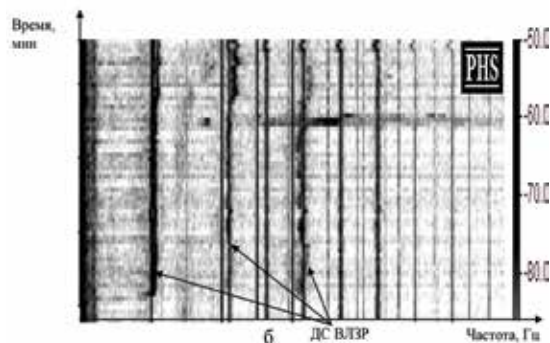
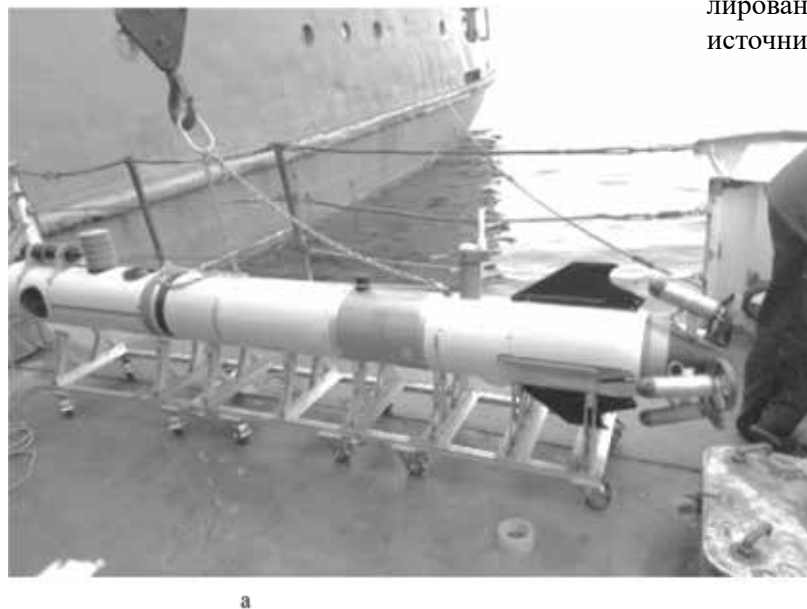


Рис. 3. Внешний вид АНПА ММТ-300 (а) и спектрограмма амплитудной огибающей шумоизлучения АНПА (б)

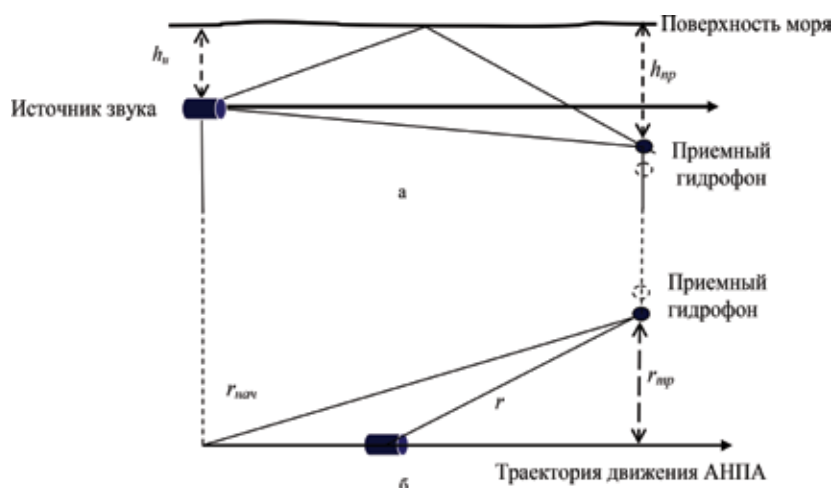


Рис. 4. Схемы моделирования траектории движения АНПА в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Результаты моделирования частотно-пространственной интерференции в координатах частота-расстояние показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при движении источника звука относительно приемника наблюдаются интерференционные явления. Максимумы наблюдаются на частотах, для которых разность хода лучей $\varphi = 2\pi r / \lambda$ равна целому числу длин волн λ . При этом происходит синфазное сложение сигналов, что приводит к увеличению уровня сигнала. На частотах, для которых разность хода равна нечетному числу полуволн $n\lambda/2$, ($n = 1, 3, 5, \dots$) (сложение в противофазе), происходит взаимное подавление сигналов, и наблюдаются интерференционные минимумы. При этом при изменении расстояния r между источником звука и приемным гидрофоном интервал интерференции Δf изменяется и становится минимальным при минимальном траверсном расстоянии, как это видно на рис. 5. Величина частотного интервала Δf интерференционных полос изменяется при изменении глубины источника h_u , глубины приемника h_{np} и траверсного расстояния r_{mp} при проходе морского объекта.

Расчеты показывают, что при проходе на малом траверсном расстоянии, из-за малого значения интервал интерференции Δf , частотно-пространственная

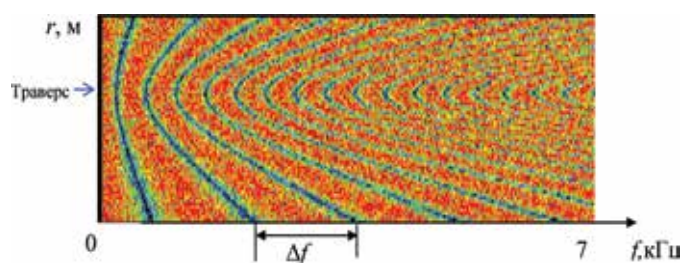


Рис. 5. Частотно-пространственная интерференционная картина на одиночном гидрофоне ($h_u = 10$ м; $h_{np} = 10$ м; $r_{mp} = 50$ м)

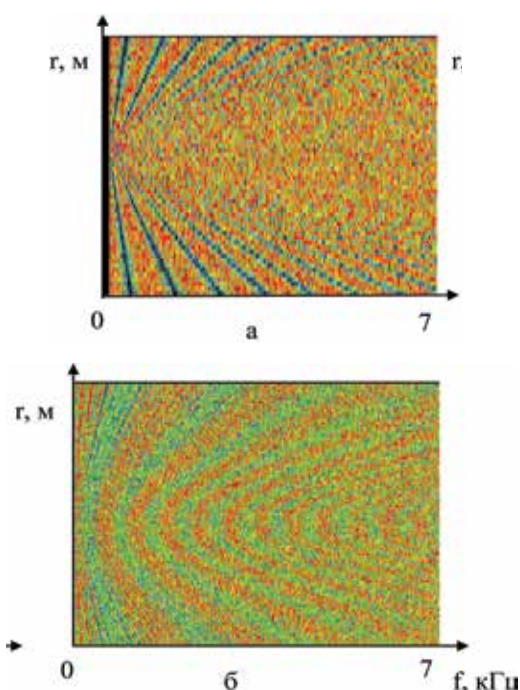


Рис. 6. Частотно-пространственная интерференционная картина при приеме на: а – одиночный гидрофон $h_u = 10$ м; $h_{np} = 10$ м; $r_{mp} = 5$ м; б – два гидрофона $h_u = 10$ м; $h_{np} = 10$ м и 11 м; $r_{mp} = 5$ м

интерференционная картина в мелководной акватории (малые глубины источника и приемника) становится размытой, как это показано на рис. 6, а.

Для формирования частотно-пространственной интерференции возможно использование двух гидрофонов, сигналы с выходов которых суммируются. Частотно-пространственная интерференционная картина при использовании двух гидрофонов $h_u = 10$ м; $h_{np} = 10$ и 11 м при траверсном расстоянии $r_{mp} = 5$ м показана на рис. 6, б.

Как видно из рис. 6, б при использовании двух гидрофонов возможно формирование интерференционной картины и фиксации минимального расстояния между измерительным гидрофоном и АНПА.

При регистрации частотно-пространственной интерференционной картины в морских условиях следует учитывать, что лучевая теория для мелкого моря применима при частотах выше 50 Гц [15], поэтому в реальных морских условиях интерференционная картина на низких частотах может не регистрироваться.

4. Гомоморфная фильтрация на основе кепстральной обработки сигнала шумоизлучения АНПА

Измерение модуляционных характеристик широкополосного спектра возможно путем гомоморфной фильтрации на основе кепстральной обра-

ботки широкополосного сигнала. Как показано в [16], гомоморфные фильтры находят применение в тех приложениях, где входной сигнал формируется в виде произведения двух различных сигналов: $S(t) = s_1(t)s_2(t)$.

С помощью гомоморфных фильтров мы можем обрабатывать компоненты $s_1(t)$ и $s_2(t)$ отдельно, т.е. можно, например, работать с модуляционными составляющими сигнала, выделяя их с использованием линейного фильтра. Для этих целей используется логарифмирование модулированного сигнала $\ln S(t) = \ln s_1(t) + \ln s_2(t)$. В итоге, после логарифмирования мы получаем вместо произведения компонентов их сумму и можем использовать линейную фильтрацию для обработки сигнала.

Частным случаем гомоморфного преобразования является кепстральный анализ. Принцип кепстральной обработки при анализе гидроакустического сигнала, основан на выделении модуляционных составляющих. При регистрации шумоизлучения АНПА к модуляционным составляющим можно отнести вально-лопастную модуляцию в виде ВЛЗР и интерференционную модуляцию широкополосного спектра шумоизлучения АНПА.

Общий вид амплитудно-модулированного сигнала $S(t)$, где в качестве несущего колебания является шум $s_1(t)$, а в качестве модулирующего сигнала может выступать смесь гармонических составляющих, на частотах ω_i может быть описан выражением:

$$S(t) = A_0(1 + ms_2(t))s_1(t),$$

где $s_1(t)$ – несущее колебание (шум);

$s_2(t)$ – модулирующий сигнал;

A_0 – амплитуда несущего колебания (постоянная составляющая);

m – индекс модуляции.

В общем виде спектр $S(\omega)$ анализируемого амплитудно-модулированного полезного сигнала можно вычислить, используя выражение:

$$S(\omega) = \int_0^{+\infty} S(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{+\infty} (A_0 + A_0 m s_2(t)) s_1(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Введем обозначения:

$$s_1(\omega) = \int_0^{+\infty} s_1(t) e^{-i\omega t} dt \text{ – спектр несущего колебания;}$$

$$s_2(\omega) = \int_0^{+\infty} (A_0 + A_0 m s_2(t)) e^{-i\omega t} dt \text{ – спектр модулирующего сигнала.}$$

Применяя операцию логарифмирования к спектральному представлению амплитудно-модулированного полезного сигнала $S(\omega)$:

$$S(\omega) = s_1(\omega) \cdot s_2(\omega),$$

получим:

$$\ln S(\omega) = \ln s_1(\omega) + \ln s_2(\omega).$$

Тогда кепстр можно представить как:

$$C(\tau) = \int_0^{\infty} \ln s_1(\omega) \cos \omega \tau d\omega + \int_0^{\infty} \ln s_2(\omega) \cos \omega \tau d\omega.$$

Следовательно, с помощью проведения низкочастотной фильтрации возможно выделение модулирующего сигнала в виде периодических составляющих $\ln s_2(\omega)$ путем исключения несущего колебания $\ln s_1(\omega)$.

В результате операций, предусмотренных кепстральной обработкой и преобразованиями Фурье, возможно выделить ДС амплитудно-модулированного сигнала, экспериментально подтвержденные в [18] путем выделения ВЛЗР шумоизлучения ММО.

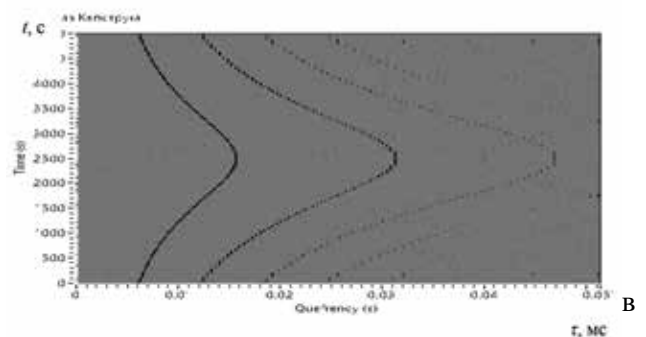
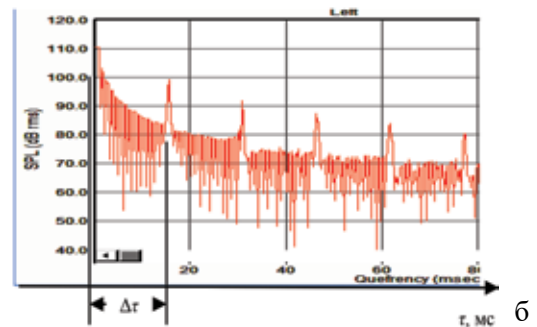
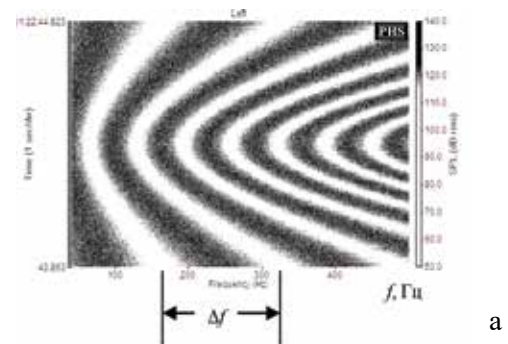


Рис. 7. Интерференционная картина широкополосного сигнала (а); его кепстр (б) и кепстрограмма (в)

С целью возможности выделения ДС, определяющих интервал интерференции широкополосного сигнала, была произведена кепстральная обработка с использованием программы Spectlab. На рис. 7, а показаны смоделированный в системе Labweiv интерференционный сигнал и его кепстральная обработка с использованием программы Spectlab.

При этом на сочастоте (quefrency) $\Delta\tau$ измеряется в миллисекундах (рис. 7, б, в). Поэтому интервал интерференции определяться как $\Delta f = 1/\Delta\tau$, Гц. К примеру на рис. 7, б кепстр приведен для интервала $\Delta f = 63,89$ Гц, что соответствует сочастоте 0,015 мс, вторая гармоника на сочастоте 0,03 мс и т.д.

Поэтому при сближении морского объекта с гидрофоном сочастота увеличивается (рис. 7, в), а интервал интерференции уменьшается (рис. 7, а).

Как видно из рис. 7, при кепстральной обработке выделяются дискретные составляющие, которые при топографической регистрации позволят осуществить трассовую обработку кепстральных ДС, которая имеет повышенную помехоустойчивость по сравнению с анализом мгновенных кепстров.

Заключение

Малозумные морские объекты, включая АНПА, выполняют поставленные задачи в мелководных акваториях. АНПА имеют высокооборотные движители, что может привести к возникновению кавитации на винтах и, как следствие, к повышенному уровню ПГАП в широкой полосе частот. Широкополосное шумоизлучение имеет модуляционные характеристики в спектральной области в виде частотно-пространственной интерференции и во временной области в виде вально-лопастной модуляции, что является демаскирующими признаками морского объекта.

Методика регистрации ПГАП должна предполагать регистрацию демаскирующих характеристик АНПА, включая частотно-пространственную интерференционную спектрограмму и дискретные составляющие ВЛЗР шумоизлучения АНПА. Гомоморфная фильтрация на основе кепстральной обработки сигнала шумоизлучения АНПА позволяет выделить модуляционные характеристики ПГАП в виде дискретных составляющих шумоизлучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганков С.Г., Теверовский Г.И. Шумность – задача стратегическая // Национальная оборона. 2013. № 9.
2. Шлемов Ю.Ф. Современные методы и технологии акустических испытаний кораблей для измерения характеристик их подводного шума // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5.
3. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4(30). С. 58–63.
4. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Ткаченко С.А. Спектральные характеристики шумового поля малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата в дальней зоне // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4(42). С. 84–88.
5. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шума морских судов // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 2. С. 224–228.
6. Машошин А.И. Оптимизация устройства обнаружения и измерения параметров амплитудной модуляции подводного шумоизлучения морских судов // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 3. С. 347–353.
7. Цыганков С.Г., Теверовский Г.И. Метрологическое обеспечение гидроакустических измерений // Национальная оборона. 2013. № 9.
8. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor / G. Slamnoi, O. Radu, V. Rosca [et al.]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/aav/2011/952798/#introduction> (дата обращения: 16.01.2023).
9. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана / перевод Ю.П. Лысанова под ред. Л.М. Бреховских. М.: Мир, 1969. 302 с.
10. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана: современное состояние / под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой. М.: Наука, 1982. С. 71–82.
11. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 196 с.
12. Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Голографические методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акустический журнал. 2025. Т. 71, № 1. С. 96–117.
13. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / пер с англ. под ред. Е.Л. Шендорова. М.: Мир, 1973.
14. Новиков А.К. Статистические измерения и обнаружение сигналов. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006.
15. Лободин И.Е., Машошин А.И. Определение границы по частоте применимости лучевой акустики // Морская радиоэлектроника. 2022. № 1 (79). С. 36–37.
16. Сорокин С.В., Щербаков М.А. Сравнительный анализ методов нелинейной фильтрации сигналов и изображений // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. в 2-х т. Пенза: Инф.-издат. центр Пенз. гос. ун-та, 2006. С. 89–91.
17. Викторов Р.В., Колмогоров В.С., Пономарев М.О., Решетников Д.С. Экспериментальные исследования возможности выделения вально-лопастного звукояда движущегося морского объекта // Гидроакустика. 2017. № 29 (1). С. 63–69.

Сведения об авторах

ШПАК Степан Анатольевич, к.т.н., доцент, начальник кафедры Гидроакустики ТОВВМУ

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации

Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7

Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов

Тел.: +7(914)7-023-976

E-mail: shpak_sa@inbox.ru

БОЙКО Константин Петрович, преподаватель кафедры Гидроакустики ТОВВМУ

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации

Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7

Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов

Тел.: +7(902)5-252-695

E-mail: kot_a1a2a3@mail.ru

КОЛМОГОРОВ Владимир Степанович, д.т.н., профессор, профессор кафедры Гидроакустики ТОВВМУ

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова» Министерства обороны Российской Федерации

Адрес: 690062, Владивосток, Камский переулок 7

Научные интересы: гидроакустические измерения, цифровая обработка гидроакустических сигналов

Тел.: +7(914)6-926-567

E-mail: vkolmogorov2015@yandex.ru



Для цитирования:

Шпак С.А., Бойко К.П., Колмогоров В.С. РЕГИСТРАЦИЯ МОДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 33–42. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_04. EDN: ZSOFXZ.



REGISTRATION OF MODULATION CHARACTERISTICS OF SEA OBJECTS' NOISE EMISSION

S.A. Shpak, K.P. Boyko, V.S. Kolmogorov

One of the most important properties of underwater marine objects is their stealthiness. The underwater noise of a marine object is its deceptive factor. By analyzing the characteristics of the noise of a marine object, it is possible to determine the class of the marine object and its movement patterns. To improve the efficiency of detecting the primary field of low-noise underwater objects, it is necessary to expand the range of measured characteristics, including spectral and modulation characteristics. This article focuses on the modulation characteristics of the primary hydroacoustic field of a marine object, which were experimentally obtained in a shallow sea. Modeling of the acoustic field created by a point source of a broadband signal in a marine waveguide confirmed the formation of frequency-space modulation of a broadband signal in a shallow water area due to the interference of the direct and reflected signals from the sea surface. The modeling showed that in order to register the frequency-space modulation of a broadband signal in a shallow water area at small traverse distances of a marine object, it is necessary to use receivers distributed in the vertical plane. It has been shown that it is possible to register the modulation characteristics of the noise emission of marine objects in the form of discrete components of the demodulated signal spectrum using homomorphic filtering based on the signal's cepstral processing.

Keywords: primary hydroacoustic field, frequency-space interference, modulation characteristics, cepstral signal processing, and homomorphic filtering.

References

1. Tsygankov S.G., Teverovsky G.I. Noisiness – a strategic task // National Defense. 2013. No. 9.
2. Shlemov Yu.F. Modern methods and technologies of acoustic testing of ships for measuring the characteristics of their underwater noise // Scientific Notes of the Faculty of Physics of Moscow University. 2017. No. 5.
3. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V. Characteristics of the Own Noise Emission of a Small-Sized ANPA // Underwater Research and Robotics. 2019. No. 4(30). P. 58–63.
4. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A., Tkachenko S.A. Spectral Characteristics of the Noise Field of a Small-Sized Autonomous Unmanned Underwater Vehicle in the Far Zone // Underwater Research and Robotics. 2022. No. 4(42). P. 84–88.
5. Kudryavtsev A.A., Luginets K.P., Mashoshin A.I. On the amplitude modulation of the underwater noise of marine vessels // Acoustical Journal. 2003. Vol. 49, No. 2. P. 224–228.
6. Mashoshin A.I. Optimization of the device for detecting and measuring the parameters of the amplitude modulation of the underwater noise of marine vessels.
7. Tsygankov S.G., Teverovskiy G.I. Metrological support of sonar measurements // National Defense. 2013. No.9.
8. DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor / G. Slamnoi, O. Radu, V. Rosca [et al.]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/aav/2011/952798/#introduction>.
9. Tolstoy I., Clay K.S. Acoustics of the ocean, translated by Y.P. Lysanov, edited by L.M. Brekhovskikh. Moscow: Mir, 1969. 302 p.
10. Chuprov S.D. Interference structure of the sound field in a layered ocean // Ocean acoustics: current state / edited by L.M. Brekhovskikh, I.B. Andreeva. M. Nauka Publ., 1982. P. 71–82.
11. Orlov E.F., Sharonov G.A. Interference of Sound Waves in the Ocean. Vladivostok: Dalnauka, 1998. 196 p.
12. Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Holographic Methods of Processing Hydroacoustic Signals (Review) // Acoustical Journal. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 96–117.
13. Urick R.J. Fundamentals of Hydroacoustics. per. from English. under the editorship of E.L. Shendorov. M.: Mir, 1973.
14. Novikov A.K. Statistical Measurements and Signal Detection. St. Petersburg: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2006.
15. Kolmogorov V.S., Shpak S.A., Priyma A.V. Use of a vertical hydrophone array in an adaptive interference compensator in multipath conditions // Proceedings of the 16th All-Russian Conference "Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics". St. Petersburg: Lema Publishing House, 2023. P. 313–316.
16. Lobodin I.E., Mashoshin A.I. Determination of the frequency limit for the applicability of beam acoustics // Marine Radioelectronics. 2022. No. 1 (79). P. 36–37.
17. Sorokin S.V., Shcherbakov M.A. Comparative analysis of methods of nonlinear filtering of signals and images / Reliability and quality: tr. Int. simp. in 2 vol. Penza: Inf.-izdat. center of Penza state univ., 2006. P. 89–91.
18. Viktorov R.V., Kolmogorov V.S., Ponomarev M.O., Reshetnikov D.S. Experimental studies of the possibility of extracting the shaft-blade sound series of a moving marine object // Hydroacoustics. 2017. No. 29 (1). P. 63–69.



Information about the authors

SHPAK Stepan Anatolyevich, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School

Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7

Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals

Phone: +7(914)7-023-976. **E-mail:** shpak_sa@inbox.ru

BOYKO Konstantin Petrovich, Lecturer of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School

Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7

Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals

Phone: +7(902)5-252-695. **E-mail:** kot_a1a2a3@mail.ru

KOLMOGOROV Vladimir Stepanovich, Dr. of Engineering, Professor, Professor of the Department of Hydroacoustics of the Pacific Higher Naval School

Federal State State-Owned Military Educational Institution of Higher Education "Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov" of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Address: 690062, Russia, Vladivostok, Kamsky lane 7

Research interests: hydroacoustic measurements, digital processing of sonar signals

Phone: +7(914)6-926-567. **E-mail:** vkolmogorov2015@yandex.ru