

УДК 534.873

ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ГИДРОЛОКАЦИИ В СОВОКУПНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОКЕАНА И КРИТЕРИИ АКУСТИЧЕСКОЙ СКРЫТНОСТИ ЭТИХ ОБЪЕКТОВ

© 1999 г. Ю. М. Сухаревский

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036, Москва, ул. Шверника, 4
e-mail: bvp@akin.ru*

Поступила в редакцию 31.10.97 г.

На основе развитого в [1] вероятностного подхода к определению дальности действия гидроакустических систем в совокупности физических (акустических) условий глубоководных районов океана оценивается эффект сокращения вероятностной дальности гидролокации в результате снижения акустических полей излучения или отражения объекта гидролокации. Исследуется зависимость сокращения дальности от диапазона расстояний, вида гидроакустической системы и вида помехи.

Предлагаются два критерия акустической скрытности объекта гидролокации. В качестве одного из них – дальность скрытности, или дальность, реализующаяся в совокупности акустических условий океана с малой статистической обеспеченностью интегральной вероятности в противоположность дальности обнаруживаемости, реализующейся в той же совокупности акустических условий с большей статистической обеспеченностью. Другой критерий акустической скрытности – отношение указанных дальностей. Дается оценка этого отношения в зависимости от величины статистической обеспеченности дальностей.

Обосновывается возможность использования объектом гидролокации особенностей распространения звука в океане для дополнительного увеличения своей акустической скрытности.

Эффект снижения акустических полей излучения или отражения объектов гидролокации, увеличивающего их акустическую скрытность, выражается в сокращении дальности гидролокации и определяется обычно коэффициентом сокращения дальности (КСД).

С оценками эффекта сокращения дальности гидролокации в результате снижения акустических полей объектов гидролокации автору пришлось иметь дело еще в 50–60-х гг. в качестве руководителя разработки одного из средств снижения акустических полей [2] и руководителя Сухумской научной морской станции Акустической лаборатории Физического института Академии наук СССР [3]. В глубоководной акватории станции проводились морские испытания по этой тематике на опытных якорных буях и на кораблях с использованием ее берегового и судового многочастотного гидролокационного оборудования.

Было показано и экспериментально подтверждено, что КСД зависит как от величины снижения акустических полей (ВСП) объекта гидролокации, так и от условий распространения звука в море – скорости спада интенсивности звука с расстоянием, определяющейся законами распространения и затухания, и от вида преобладающей помехи (в случае активной гидролокации

преобладающей помехой может быть не только шум, но и реверберационная помеха, уровень которой зависит от расстояния).

Для сферического закона распространения, то есть закона расширения фронта волны, практически реализовавшегося в зимнее время на небольших расстояниях, и при использовании глубоководных ультразвуковых направленных приемо-излучающих антенн, уменьшающих влияние первых сильных донно-поверхностных отражений, КСД определялся из уравнения

$$\Delta\Phi_{\text{дБ}} = 10\log(r_1/r_2)^{2\varepsilon} + \varepsilon\beta_{\text{дБ/км}}(r_1 - r_2), \quad (1)$$

в котором $\Delta\Phi_{\text{дБ}}$ – величина снижения в дБ акустического поля объекта гидролокации, $10\log(r_1/r_2)^{2\varepsilon}$ – потеря на расширение фронта волны, r_1 – дальность гидролокации (в км) объекта без средства снижения поля, r_2 – дальность гидролокации объекта со средством снижения поля, $\varepsilon = 1$ – для пассивной гидролокации, $\varepsilon = 2$ – для активной гидролокации, $10\log(r_1/r_2) = \text{КСД}_{\text{дБ}}$, $\beta_{\text{дБ/км}}$ – километрическое затухание.

При цилиндрическом законе распространения, реализующемся в Черном море в летнее время в условиях приповерхностного звукового канала,

$$\Delta\Phi_{\text{дБ}} = 10\log(r_1/r_2)^\varepsilon + \varepsilon\beta_{\text{дБ}}(r_1 - r_2). \quad (2)$$

Для активной гидролокации при преобладающей реверберационной помехе в предположении идентичного для эхо-сигнала и реверберации законов расширения фронта волны и затухания

$$\Delta\Phi_{\text{дБ}} = 10\log(r_1/r_2) = \text{КСД}. \quad (3)$$

С разработкой автором в те же годы теории оптимальных частот гидролокации и методики КИД (КИД – коэффициент изменения дальности, связывающий этот эффект с вызывающим его изменением параметров уравнения гидролокации) было показано, что вследствие инвариантности для оптимальных частот величины затухания $B = \epsilon\beta r$ при параметрах уравнения, описываемых степенными функциями частоты, и законе километрического затухания в форме $\beta_{\text{дБ/км}} = \beta_0 f_{\text{кГц}}^n$ кГц, КИД и, соответственно, КСД не зависят от частоты, а только от показателя при частоте n (теория оптимальных частот и методика КИД наиболее полно изложены в [1], где КИД_{дБ} обозначает $10\log(r_2/r_1)$).

При оптимальной частоте КСД (как и КИД) определяется формулой

$$\text{КСД}_{\text{дБ}} = \text{КИД}_{\text{дБ}} = \alpha\Delta\Phi_{\text{дБ}}, \quad (4)$$

где в случае КИД (общем) $\Delta\Phi_{\text{дБ}}$ – величина “изменения” отношения, сигнал/помеха, а в случае КСД (частном) $\Delta\Phi_{\text{дБ}}$ – величина “уменьшения” этого отношения, коэффициент α равен

$$\alpha = n/m - \epsilon q n, \quad (5)$$

q – показатель при расстоянии закона распространения в форме $I(r) = I(r_0)/(r/r_0)^q$, I – интенсивность поля, r – расстояние, m – показатель при частоте для отношения сигнал/помеха в гидролокационной системе.

Формула для оптимальной частоты имеет вид

$$f_0 = (m10\log e/\epsilon\beta_0 n r)^{1/m}, \quad (6)$$

где r – дальность в км, e – основание натуральных логарифмов, а затухание при оптимальной частоте

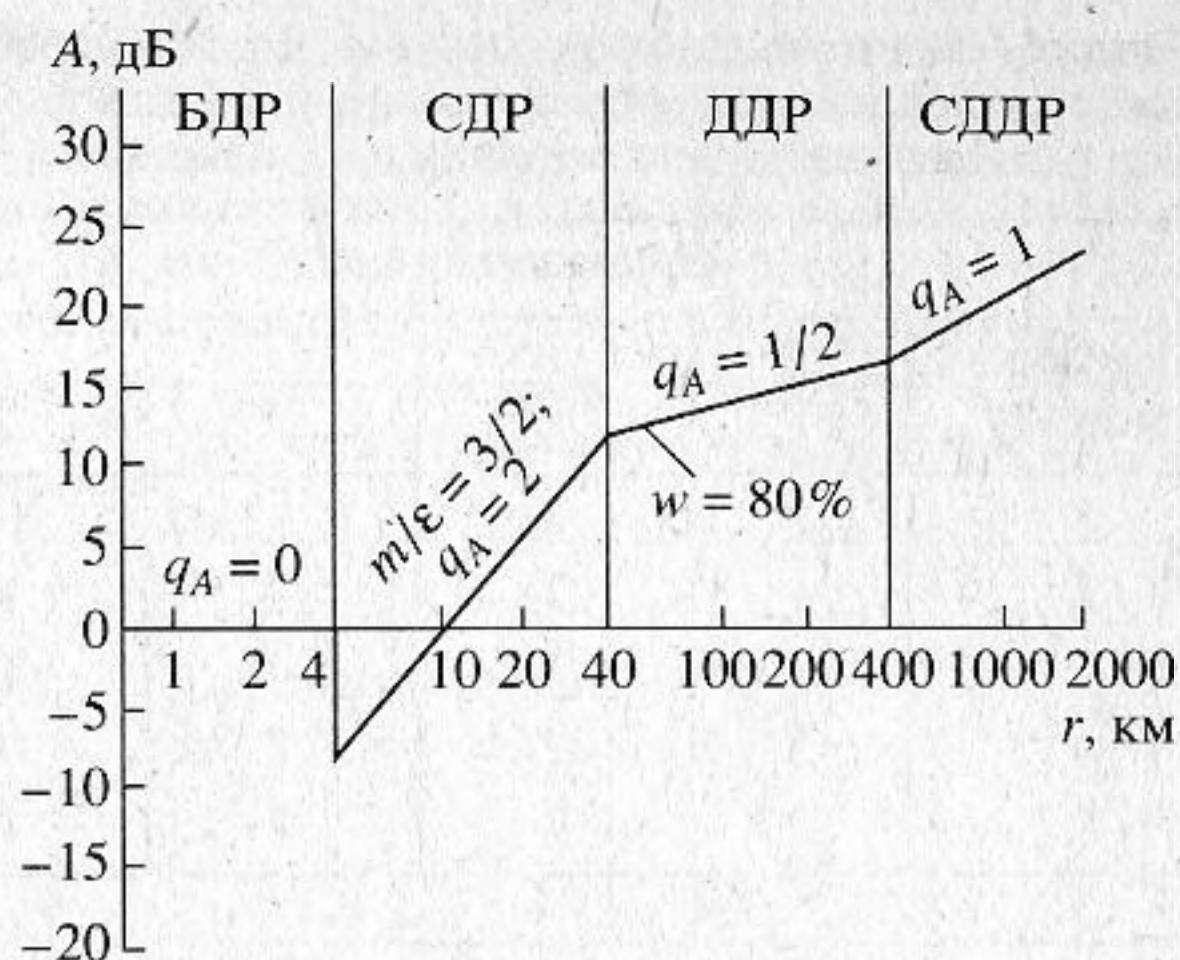
$$B_{\text{дБ}} = \epsilon r \beta_{\text{дБ/км}} = m10\log e/n. \quad (7)$$

Коэффициент повышения оптимальной частоты в функции КСД равен

$$\text{КПЧ}_{\text{дБ}} = 10\log(f_{02}/f_{01}) = \text{КСД}_{\text{дБ}}/n. \quad (8)$$

Принимая, например, в законе затухания $n = 3/2$, а для пассивной гидролокационной системы с поверхностной антенной $m = 5/2$ (см. ниже), получаем при цилиндрическом законе распространения ($q = -1$) для коэффициента α значение, равное $3/8$, а при сферическом законе распространения ($q = -2$) значение, равное $3/11$.

Переходя к оценке КСД в реальных физических (акустических) условиях океана, обладающих сильной пространственной и временной изменчивостью, и учитывая мотивированную в [1] этой



Вероятностная аномалия распространения в дБ в совокупности акустических условий глубоководных районов океана в зависимости от расстояния в км для значения статистической обеспеченности $w = 80\%$. Диапазоны расстояний ДР: Б – ближний, С – средний при $m/\epsilon = 3/2$ и $q_A = 2$, Д – дальний, СД – сверхдальний.

особенностью океана целесообразность применения статистической оценки дальности гидролокации, воспользуемся соответствующей методикой, развитой в [1], для оценки эффекта снижения акустического поля объекта гидролокации в совокупности акустических условий глубоководных районов океана.

При этом выразим показатель закона распространения в виде $q = -2 + q_A$, где -2 – показатель для сферического закона распространения, а q_A – показатель для аномалии распространения в функции расстояния, и будем использовать график рис. 2 работы [1], представленный в настоящей работе на рисунке с некоторым упрощением*. Значения m приведем для нескольких моделей пассивных и активных гидролокационных систем с различными типами антенн и учтем возможную частотную зависимость ВСП объекта гидролокации показателем при частоте $m_{\text{ВСП}}$ в соответствии с соотношением $(\text{ВСП})_{\text{дБ}} = m_{\text{ВСП}}(\text{ВСП})_{\text{одБ}}$, где $\text{ВСП}_0 = \text{ВСП}$ на частоте 1 кГц.

Тогда для пассивной гидролокационной системы будем иметь

$$m = m_c + m_{\text{ВСП}} - m_n + m_{\text{пу}} + 1/2, \quad (9)$$

где m_c – показатель при частоте для спектра сигнала, m_n – то же для спектра помехи, $m_{\text{пу}}$ учитывает частотную зависимость помехоустойчивости

* Упрощение коснулось диапазона расстояний от 4 до 40 км, в котором представлены значения “приведенной аномалии распространения” в зонах акустической тени для различных m/ϵ и q_A . На графике рисунка настоящей работы сохранена только одна, средняя кривая для $m/\epsilon = 3/2$ и $q_A = 2$ и только кривая для $w = 80\%$, использованная ниже в расчетах.

Таблица 1. Значения для различных диапазонов расстояний показателя q_A и коэффициента α для различных номеров моделей и видов (ϵ) систем (правая часть таблицы), также соответствующие этим номерам моделей и видам систем значения их частотных параметров m (левая часть таблицы)

номер модели системы	ϵ	Диапазоны расстояний				m	<4 км;	4–40 км;	40–400 км;	<400 км
		$m_{пу}$	m_K	$m_{всп}$	$q_A = 0$		$q_A = 2$	$q_A = 1/2$	$q_A = 1$	
1	1	2	–	0	5/2	3/11	3/5	6/19	3/8	
2	1	2	–	1	3/2	1/3	1	2/5	1/2	
3	1	1	–	1	1/2	3/7	3	6/11	3/4	
4	2	2	1	0	11/2	3/23	3/11	3/20	3/17	
5	2	2	1	1	9/2	1/7	1/3	1/6	1/5	

приемной антенны, а $1/2$ отражает эффект осреднения $(\Delta f T)^{1/2}$ за время интегрирования T при постоянной относительной полосе $(\Delta f/f)$. Принимая, как и в [1], для спектра шумоизлучения объекта гидролокации, не имеющего средства снижения акустического поля, $m_c = -2$, для спектра помехи $m_{п} = -2$, для помехоустойчивости приемной антенны $m_{пу} = 2$, будем иметь при частотно-независимой ВСП $m = 5/2$, а при ВСП, линейно возрастающей с частотой, $m = 3/2$. Для системы с линейной антенной при частотно-независимой ВСП получим $m = 1/2$.

Для активной гидролокационной системы

$$m = m_K + m_{п} - m_{эро} - m_{всп} + m_{пу},$$

где m_K – показатель при частоте для коэффициента концентрации излучения, $m_{эро}$ – тот же показатель для квадрата эквивалентного радиуса отражения объекта гидролокации. В типичном случае цилиндрической излучающей антенны, ненаправленной в горизонтальной плоскости, и поверхностной приемной антенны, принимая, как в [1], $m_{эро} = 1/2$, получаем при $m_{всп} = 0$ и $m_{всп} = 1$ значения показателя m , равные соответственно $11/2$ и $9/2$.

Данные для коэффициента α , связывающего КСД с ВСП, в зависимости от вида системы (ϵ), показателя при частоте отношения сигнал/помеха (m) и показателя при расстоянии аномалии распространения (q_A) в различных диапазонах расстояний представлены в табл. 1.

При использовании данных табл. 1 для больших значений $\Delta\Phi$ или α и, соответственно, больших значений КСД высока вероятность того, что r_1 и r_2 оказываются в различных диапазонах расстояний (то же может получаться и при меньших значениях КСД или α , если дальность r_1 лежит близко к нижним граничным значениям диапазонов расстояний). В таких случаях для определения истинных значений r_2 следует применять методику, использованную в [1] для оценок КИД в подобной ситуации. Нужно по значению r_1 определить величину $КИД' = 10 \log(r_1/r_{гр})$,

где $r_{гр}$ – расстояние, соответствующее нижней границе диапазона расстояний, в котором лежит r_1 , определить величину $\Delta\Phi'_{дБ} = КСД'/\alpha_1$, найти $\Delta\Phi''_{дБ} = \Delta\Phi_{дБ} - \Delta\Phi'_{дБ}$, затем $КСД'' = \alpha_2 \Delta\Phi''$, где коэффициенты α_1 и α_2 – значения коэффициента α для диапазонов расстояний, включающих соответственно r_1 и r_2 . Тогда искомое значение $КСД = КСД' + КСД''$.

Очевидно, что в диапазонах расстояний 4–40 км и 40–400 км, имеющих два граничных расстояния, различающиеся в десять раз, максимальная реализуемая величина КСД = 10 дБ (в случае, если r_1 совпадает с верхним граничным расстоянием). Таким образом, согласно данным табл. 1 в диапазоне расстояний 4–40 км для модели системы № 2 максимальная реализуемая величина КСД достигается при ВСП₀ = 10 дБ (поскольку $\alpha = 1$), а для модели системы № 3 – уже при 3.3 дБ (поскольку $\alpha = 3$). Диапазон расстояний 4–40 км в этом смысле является узким.

К примеру, произведем оценку КСД для модели пассивной системы № 2 с дальностью $r_1 = 100$ км и объекта гидролокации без средства снижения поля. Нижняя граница диапазона расстояний, в котором лежит r_1 , составляет 40 км, а коэффициент α равен $2/5$. Примем теперь для объекта со средством снижения поля значение $\Delta\Phi_0 = 12$ дБ. Тогда будем иметь КСД, равный $12 \cdot 2/5 = 4.8$ дБ, в то время как $КСД' = 10 \log 100/40 = 4$ дБ. Таким образом, r_2 оказывается лежащей в диапазоне расстояний 4–40 км. Найдем истинное значение r_1/r_2 . Согласно предыдущему имеем $\Delta\Phi' = 4/\alpha_1 = 4/(2/5) = 10$ дБ, $\Delta\Phi'' = \Delta\Phi - \Delta\Phi' = 12 - 10 = 2$ дБ и $КСД'' = 2/\alpha_2$. По данным табл. 1 значение $\alpha_2 = 1$, следовательно, $КСД'' = 2/1 = 2$ дБ, $КСД = КСД' + КСД'' = 4 + 2 = 6$ дБ и $r_1/r_2 = 4$. Увеличим теперь ВСП до 16 дБ, т.е. на 4 дБ. Тогда при $\alpha_2 = 1$ получим суммарный $КСД = 6 + 4 = 10$ дБ и $r_1/r_2 = 10$.

Произведем еще оценку КСД для модели активной системы № 5. Примем дальность r_1 равной

500 км, а для средства снижения поля $\Delta\Phi_0 = 20$ дБ. Дальность r_1 лежит в диапазоне расстояний, превышающих 400 км, для которого значение α равно $1/5$, следовательно, $\text{КСД}' = 10 \log 500/400 = 1$ дБ и $\Delta\Phi' = 1/1/5 = 5$ дБ, а $\Delta\Phi'' = 16 - 5 = 11$ дБ и, поскольку для диапазона расстояний 40–400 км $\alpha = 1/6$, то $\text{КСД}'' = 11/6 \approx 2$ дБ, $\text{КСД} = 1 + 2 = 3$ дБ и $r_1/r_2 = 2$.

Данные табл. 1 для коэффициента α и результаты расчетов КСД для различных моделей гидролокационных систем, диапазонов расстояний и частотных характеристик средств снижения поля объекта гидролокации дают основание для следующих заключений:

– эффект снижения акустических полей объектов гидролокации для пассивной гидролокации при равной ВСП существенно выше, чем для активной гидролокации ($\text{КСД}_{\text{дБ}}$ примерно вдвое выше);

– быстрый рост аномалии распространения с расстоянием (большая величина q_A) увеличивает КСД. Так, в диапазоне расстояний 4–40 км, в котором преобладает эффект зоны тени с быстро растущей виртуальной аномалией распространения, КСД увеличивается многократно;

– слабый рост с частотой отношения сигнал/помеха (малая величина m), что имеет место при использовании в гидролокационных системах линейных антенн, или при использовании акустической защиты объектов гидролокации с частотно-зависимой ВСП, также увеличивает КСД.

КСД в совокупности акустических условий океана является мерой ущерба, наносимого гидролокации использованием на объектах гидролокации средств снижения их полей, но не является мерой их скрытности, или ее увеличения в результате использования этих средств. В качестве критерия акустической скрытности объекта гидролокации от действия заданной гидроакустической системы можно предложить вероятностную дальность, реализующуюся с малой статистической обеспеченностью (интегральной вероятностью), но и именовать ее дальностью скрытности объекта гидролокации в совокупности акустических условий океана.

При таком критерии скрытности дальность, реализующуюся с высокой статистической обеспеченностью, целесообразно именовать дальностью обнаруживаемости объекта гидролокации, но можно именовать и, как обычно, дальностью обнаружения, если только не смешивать ее с дальностью обнаружения в конкретных детерминированных условиях, зависящей от заданных вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог и статистики помехи. При определении вероятностной дальности в совокупности акустических условий океана вероятность правильного

Таблица 2. Величины отношения в дБ дальности скрытности к дальности обнаруживаемости объекта гидролокации $r_{\text{скр}}/r_{\text{обн}}$ для различных моделей гидролокационных систем в диапазоне расстояний 40–400 км в зависимости от значения обеспеченности ($w\%$) той и другой дальности

№ модели системы	$w = 50\%$	$w = 60\%$	$w = 70\%$	$w = 80\%$	$w = 90\%$
1	0	1.5	3	4.5	6
2	0	2	4	6	8
3	0	3	6	9	12
4	0	1	2	3	4
5	0	1.2	2.5	3.5	5

обнаружения сигналов подразумевается детерминированной постоянной величиной, одинаковой для больших и малых дальностей и не зависящей от значений обеспеченности (ее целесообразно принимать достаточно высокой, гарантирующей уверенное обнаружение сигналов).

Выбрав цифровые значения для малой и для высокой обеспеченности дальности и учитывая, что, согласно [1], 10%-ное увеличение обеспеченности дальности требует повышения энергии сигнала для пассивных гидролокационных систем на 2.5 дБ, а для активных гидролокационных систем на 3.5 дБ, можно пересчитать разность между этими значениями обеспеченности дальности в соответствующее изменение энергии сигнала $\Delta\Phi_{\text{дБ}}$ и, перемножая его на коэффициент α табл. 1, определить величины отношения дальности скрытности к дальности обнаруживаемости с заданными значениями обеспеченности той и другой дальности.

Если теперь любое значение дальности рассматривать одновременно как дальность обнаруживаемости с малой обеспеченностью и как дальность скрытности с высокой обеспеченностью и учесть, что тогда $w_{\text{скр}} = 1 - w_{\text{обн}}$, то для фиксированного значения обеспеченности дальности скрытности $r_{\text{скр}}$ и дальности обнаруживаемости $r_{\text{обн}}$ будут совпадать только при $w = 50\%$. С увеличением w дальность скрытности будет возрастать, а дальность обнаруживаемости будет падать. С уменьшением w будет иметь место обратная картина. Величины отношения $r_{\text{скр}}/r_{\text{обн}}$ при равных значениях их обеспеченности w представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что при разумных требованиях к обеспеченности дальности гидролокации (w более 60% в равной мере по дальности обнаруживаемости и по дальности скрытности) дальность скрытности существенно больше дальности обнаруживаемости, так что даже при относительно небольших уровнях ВСП дальности скрытности могут достигать весьма зна-

Таблица 3. Величины сокращения дальности $R = r_1/r_2$ и изменения оптимальной частоты $F_0 = f_{02}/f_{01}$ при наложении реверберационной помехи в случае частотно-независимо помехи в гидролокационной системе ($m_p = 0$) и в случаях ее частотной зависимости ($m_p = +1$ и $m_p = -1$) при использовании частотной оптимизации по совокупной помехе

	s_0	20	10	4	2	1	0.5
$m_p = +1$	R	3.7	2.5	1.7	1.35	1.2	1.1
	F_0	8.0	4.8	2.6	1.8	1.4	1.2
	s	2.0	5.0	12.5	4.0	1.0	0.6
$m_p = 0$	R	20	10	4	2	1.25	1.15
	F_0	7.5	5.0	2.5	1.6	1.25	1.05
	s	$<10^8$	$<10^6$	$<10^4$	$<10^2$	4.0	0.7
$m_p = -1$	R	4.5	3.4	2.0	1.5	1.2	1.1
	F_0	0.15	0.25	0.4	0.5	0.7	0.8
	s	2.0	3.0	4.0	2.0	1.4	0.55

чительных величин, в особенности для пассивных систем. С другой стороны, данные табл. 1 показывают, что большое сокращение дальностей обнаруживаемости возможно только при использовании средств снижения полей объектов гидролокации с высокими уровнями ВСП, в особенности для активной гидролокации.

Перейдем теперь к вопросу о возможности увеличения скрытности объектов гидролокации при использовании особенностей распространения звука в океане.

Одной из этих особенностей является упоминавшееся явление реверберации (в активных системах). Из формулы (2) следует, что при ограничении дальности реверберационной помехой в приповерхностном канале коэффициент α , определяющий эффект снижения акустических полей объектов гидролокации равен единице, в то время как согласно данным табл. 1 при отсутствии реверберации он существенно меньше.

Если учитывать действие совокупной – реверберационной и шумовой помехи, то, как следует из [1], где рассмотрено сокращение дальности активной гидролокации в случае наложения реверберационной помехи, при отношении интенсивностей реверберации и шума s_0 , превышающем единицу, действие шумовой помехи становится незаметным и сокращение дальности следует формуле (2), то есть $KCD = 10 \log s_0$.

Условие $s_0 > 1$ приводит к большой потере дальности, в особенности значительной при частотно-независимой реверберационной помехе в гидролокационной системе. Как показано в [1], при пропорциональном возрастании с частотой интенсивности реверберации, преобразуемой действием противореверберационных устройств обработки информации гидролокационной системы, возмож-

ны пропорциональная и обратнопропорциональная зависимости интенсивности реверберационной помехи от частоты и частотная оптимизация системы по совокупной помехе, как следует из данных табл. 3 в [1], позволяет в таких случаях существенно уменьшить потерю дальности.

Оценим эффект снижения акустических полей объектов гидролокации в присутствии реверберации.

Будем сначала полагать, что $s_0 > 1$, т.е. что на дальности, равной дальности в отсутствие реверберации, реверберационная помеха является преобладающей. Упомянутая табл. 3 в [1] дает возможность начать отсчет потери дальности из-за снижения поля объекта гидролокации от дальностей, сокращенных в результате наложения реверберационной помехи, для чего нужно располагать данными о величинах отношения реверберационная помеха/шумовая помеха на этих дальностях, в таблице не приведенными. Таблица 3 настоящей работы имеет соответствующее дополнение в виде строки обозначающего это отношение параметра s_0^* .

Значение показателя $m_p = 0$ реализуется при частотно-независимом подавлении реверберации, в частности при использовании сложных сигналов и когерентной обработки с постоянной полосой. В этом случае линейное возрастание интенсивности реверберации с частотой и эффект увеличения с частотой разрешающей способности приемной антенны приводят к частотно-независимой реверберационной помехе, при которой частотная оптимизация системы по совокупной помехе неэффективна, не избавляет от больших потерь дальности – согласно данным табл. 3 сокращение дальности равняется s_0 . Значение показателя $m_p = +1$ имеет место при использовании для подавления реверберации сложных сигналов с постоянной относительной полосой. Данные табл. 3 показывают, что в этом случае, как и при $m_p = -1$, частотная оптимизация системы по совокупной помехе приводит к значительному снижению потерь дальности при сохранении, однако, на всех сокращенных дальностях преобладания реверберационной помехи ($s > 1$). Последнее свидетельствует о том, что при $s_0 > 1$ на дальности, равной дальности в отсутствие реверберационной помехи, снижение поля объекта гидролокации во всех случаях приводит к максимально возможному эффекту – сокращению дальности $r_1/r_2 = ВСП$.

Поскольку приемные антенны современных гидролокационных систем имеют достаточно высокое угловое горизонтальное разрешение и в

* В [1] левый столбец табл. 3 содержит величины показателя степени при частоте для частотной зависимости интенсивности реверберационной помехи, ошибочно обозначенного s , в настоящей работе этот показатель обозначен m_p , как и показатели при частоте для других параметров.

этих системах для подавления реверберационной помехи могут быть использованы достаточно широкополосные сигналы, представляет интерес рассмотрение случая $s_0 < 1$. Учитывая, что при уменьшении дальности в результате снижения уровня сигнала отношение сигнал/реверберационная помеха возрастает в значительно меньшей мере, чем отношение сигнал/шумовая помеха, можно получить следующее приближенное выражение для КСД в этом случае:

$$\text{КСД} = \alpha\Delta\Phi + (\alpha\Delta\Phi + 10\log s_0)$$

(при $\alpha\Delta\Phi + 10\log s_0 = s > 0$). Здесь первый член правой части означает сокращение дальности, восстанавливающее отношение сигнал/шумовая помеха при α согласно данным табл. 1 порядка 1/6, второй член – отношение реверберационная помеха/шумовая помеха на сокращенной дальности (проявляющийся эффект реверберации с $\alpha = 1$). Точное решение может дать совместное использование выражений (23) и (24) в [1].

Таким образом, при применении достаточно эффективных средств снижения акустических полей объектов гидролокации реверберация существенно увеличивает КСД и в тех случаях, когда на дальностях обнаруживаемости объектов гидролокации, не имеющих средств снижения акустических полей, уровень реверберационной помехи значительно ниже уровня шумовой помехи и действия реверберации не проявляется.

Другой особенностью распространения звука в океане, обеспечивающей дополнительное увеличение скрытности объектов гидролокации в сопоставлении с вышеприведенными статистическими оценками, производившимися для глубин корреспондирующих точек от 100 до 300 м, является ослабление звукового поля (аномалии распространения) при большем разномсе корреспондирующих точек по глубине. В частности, при расположении объекта гидролокации за пределами границ подводного звукового канала – верхней границы, а в условиях канала с неглубоко погруженной осью и доступной нижней границей, аномалия распространения уменьшается на 5–7 дБ (при этом предполагается, что сама гидролокационная система, если она производит поиск, находится в пределах границ канала). Такое ослабление аномалии распространения дополнительно увеличивает скрытность объекта гидролокации.

Учитывая важность этого эффекта, следует считать целесообразным его более тщательное изучение с получением статистических оценок для различных распределений расположения гидролокационной системы и объекта гидролокации по глубине с охватом более широкого диапазона глубин, чем это было сделано в [1].

Также следует считать целесообразным найти статистику аномалии распространения в частных

совокупностях районов океана, наиболее важных по критерию их значимости для решения различных задач гидролокации с введением этого критерия в качестве “веса” района, что уже отмечалось в [1]. Это даст возможность более полной оценки достижимой скрытности объектов гидролокации.

Наконец, о возможности экспериментального подтверждения адекватности развитой в [1] и в настоящей работе методики вероятностной оценки дальности действия гидролокационных систем и эффективности средств снижения акустических полей объектов гидролокации.

Такую возможность обеспечивало бы использование этой методики для прогнозирования вероятностной дальности действия гидролокационной системы при установке ее на прибрежном склоне морского дна глубоководного района в поясе умеренных широт. Как показали оценки статистики аномалии распространения и уровня ветрового шума в одном из таких районов, годовая статистика этих акустических параметров в районе почти не отличается от глобальной статистики, приведенной в [1]. Таким образом результаты сопоставления прогнозируемой и реальной статистики дальностей, накопленных системой, должны быть достаточно представительными.

В связи с этим следует упомянуть о разработке специальной системы гидроакустического прогнозирования, описание которой содержится в сообщении директора Гидроакустического инженерного бюро К. Кремера (Германия) на майской сессии Европейской акустической ассоциации. Это – стационарная активно-пассивная система с компьютерным управлением, обработкой информации и моделированием полей сигналов и помех по данным о гидрологических характеристиках морской среды и упругих параметров дна в районе действия системы, поставляемым глобальной “Географической информационной системой”. Гидроакустическая система моделирует звуковое поле в рамках лучевой акустики, параболического уравнения, или представления нормальных волн (по выбору экспертной системы), а также поля помех различных источников и реверберационных помех. Состояние поверхности контролируется самой гидроакустической системой (см. 4).

Очевидно, что реализация описанной системы гидроакустического прогнозирования открыла бы более широкие возможности в исследованиях по применению статистических методов прогнозирования в гидроакустике.

В заключение автор выражает благодарность Н.С. Агеевой, Л.М. Лямшеву, В.И. Мазепову и В.В. Тютюкину, совместные исследования с которыми привели к постановке и проведению настоящей работы, а также выражает им признательность за полезное обсуждение ее результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухаревский Ю.М. Статистика основных акустических параметров глубоководных районов океана и вероятностная дальность действия гидроакустических систем // Акуст. журн. Т. 41. № 5. С. 848–864.
2. Российская наука – Военно-Морскому Флоту // Наука, 1997. С. 178.
3. Сухаревский Ю.М. Из истории отечественной акустики. О работах ученых Акустической лаборатории Физического института Академии наук СССР (ФИАН) в период Великой Отечественной Войны // Акуст. журн. Т. 42. № 1. С. 141.
4. Kremer K. Advanced Underwater Technology with Emphasis on Acoustic Modelling and Systems. EAA Symposium. Gdansk–Jurata, May 1997.

**Decrease in the Acoustic Fields of Sonar Objects
in the Physical Conditions of a Real Ocean and the Criterion
of Acoustic Undetectability of These Objects**

Yu. M. Sukharevskii

On the basis of the probabilistic approach [1] developed for the determination of the sonar detection range in physical (acoustical) conditions of deep-water ocean regions, the decrease in the probabilistic detection range due to the reduction of the acoustic fields radiated or reflected by a sonar object is estimated. The dependences of the decrease in the detection range on the interval of distances, the type of sonar system, and the type of noise is studied.

Two criteria of acoustic undetectability of a sonar object are proposed. One of them is the undetectability range, or the range realized in the acoustic conditions of the ocean with a low integral probability, in contrast to the detectability range realized with a high integral probability in the same conditions. The other criterion of the acoustic undetectability is the ratio between the aforementioned ranges. This ratio is estimated as a function of the integral probability of these ranges.

The possibilities of using the specific features of sound propagation in the ocean for increasing the acoustic undetectability of a sonar object is considered.