

УДК 621.391, 621.384.3

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА СПЕКТРАЛЬНУЮ И ВРЕМЕННУЮ СТРУКТУРЫ ПРИНЯТОГО ЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

С.Р. ГЕЙСТЕР, ЧАН ТАЙ ЧОНГ

*Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь
Калиновского 4, Минск 220103, Беларусь*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 28 февраля 2013

Рассматриваются обобщенная структура гидроакустического тракта, частотная зависимость коэффициента затухания акустической волны при распространении в воде и его влияние на временную и спектральную структуры отраженного сигнала. Приводятся результаты исследований основных закономерностей в изменениях временной и спектральной структур акустического сигнала при распространении в водной среде.

Ключевые слова: гидроакустический тракт, акустическая волна, затухание, структура принятого сигнала.

Введение

Водная среда с ее разнообразными неоднородностями (плавным и скачкообразным изменениями параметров) представляет собой сложную среду для распространения акустических волн [1]. При распространении в такой среде акустические волны претерпевают изменения, которые напрямую проявляются в принятом сигнале, формируемом на выходе приемного акустоэлектрического преобразователя. Такие изменения необходимо учитывать в ходе решения задач гидролокации. Основным фактором, влияющим на временную и спектральную структуры принятого сигнала, является затухание акустической волны при распространении в водной среде. Затухание влияет как на дальность действия гидролокатора (ГЛ), так и на качество формирования изображения дна. Поэтому существует необходимость в разработке методики учета влияния этого затухания на параметры отраженного сигнала.

Обобщенная структура гидроакустического тракта формирования, распространения, приема преобразования гидроакустических волн в сигнал

Обобщенная структура гидроакустического тракта приведена на рис. 1, где использованы следующие обозначения: ПУ – передающее устройство; ЗС – зондирующий сигнал; ЭАП – электроакустический преобразователь; СР – среда распространения; ЭО – элемент отражения; АЭП – акустоэлектрический преобразователь; ОС – отраженный сигнал; УО – устройство обработки; ПрС – принимаемый сигнал.

ЗС формируется в ПУ и представляет собой электрический сигнал, который подается на ЭАП, где преобразуется в акустическую волну продольного типа и излучается в водное пространство. Заметим, что электроакустический преобразователь вместе с согласующим устройством является или законченной одноэлементной передающей антенной, или элементом передающей антенной решетки. Акустическое согласующее устройство обеспечивает

согласование преобразователя с пространством, а также направленные свойства антенны (элемента антенны).

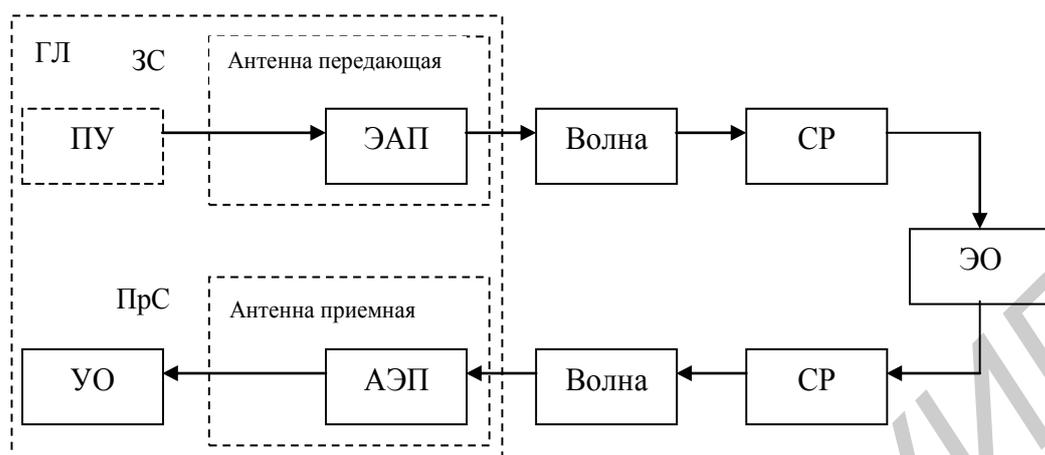


Рис. 1. Обобщенная структура гидроакустического тракта

В гидролокации параметры водной среды оказывают непосредственное влияние на характеристики распространения акустических волн. Соответственно, основное влияние на временную и спектральную структуры отраженного сигнала оказывают [2]:

- сферическое расширение фронта акустической волны;
- границы водной среды (водная поверхность и дно), интерференционное влияние которых определяет интенсивность поля в различных направлениях;
- неоднородности морской воды, включающие регулярные неоднородности (изменения температуры, солености, плотности) и нерегулярные (планктон, газовые пузырьки, муть, течения, случайные местные возмущения и пр.).

Элементами отражения, которые формируют полезные отраженные волны, являются фрагменты поверхности дна и неподвижных объектов на нем. Если учитывать только влияние расширения фронта акустической волны, то мощность сигнала, отраженного от элемента поверхности дна на расстоянии r_s от ГЛ, на выходе приемной антенны ГЛ (выходе АЭП) можно описать выражением:

$$\sigma_c^2 = \frac{P_0 G_{Tr} K_{P-Tr} G_{Rc} K_{P-Rc} \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 r_{zs}^2 r_{ot}^2}, \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность ЗС на входе ЭАП передающей антенны, [Вт]; G_{Tr} , G_{Rc} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн (безразмерные величины); K_{P-Tr} – коэффициент преобразования мощности электрического сигнала в мощность акустического поля (с учетом двух ступеней преобразования энергии «электрическая – механическая – акустическая»); K_{P-Rc} – коэффициент преобразования мощности акустического поля в мощность электрического сигнала; λ – длина волны ЗС, [м]; σ_t – эффективная отражающая поверхность анализируемого элемента (фрагмента поверхности дна, предмета на поверхности дна), [м²]; r_{zs} – расстояние, которое проходит ЗС от передающей антенны ГЛ (фазового центра) до анализируемого элемента, [м]; r_{ot} – расстояние, которое проходит ОС от анализируемого элемента до приемной антенны движущегося ГЛ, [м].

Использование безразмерных коэффициентов K_{P-Tr} и K_{P-Rc} , которые, фактически, являются коэффициентами полезного действия преобразователей в соответствующих преобразованиях, обусловлено целесообразностью упрощения учета процессов преобразований при передаче и приеме в данных исследованиях.

Эффективная отражающая поверхность σ_t определяется выражением

$$\sigma_i = S_i \sigma_{ud}, \quad (2)$$

где S_i – площадь анализируемого элемента (элемента разрешения на поверхности), которая для поверхности дна зависит от разрешающих способностей ГЛ по азимуту и радиальной дальности, наклона поверхности относительно ГЛ по углу места, $[m^2]$; σ_{ud} – удельная эффективная отражающая поверхность, зависящая от типа поверхности и ее наклона относительно ГЛ, $[m^2/m^2]$.

С учетом квадратурного представления, амплитуду сигнала, отраженного элементом поверхности дна, на выходе приемной антенны ГЛ в соответствии с (1) можно определить как $A_c = \sqrt{2\sigma_c^2} = \sqrt{2} \sigma_c$.

Влияние среды на тракт распространения акустической волны

Отраженные сигналы, сформированные на выходе АЭП ГЛ, характеризуются задержкой во времени, ослаблением и искажением, которые возникают при распространении акустических волн в морской среде. Изменяющиеся по мере изменения глубины температура, соленость и гидростатическое давление влияют на скорость распространения акустических волн и, соответственно, на время запаздывания отраженного сигнала, а также на направление распространения волн. В то же время на энергетические, временные и спектральные характеристики отраженного сигнала влияют следующие факторы:

- фактор 1 – расхождение акустической волны от источника. Для сферичной модели распространения волны продольного типа в свободном пространстве при излучении и отражении мощность отраженного сигнала описывается выражением (1);
- фактор 2 – потери из-за вязкости и теплопроводности морской воды;
- фактор 3 – рассеяние на объемных неоднородностях поля температуры, на твердых частицах, планктоне, а также резонансные поглощения на неоднородностях, размеры которых сопоставимы с длиной волны (рыбы, воздушные пузырьки) [3].

Действие фактора 3 носит случайный характер, поэтому его целесообразно учитывать отдельно в конкретных случаях. Механизмы действия факторов 1 и 2 подробно описаны в литературе, однако отсутствуют исследования их влияния на параметры спектральной и временной структур отраженного сигнала, определяющие, как минимум, разрешающую способность ГЛ по дальности. Поэтому далее внимание уделим именно этим факторам.

Модели временной и спектральной структуры отраженного сигнала, учитывающие параметры ГЛ, сферичность фронта волны и частотно-зависимое затухание в воде

Анализ временной и спектральной структур отраженного сигнала проведем для трассы распространения, соединяющей точку излучения, элемент поверхности дна и точку приема. Применительно к такому анализу трассу распространения акустической волны можно описать [4] амплитудно-фазо-частотной характеристикой (АФЧХ):

$$G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) = |G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi)| \exp\left(-i \frac{\omega r_{\Sigma}}{c_v(\Psi)}\right), \quad (3)$$

где Ψ – вектор параметров водной среды (температура, соленость, давление и пр.); $c_v(\Psi)$ – скорость звука, зависящая от параметров среды, $[m/c]$; $r_{\Sigma} = (r_{zs} + r_{ot})$ – сумма расстояний.

Амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) трассы можно представить произведением:

$$|G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi)| = K_p(r_{\Sigma}) D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi) D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi), \quad (4)$$

в котором множитель $K_p(r_{\Sigma})$ учитывает уменьшение амплитуды сигнала из-за расширения сферичного фронта волны при распространении, а представленный некомплексной величиной

множитель $D_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) = D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi)D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi)$ учитывает затухание на разных частотах вследствие вязкости среды, ее теплопроводности и прочих факторов, описанных выше.

Перенесем учет сферичности фронта волны в вычисление мощности (амплитуды) отраженного сигнала с использованием (1). Тогда выражение (4) преобразуется к виду:

$$|G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi)| = D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi)D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi). \quad (5)$$

С учетом введенных представлений амплитудно-фазо-частотный спектр (АФЧС) отраженного сигнала $G_s(\omega, r_{\Sigma}, \Psi)$ на выходе АЭП можно описать выражением:

$$G_s(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) = A_c(r_{\Sigma})G_0(\omega - \omega_0)G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi), \quad (6)$$

где $G_0(\omega)$ – АФЧС закона модуляции зондирующего сигнала; $A_c(r_{\Sigma})$ – амплитуда отраженного сигнала на выходе АЭП, учитывающая в соответствии с (1) затухание волны из-за сферичности фронта при зондировании и отражении.

Временная структура отраженного сигнала на выходе АЭП $u_s(t, r, \Psi)$ определяется обратным преобразованием Фурье от его АФЧС:

$$\begin{aligned} u_s(t, r, \Psi) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_s(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) \exp(i\omega t) d\omega = \\ &= A_c(r_{\Sigma}) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega - \omega_0) G_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) \exp(i\omega t) d\omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) с учетом (3) и (5) можно представить в развернутом виде:

$$\begin{aligned} u_s(t, r_{\Sigma}, \Psi) &= \frac{A_c(r_{\Sigma})}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega - \omega_0) D_{SR}(\omega, r_{zs}, \Psi) \exp\left(-i \frac{\omega r_{zs}}{c_v(\Psi)}\right) \times \\ &\times D_{SR}(\omega, r_{ot}, \Psi) \exp\left(-i \frac{\omega r_{ot}}{c_v(\Psi)}\right) \exp(i\omega t) d\omega, \end{aligned} \quad (8)$$

а также более компактно:

$$u_s(t, r_{\Sigma}, \Psi) = \frac{A_c(r_{\Sigma})}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega - \omega_0) D_{SR}(\omega, r_{\Sigma}, \Psi) \exp\left(-i \frac{\omega r_{\Sigma}}{c_v(\Psi)}\right) \exp(i\omega t) d\omega. \quad (9)$$

Заметим, что время запаздывания отраженного сигнала определяется фазовым множителем $\exp\left(-i \frac{\omega r_{\Sigma}}{c_v(\Psi)}\right)$, который с учетом $t_{r_{\Sigma}}(\Psi) = \frac{r_{\Sigma}}{c_v(\Psi)}$ можно представить и в другом виде:

$$\exp\left(-i \frac{\omega r_{\Sigma}}{c_v(\Psi)}\right) = \exp(-i\omega t_{r_{\Sigma}}(\Psi)). \quad (10)$$

Модель затухания в среде распространения из-за вязкости и теплопроводности

Затухание гармонических акустических волн происходит по экспоненциальному закону [5]. Для плоской монохроматической волны на частоте ω при распространении ее в среде давление на дистанции длиной r уменьшается по закону

$$p(r, \omega, \Psi) = p_0 \exp(-\delta_r(\omega, \Psi)r), \quad (11)$$

где $\delta_r(\omega, \psi)$ – пространственный коэффициент затухания волны на частоте ω , показывающий удельное (погонное) затухание по давлению (амплитуде) для фиксированных параметров среды ψ , [м⁻¹]; p_0 – давления в исходной точке, для которой $r = 0$.

Суммарный коэффициент поглощения, учитывающий вязкость (сдвиговую и объемную) и теплопроводность среды, на частоте ω описывается [5] выражением:

$$\delta_r(\psi) = \frac{\omega^2}{2\rho(\psi)(c_v(\psi))^3} \left[\frac{4}{3} \eta(\psi) + \zeta(\psi) + \chi(\psi) \left(\frac{1}{C_V(\psi)} - \frac{1}{C_P(\psi)} \right) \right], \quad (12)$$

где $\rho(\psi)$ – плотность морской воды, являющаяся функцией температуры и давления [кг/м³];

$c_v(\psi)$ – скорость звука в воде, которая определяется [6] как $c_v(\psi) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho(\psi)}}$; μ – объемный модуль упругости, [Па]; $\eta(\psi)$, $\zeta(\psi)$ – сдвиговая и объемная вязкости воды соответственно, [Па×с]; $\chi(\psi)$ – коэффициент теплопроводности, [Вт/(м×°К)]; $C_V(\psi)$, $C_P(\psi)$ – теплоемкость при постоянном объеме и постоянном давлении, [Дж/(кг×°К)].

В соответствии с выражением (11), описывающим затухание для гармонических акустических волн, компоненты $D_{SR}(\omega, r_{zs}, \psi)$ и $D_{SR}(\omega, r_{ot}, \psi)$ в выражении (5) можно представить в виде:

$$D_{SR}(\omega, r_{zs}, \psi) = \exp[-\delta_r(\omega, \psi)r_{zs}]; \quad D_{SR}(\omega, r_{ot}, \psi) = \exp[-\delta_r(\omega, \psi)r_{ot}] \quad (13)$$

Поглощение акустических волн при распространении в воде можно описать не только классически (см. выражения (11) и (12)), но и эмпирически. В 1962 году Маршем и Шулкиным было предложено [3, 6, 7] эмпирическое выражение для модуля коэффициента затухания плоской монохроматической волны:

$$\beta(f, \psi) = \left[\frac{A_I S f_T(T^0) f^2}{(f_T(T^0))^2 + f^2} + \frac{B_{VP} f^2}{f_T(T^0)} \right] (1 - 6,54 \times 10^{-3} P) 8,686, \quad [\text{дБ/м}], \quad (14)$$

где S – соленость, [‰] (промилле); f – линейная частота, [кГц]; $A_I = 2,34 \times 10^{-6}$ – постоянная ионной релаксации; $B_{VP} = 3,38 \times 10^{-6}$ – постоянная вязкости пресной воды; P – гидростатическое давление, [МПа]; T^0 – температура среды, [°С]; $f_T(T^0)$ – частота релаксации, зависящая от температуры и определяемая как $f_T(T^0) = 21,9 \times 10^{\left(6 - \frac{1520}{T^0 + 273}\right)}$, [кГц].

В соответствии с эмпирической формулой (14), описывающей модуль коэффициента затухания, компоненты $D_{SR}(\omega, r_{zs}, \psi)$ и $D_{SR}(\omega, r_{ot}, \psi)$ можно представить в виде:

$$D_{SR}(\omega, r_{zs}, \psi) = 10^{-\frac{\beta(f, \psi) r_{zs}}{20}}; \quad D_{SR}(\omega, r_{ot}, \psi) = 10^{-\frac{\beta(f, \psi) r_{ot}}{20}}. \quad (15)$$

Проиллюстрируем влияние среды распространения на спектральную и временную структуры принятого сигнала примерами расчетов при условиях:

а) параметры гидролокатора: мощность ЗС $P_0 = 1$ Вт, длительность импульса ЗС $T_0 = 0,02$ с, несущая частота ЗС $f_0 = 75$ кГц, закон модуляции ЗС – линейная частотная модуляция с девиацией $\Delta f_M = 7,5$ кГц; коэффициенты усиления передающей и приемной антенн $G_{Tr} = G_{Rc} = 50$; коэффициенты преобразования $K_{P-Tr} = 0,5$ и $K_{P-Rc} = 0,5$;

б) параметры объекта отражения: объект отражения – точечный и находится на глубине $z = 1500$ м. Соответственно, расстояние $r_{zs} = r_{ot} = 1500$ м; эффективная отражающая поверхность объекта $\sigma_t = 0,1$ м²;

в) параметры трассы распространения: зондирование ведется вертикально вниз; модель затухания описывается эмпирическим выражением (14); параметры морской среды по мере увеличения глубины изменяются. Вариант этих параметров сформирован на основе модели мирового океана [8, с. 149] и представлен в таблице.

На рис. 2 и 3 представлены полученные путем расчета временные и спектральные структуры сигнала, отраженного от объекта на глубине $z=1500\text{м}$, без учета затухания акустических волн в морской воде из-за вязкости и теплопроводности (рис. 2) и с учетом затухания (рис. 3). Важно отметить, что параметры среды по мере движения акустической волны вниз (в глубину) и обратно изменялись. При расчетах это учитывалось в модели затухания, которая описывалась выражениями (14) и (15), путем использования кусочно-ступенчатых аппроксимаций параметров $T^0(z)$, $S(z)$, $P(z)$, $c_v(\psi, z)$ в соответствии с глубиной z .

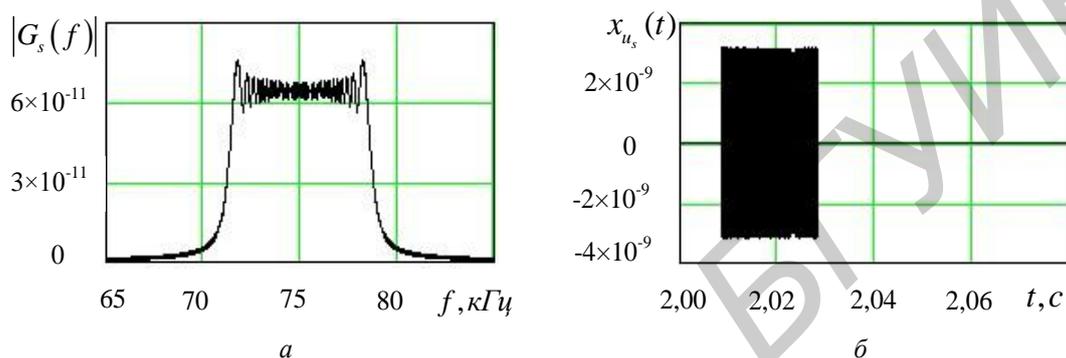


Рис. 2. Сигнал без учета затухания: *a* – спектральная структура; *б* – временная структура

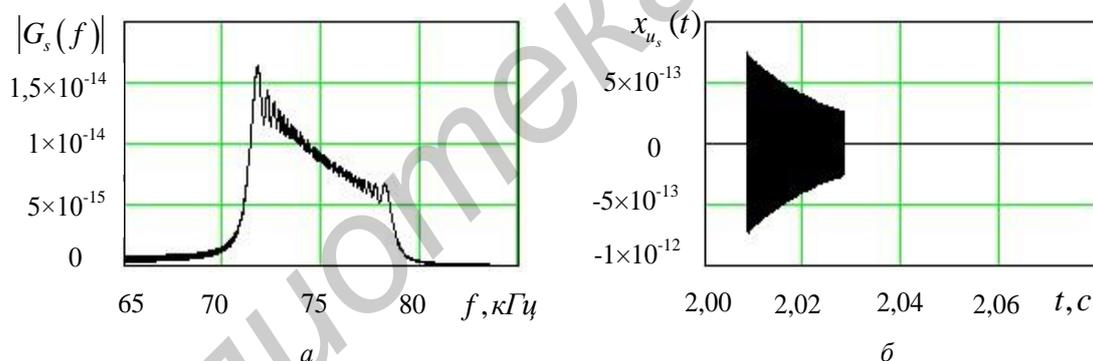


Рис. 3. Сигнал с учетом затухания: *a* – спектральная структура; *б* – временная структура

Параметры морской среды в зависимости от глубины

Глубина, м	Параметры			
	Температура, °С	Соленость, ‰	Давление, МПа	Скорость звука, м/с
0–100	23	34,8	0,613	1531
100–200	20	34,85	1,632	1524
200–300	17	34,85	2,652	1517
300–400	14	34,7	3,671	1509
400–500	10	34,4	4,69	1497
500–600	7,5	34,4	5,709	1489
600–700	6	34,3	6,73	1485
700–800	5	34,4	7,75	1482
800–900	4	34,4	8,77	1482
900–1000	2,5	34,4	9,79	1482
1000–1100	2,5	34,7	10,81	1484
1100–1200	2,5	34,7	11,83	1479
1200–1300	2,5	34,7	12,8	1481
1300–1400	2,5	34,7	13,86	1482
1400–1500	2,5	34,7	14,88	1484

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы. В целом, затухание акустических волн в морской воде из-за вязкости и теплопроводности приводит к существенному уменьшению мощности отраженного сигнала и, соответственно, дальности действия ГЛ. Затухание увеличивается по мере увеличения несущей частоты зондирующего сигнала. Частотная зависимость затухания акустических волн в морской воде приводит к соответствующим частотно-зависимым искажениям в спектре отраженного сигнала. Эти искажения приводят к снижению разрешающей способности ГЛ по дальности и росту боковых лепестков свертки отраженного сигнала (по частоте или по времени), формируемой в ходе внутриверсионной обработки (корреляционной или фильтровой).

Заключение

Частотно-зависимое затухание акустических волн в водной среде является сложным явлением, зависящим от большого количества факторов и оказывающим существенное влияние как на спектральную, так и на временную структуры акустических сигналов, формируемых на выходе акустоэлектрического преобразователя приемной антенны гидролокатора.

Разработанные модели временной и спектральной структур отраженного сигнала в гидролокаторе (выражения (6) и (8)) являются основным новым результатом, имеющим важное практическое значение. Эти модели учитывают параметры гидролокатора (параметры зондирующего сигнала, характеристики передающей и приемной антенн, коэффициенты электроакустических и акустоэлектрических преобразований), сферичность фронта волны, отражательные способности исследуемой поверхности (объекта), а также частотно-зависимое затухание акустических волн при распространении в водной среде. Разработанные модели позволяют учесть изменения скорости распространения акустической волны и частотно-зависимого затухания в соответствии с изменением глубины.

Разработанные модели являются основой методики определения как мощности отраженного сигнала и мешающих отражений, так и их спектрально-временных характеристик. Важно учитывать эти характеристики при выполнении внутриверсионной и междуверсионной обработки принятого сигнала, а также при прогнозировании результатов обнаружения, измерения, построения изображений и распознавания.

INFLUENCE OF A MEDIUM OF PROPAGATION OF HYDROACOUSTIC WAVES ON SPECTRAL AND TEMPORAL STRUCTURES OF RECEIVED SIGNAL

S.R. HEISTER, TRAN TAI TRONG

Abstract

Sonar path structure is considered. Frequency dependence of attenuation of acoustic waves propagating in water and its influence on spectral and temporal structures of reflected signals are considered. The results of the basic laws of changes research in temporal and spectral structure of acoustic signal due to propagation in water are represented.

Список литературы

1. Роберт Дж. Урик. Основы гидроакустики. Ленинград, 1978.
2. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Ленинград, 1990.
3. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Коретин Е.А. Справочник по гидроакустике. Ленинград, 1988. – 552 с.
4. Быков Р.В., Джеки А.М., Гейстер С.Р. // Вестн. Воен. акад. Респ. Бел. 2005. № 4 (17). С. 67–75.
5. Исакович М.А. Общая акустика. М., 1973.
6. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Ленинград, 1981.
7. Яковлев А.Н., Каблов Г.П. Гидролокаторы ближнего действия. Ленинград, 1983.
8. Шокальский Ю.М. Океанография. Ленинград, 1959.