АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 4, с. 462–469

УДК 681.883.77

О СТАТИСТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В ПРИМЕНЕНИИ К ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

© 1998 г. С. К. Кадашников, А. И. Машошин

Лаборатория прикладных акустических исследований
189620 Санкт-Петербург, г. Пушкин-4, а/я 10

Поступила в редакцию 26.04.96 г.

Излагается подход к статистическому описанию канала распространения сигнала с целью синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю на примере расчета совместной условной – в зависимости от класса объекта и текущих условий его наблюдения, – плотности распределения нормированной мощности сигнала на выходе приемного канала для прибрежного мелководного района и каждого сезона года.

В работе [1] показано, что одним из необходимых элементов при синтезе алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю является статистическое описание канала распространения сигнала (СОКРС). Однако получение такого описания представляет собой самостоятельную весьма сложную задачу, решение которой в литературе описано недостаточно. Известные работы, например, [2, 3], посвященные статистическому описанию гидроакустического канала, ограничиваются исследованием влияния отдельных факторов на флуктуации некоторых параметров сигнала. В качестве другого примера можно назвать работу [4], в которой поднят вопрос о необходимости статистического подхода к оценке влияния условий распространения гидроакустического сигнала на дальность действия средств подводного наблюдения и предложены пути решения этой задачи. Из зарубежных публикаций можно отметить работы [5–7].

Следует заметить, что содержание СОКРС зависит от технических характеристик средства подводного наблюдения, применительно к которому осуществляется синтез алгоритмов классификации, точнее от его способности измерять те или иные классификационные признаки гидроакустического сигнала (при учете способности этого средства контролировать отдельные параметры), характеризующие гидроакустические условия в районе. С учетом сказанного, в рамках рассматриваемой задачи, под СОКРС понимается совместная условная (в зависимости от координат источника сигнала и приемной антенны, а также от поддающихся оперативному измерению параметров, характеризующих текущие гидроакустические условия в районе работы) плотность распределения (ПР) тех из измеряемых на выходе приемного тракта и несущих информацию о классе объекта параметров сигнала, значение которых зависят от условий его распространения.

Целью предлагаемой работы является изложение одного из подходов к получению СОКРС на примере описанной в работе [1] относительно простой задачи синтеза алгоритма классификации обнаруженных объектов на классы "подводная лодка" и "надводный корабль" по информации одиночного ненаправленного гидроакустического буя, в котором единственным измеряемым параметром является уровень сигнала объекта в некоторой полосе звуковых частот ($f1$, $f2$). При этом отсутствует возможность оперативного контроля текущих гидроакустических условий в районе (однако, известны географические координаты района, в котором установлен буй, и имеется таймер, позволяющий контролировать текущее время, в частности сезон года).

В основу описываемого подхода положена гипотеза о том, что наибольшее влияние на значения измеряемых параметров сигнала объекта оказывают такие характеристики гидроакустического канала, как вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ), волнение поверхности, тип дна, частотно зависимый коэффициент объемного затухания. Влияние же других факторов, например, внутренних волн, существенно меньше и при получении СОКРС ими можно пренебречь.

Для сформулированного в работе [1] классификационного признака искомое СОКРС представляет собой совместную условную ПР $g_{B1,\,B2|r1,\,r2,\,h}(b1,\ b2)$ нормированных мощностей сигнала (НМС) $B1$ и $B2$ на выходе приемного тракта в рабочем диапазоне частот в двух разнесенных точках по дистанции, соответствующих

горизонтальным расстояниям до объекта $r1$ и $r2$ и глубине хода объекта h. Нормировочным множителем при вычислении НМС служит излучаемая объектом мощность в той же полосе частот.

В основе вычисления этой ПР лежит известная математическая модель нормированной мощности сигнала на выходе линейной части приемного тракта в полосе частот, имеющая вид:

$$B_\Gamma(r,h) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \frac{\int_{f1}^{f_2} Sn(f)Hn(f)K_\Gamma(f,r,h)df}{\int_{f_1}^{f_2} Sn(f)Hn(f)df}, \quad (1)$$

где $B_\Gamma(r, h)$ – нормированная мощность сигнала на выходе приемного тракта в полосе частот ($f1$, $f2$) для объекта с координатами r и h в зависимости от гидроакустических условий, описываемых вектором Г, r – дистанция до объекта, h – глубина объекта, $Sn(f)$ – нормированный энергетический спектр шума объекта, приведенный к расстоянию r_0, $Hn(f)$ – квадрат нормированной передаточной функции приемного тракта, $K_\Gamma(f, r, h)$ – квадрат передаточной функции канала распространения сигнала на частоте f для объекта с координатами r и h в зависимости от вектора Г.

Если для упрощения принять, что связь коэффициента передачи $K_\Gamma(f, r, h)$ с вектором Г является неслучайной, то статистический характер НМС $B_\Gamma(r, h)$ целиком обусловлен статистическим характером вектора Г и решаемая задача сводится к нахождению совместной ПР неслучайных функций $B1 = B1_\Gamma(r1, h)$ и $B2 = B2_\Gamma(r2, h)$ случайного векторного аргумента Г.

Согласно [8] решением этой задачи является выражение:

$$g_{B1,\,B2_{|r1,\,r2,\,h}}(b1,b2) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_\Gamma(\gamma)\delta[b1 - B1_\gamma(r1,h)] \times \quad (2)$$
$$\times\, \delta[b2 - B2_\gamma(r2,h)]d\gamma,$$

где $g_\Gamma(\gamma)$ – ПР вектора Г, $\delta[b - B_\gamma(r, h)]$ – дельта-функция.

Если в средстве подводного наблюдения предусмотрено измерение либо получение от внешнего источника информации о текущих гидроакустических условиях в виде вектора $\hat{\Gamma}_1$ оценок части параметров вектора Г, поддающихся оперативному измерению, в формуле (2) безусловная ПР $g_\Gamma(\gamma)$ заменяется на условную $g_{\Gamma_{|\hat{\Gamma}1}}(\gamma)$, т.е. на ПР вектора Г, учитывающую результаты оперативного контроля текущих гидроакустических условий. Если же измерение либо получение вектора Г не предусмотрено, но имеются внутренние часы, показывающие текущее время T (как в рассматриваемом буе), то в формулу (2) подставляется условная ПР $g_{\Gamma_{|T}}(\gamma)$, являющаяся ПР вектора Г для конкретного района и времени года.

Применительно к рассматриваемому средству подводного наблюдения для расчета по формуле (2) необходимо задать в явном виде модель коэффициента передачи канала распространения на фиксированной частоте $K_\Gamma(f, r, h)$ и в явном виде описать ПР вектора Г.

Ввиду того, что функция $K_\Gamma(f, r, h)$ является весьма нетривиальной и, строго говоря, случайной, разработано большое число методик ее расчета (например, [9–12]), ориентированных на разные средства подводного наблюдения и с разной степенью подробности учитывающих все многообразие влияющих факторов. Поэтому явное задание функции $K_\Gamma(f, r, h)$ сводится к выбору методики, наиболее полно согласованной с техническими характеристиками используемого средства подводного наблюдения.

Проведенный анализ показал, что в рассматриваемой задаче наиболее подходящей (с точки зрения полноты учета влияющих факторов и простоты реализации) методикой расчета функции $K_\Gamma(f, r, h)$ является методика, построенная на принципах работы [9], использующая модель многолучевого канала с постоянными параметрами и энергетическим сложением лучей. Флуктуации передаточной функции, обусловленные рассеянием на случайных неоднородностях среды, не учитываются ввиду их малости.

Для этой методики вектор Г включает следующие параметры, описывающие гидроакустические условия:

– вертикальное распределение скорости звука от поверхности до дна моря;

– волнение поверхности моря;

– тип дна (с точки зрения его отражающих свойств);

– частотная зависимость коэффициента объемного затухания.

Для конкретизации ПР вектора Г примем во внимание сложившуюся практику статистического описания гидрофизических параметров водной среды в виде совокупности их дискретных функций распределения, а точнее в виде набора типовых для конкретного географического района и времени года значений каждого параметра (скалярного либо векторного) с указанием его встречаемости. Причем совместные функции распределения этих параметров, как правило, не используются, что несомненно снижает адекватность описания.

Таблица 1

	Число типовых ВРСЗ в описании	Процент времени, когда имеет место	
		волноводное распространение	антиволноводное распространение
Весна	25	12	88
Лето	25	4	96
Осень	22	55	45
Зима	17	94	6

Таблица 2

	Волнение, баллы (по высоте волны)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Весна	0.02	0.05	0.13	0.31	0.35	0.13	0.01	0.00
Лето	0.05	0.10	0.16	0.34	0.26	0.08	0.01	0.00
Осень	0.02	0.04	0.12	0.32	0.34	0.14	0.02	0.00
Зима	0.03	0.06	0.08	0.14	0.40	0.24	0.04	0.01

С учетом сделанных замечаний формула (2) применительно к рассматриваемой задаче принимает вид:

$$g_{B1,\,B2_{|r1,\,r2,\,h}}(b1,\,b2) = \sum_{i=1}^{Nz_1}\sum_{j=1}^{Nz_2}\sum_{k=1}^{Nz_3}\sum_{l=1}^{Nz_4} P(z_{1i})P(z_{2j})\times$$
$$\times P(z_{3k})P(z_{4l})\delta[b1 - B1_{z_{1i},\,z_{2j},\,z_{3k},\,z_{4l}}(r1,\,h)]\times \tag{3}$$
$$\times\,\delta[b2 - B2_{z_{1i},\,z_{2j},\,z_{3k},\,z_{4l}}(r2,\,h)],$$

где z_{1i} – i-е ВРСЗ, z_{2j} – j-я градация среднеквадратической высоты волны, z_{3k} – k-й тип дна, z_{4l} – l-е значение частотной зависимости объемного затухания сигнала, $P(z_{1i})$, $P(z_{2j})$, $P(z_{3k})$, $P(z_{4l})$ – их вероятности для конкретного географического района и времени года.

В качестве иллюстрации описанной методики был осуществлен расчет по формуле:

$$g_{B1,\,B2_{|r1,\,r2}}(b1,\,b2) = \sum_{m=1}^{Nh(w)} P_w(h_m)g_{B1,\,B2_{|r1,\,r2,\,h_m}}(b1,\,b2), \tag{4}$$

где $Nh(w)$ – число значений глубины объекта класса w, h_m – m-тое значение глубины объекта класса w, $P_w(h_m)$ – его вероятность.

Формула (4) получена из формулы (3) путем усреднения искомой ПР по возможным глубинам погружения объекта каждого из рассматриваемых классов w (подводная лодка либо надводный корабль) с учетом распределения вероятностей этих глубин для каждого класса.

Расчет осуществлялся для конкретного прибрежного мелководного района моря с глубинами 200–300 м для 4-х сезонов года. Каждый из этих сезонов характеризуется своим вероятностным описанием ВРСЗ и волнения поверхности моря.

Описание ВРСЗ для каждого сезона содержит набор типовых ВРСЗ с вероятностями их появления (встречаемостью). Некоторые характеристики этого описания приведены в табл. 1. Распределение бальности волнения поверхности моря для каждого из сезонов в рассматриваемом районе приведено в табл. 2.

Дно в районе описывается вероятностной смесью различных типов грунта в соответствии с данными [9], как указано в табл. 3.

Поскольку точный вид коэффициента отражения от морской поверхности не имеет принципиального значения для рассматриваемых расчетов, его текущее значение вычислялось с использованием приближенной формулы [13], допускаемой к применению в практических приложениях:

$$W = \exp[-0.3kh_{50}\sin(\varphi)], \tag{5}$$

где k – волновое число, h_{50} – высота волны при 50% обеспеченности, φ – угол скольжения у поверхности.

Текущее значение коэффициента отражения от дна по давлению вычислялось по формуле Френеля для модели дна в виде жидкого поглощающего полупространства [14]. Коэффициент потерь в осадках задан равным 0.02, соотношение скоростей звука в воде и грунте задано величиной 0.9.

Частотная зависимость объемного затухания сигнала описывается формулой [14]:

$$\beta(f) = \beta_0 f^{\eta_\beta}, \tag{6}$$

где $\beta(f)$ – коэффициент объемного затухания, дБ/км, на частоте f, β_0, η_β – эмпирические коэффициенты, являющиеся случайными величинами, совместная ПР которых $g_{\beta_0,\,\eta_\beta}(b,\,\eta)$ для рассматриваемого района достаточно хорошо аппроксимируется двухмерной нормальной ПР с матожиданиями $M[\beta_0] = 0.012$ и $M[\eta_\beta] = 2.0$, среднеквадрати-

Таблица 3

	Z_{31} глина–ил	Z_{32} ил–песок	Z_{33} песок–ил	Z_{34} песок–камень
Вероятность встречи	$P = 0.05$	$P = 0.25$	$P = 0.25$	$P = 0.45$
Плотность грунта	$\rho = 1.4$ г/см^3	$\rho = 1.6$ г/см^3	$\rho = 1.8$ г/см^3	$\rho = 2.0$ г/см^3

ческими отклонениями $\sigma[\beta_0] = 0.0024$ и $\sigma[\eta_\beta] = 0.1$, коэффициентом корреляции $r(\beta_0, \eta_\beta) = -0.9$.

Распределение глубины погружения подводной лодки в расчетах принималось в виде логарифмически нормального закона распределения с параметрами $M[H] = 100$ м, $\sigma[H] = 50$ м. В качестве глубины погружения надводного корабля использовалось фиксированное значение 5 м.

Расчет осуществлялся для полосы частот 4–8 кГц.

Результаты расчетов приведены на рис. 1–4. Ввиду сложности наглядного отображения зависящей от 4-х аргументов двухмерной условной ПР (4) на рис. 1, 2 изображена одномерная условная ПР НМС на выходе приемного тракта в рабочем диапазоне частот в зависимости от дистанции до

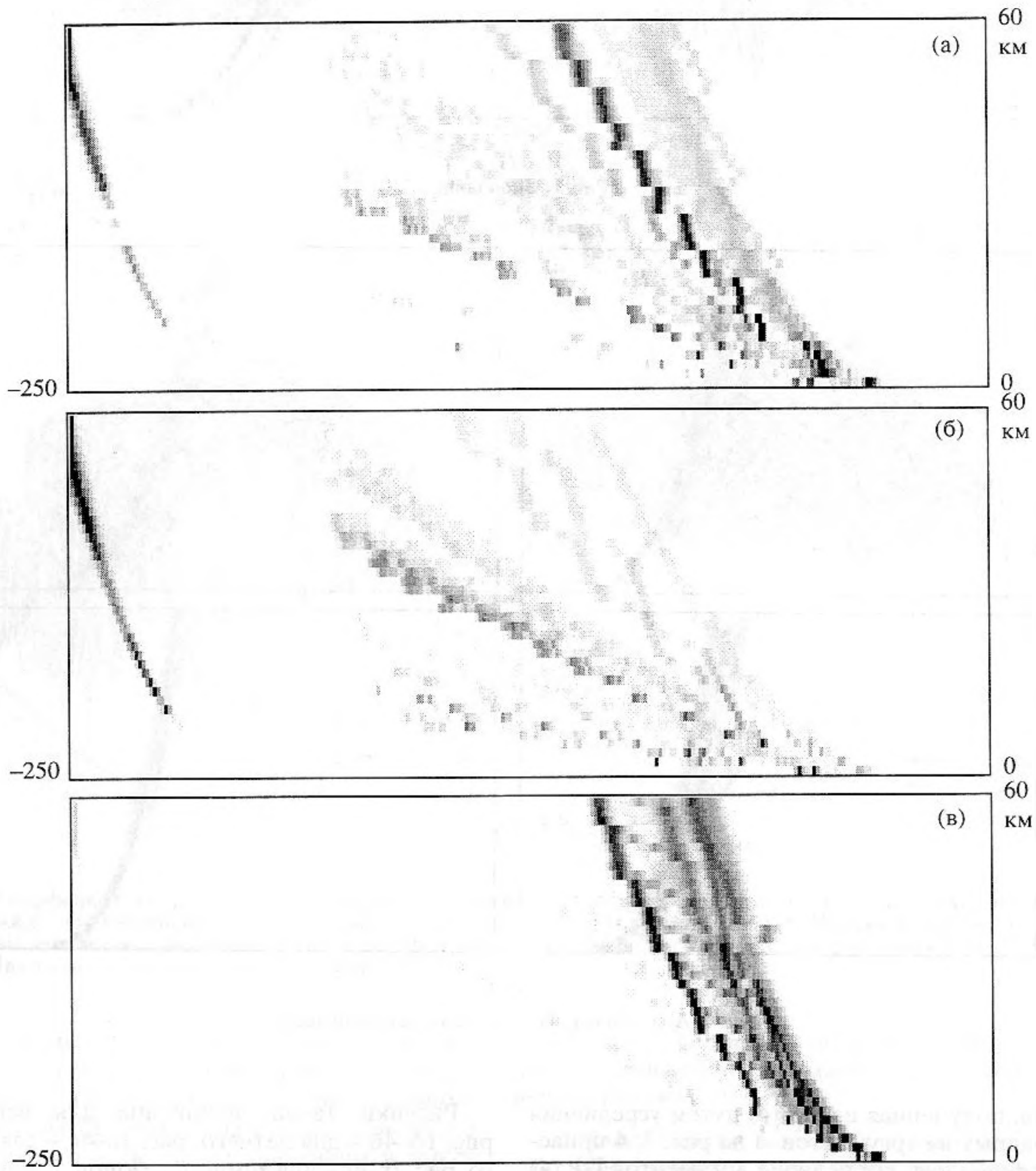

Рис. 1. Условная (в зависимости от дистанции до объекта) плотность распределения нормированной мощности гидроакустического сигнала на выходе приемного канала для надводного корабля в весенний сезон (а), летний сезон (б), осенний сезон (в), зимний сезон (г). По оси абсцисс отложена нормированная мощность гидроакустического сигнала, по оси ординат – дистанция до источника сигнала, яркостью закодирована плотность распределения. Каждое сечение графика по горизонтали представляет собой нормированную мощность сигнала от надводного корабля на конкретной дистанции до него.

Рис. 1. Окончание.

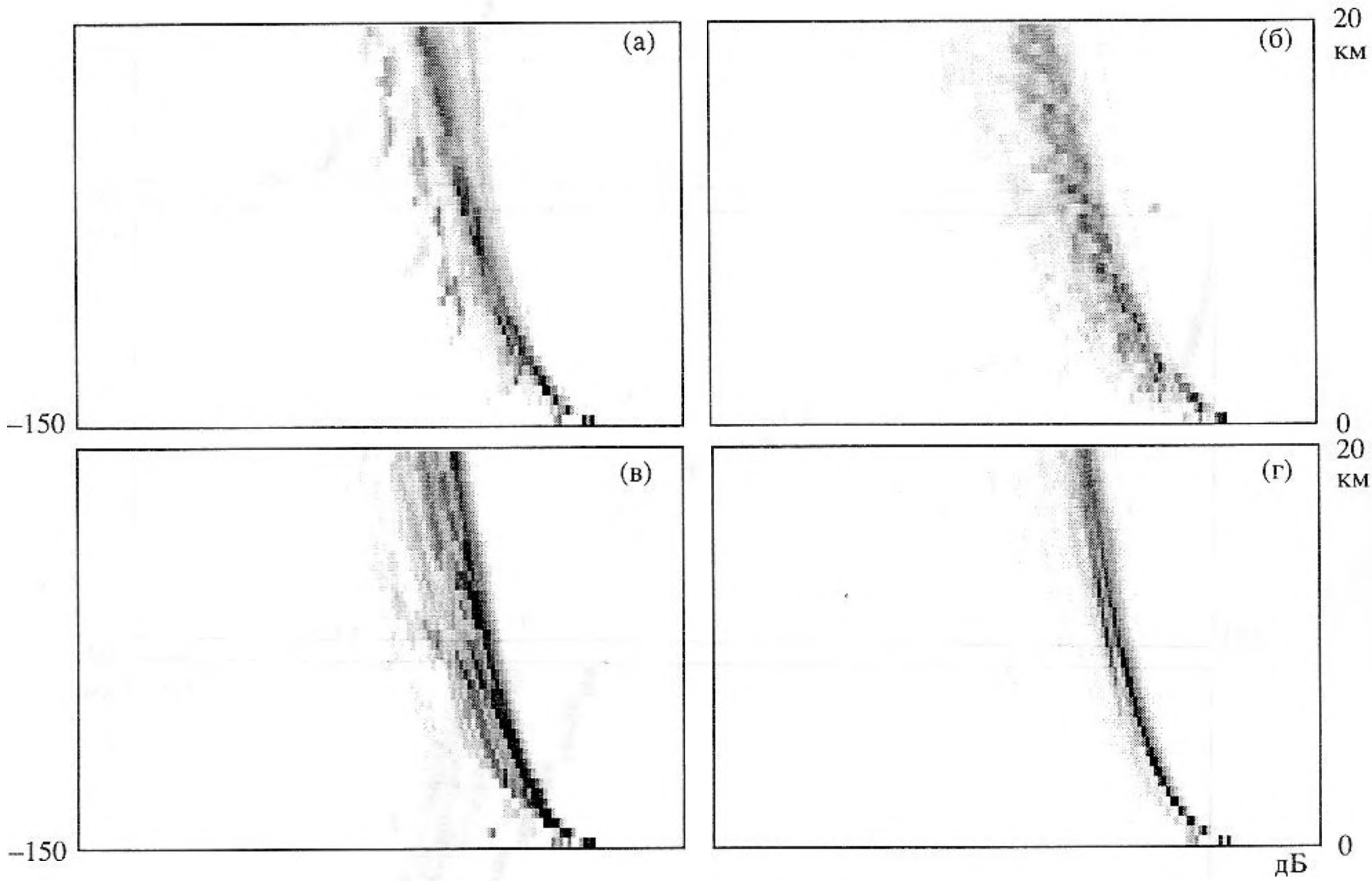

Рис. 2. Аналогичен рис. 1, но для подводной лодки.

объекта, полученная из ПР (4) путем усреднения ее по одному из аргументов, а на рис. 3, 4 приведен коэффициент корреляции аргументов ПР (4) для каждой пары дистанций до источника. Рисунки 3, 4 (для обеспечения большей наглядности сезонной циклической изменчивости приведенных коэффициентов корреляции) расположены по кругу (по часовой стрелке) в соответствии с сезонами года.

Рисунки 1а–4а посчитаны для весеннего, рис. 1б–4б – для летнего, рис. 1в–4в – для осеннего, рис. 1г–4г – для зимнего сезонов. Рисунки с нечетными номерами соответствуют надводному кораблю, рисунки с четными номерами – подводной лодке.

Из анализа рисунков можно сделать следующие выводы.

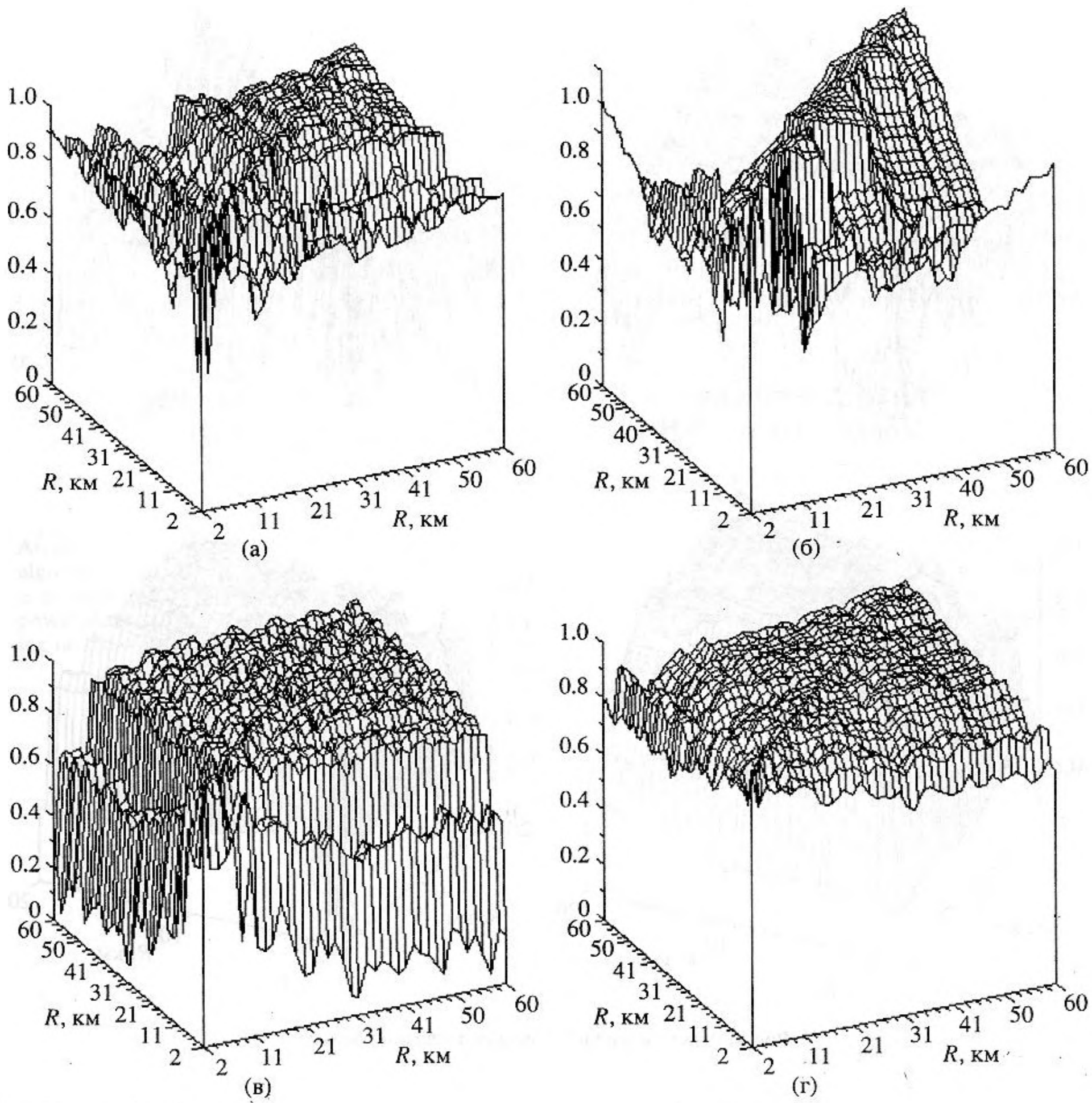

Рис. 3. Коэффициент корреляции нормированной мощности сигнала надводного корабля для различных комбинаций дистанций до него в весенний сезон (а), летний сезон (б), осенний сезон (в), зимний сезон (г). По осям абсцисс и ординат отложены дистанции до источника сигнала, по оси аппликат – коэффициент корреляции нормированной мощности сигнала надводного корабля для соответствующих комбинаций дистанций до него.

1. В холодные сезоны года (осенью и зимой), когда преобладает приповерхностное волноводное распространение, распределение нормированной мощности сигнала на выходе приемного тракта тяготеет к бóльшим значениям и имеет более компактный вид, чем в теплые сезоны, характеризующиеся преобладанием антиволноводного распространения. Причем различие между холодными и теплыми сезонами нагляднее проявляется для надводного корабля ввиду более существенной разницы в условиях распространения в этих сезонах сигнала приповерхностного источника по сравнению с сигналом глубоко погруженного источника.

2. Аналогичная зависимость наблюдается и для коэффициента корреляции нормированной мощности сигнала на выходе приемного тракта, соответствующего разным дистанциям до объекта: в холодные сезоны он близок к единице практически для всех комбинаций дистанций, в теплые сезоны наблюдается его существенная зависимость особенно для надводного корабля от

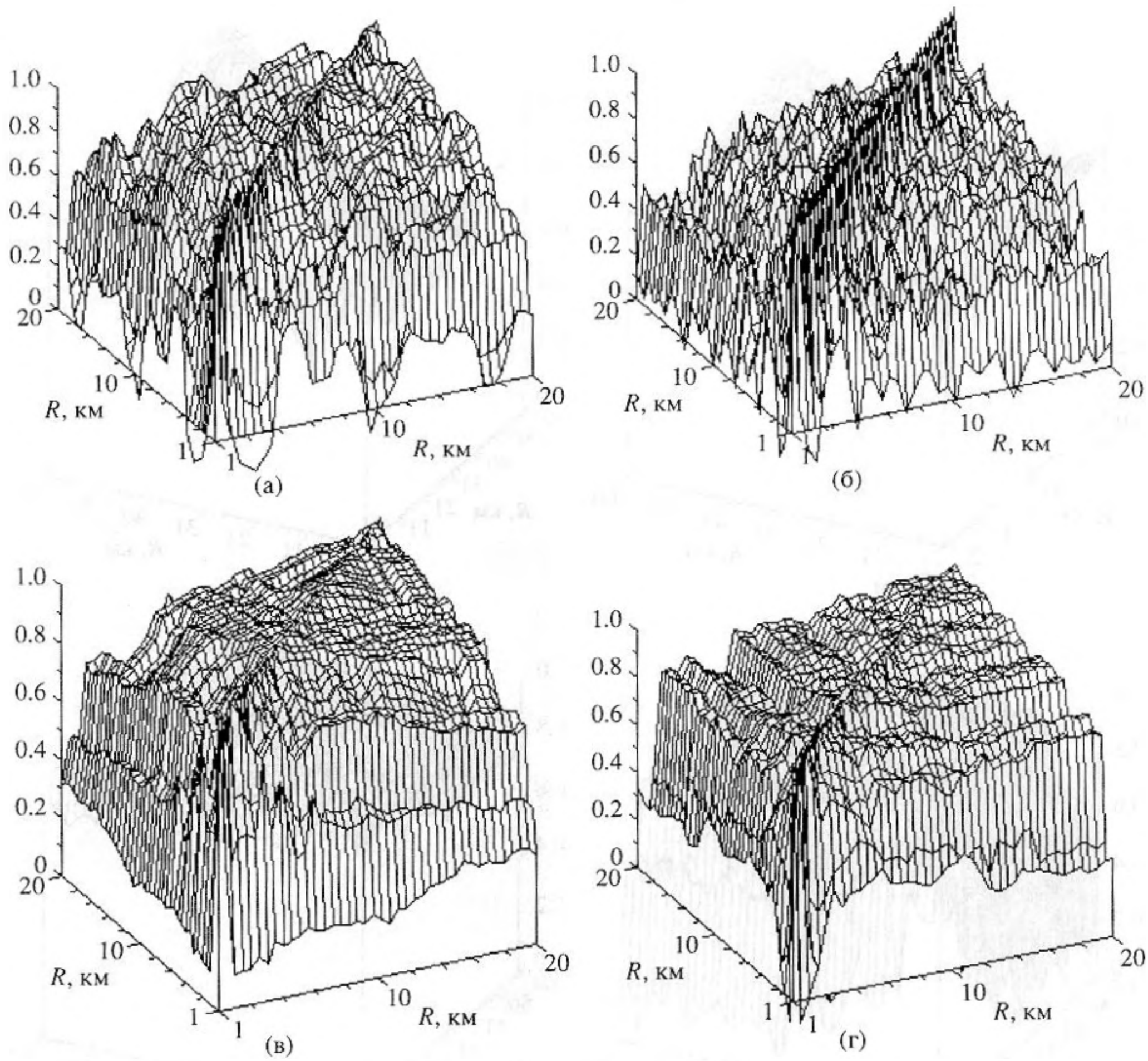

Рис. 4. Аналогичен рис. 3, но для подводной лодки.

разности дистанций до объекта (с ее увеличением коэффициент корреляции уменьшается от единицы до весьма малых значений).

Описанный подход к статистическому описанию канала распространения сигнала в интересах синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю, по мнению авторов, является конструктивным и может быть развит применительно к более сложным средствам подводного наблюдения, измеряющим большее число параметров сигнала и оперативно контролирующим текущие гидроакустические условия в районе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машошин А.И.* Особенности синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 396–400.
2. *Чернов Л.А.* Волны в случайно-неоднородных средах. М.: Наука, 1975. 168 с.
3. Распространение звука во флуктуирующем океане. Пер. с англ. Под ред. С. Флатте. М.: Мир, 1982. 336 с.
4. *Сухаревский Ю.М.* Статистика основных акустических параметров глубоководных районов океана и вероятностная дальность действия гидроакустических систем // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 5. С. 848–864.
5. *Richardson M., Nolte L.W.* A posteriori probability source localization in an uncertain sound speed, deep ocean environment // J. Acoust. Soc. Amer. 1991. V. 89. P. 2280–2284.

6. *Wazenski M., Alexandrou D.* Active, wideband detection and localization in an uncertain multipath environment // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 4. P. 1961–1970.

7. *Hayward T.J.* Classification by multiple-resolution statistical analysis with application to automated recognition of marine mammal sounds // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 3. P. 1516–1526.

8. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988.

9. *Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф.* Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1976.

10. Океаническая акустика // Сб. науч. трудов. Комиссия по изучению Мирового океана. М.: Наука, 1993. 272 с.

11. *Завадский В.Ю.* Метод конечных разностей в волновых задачах акустики. М.: Наука, 1982. 270 с.

12. Распространение волн и подводная акустика / Под ред. Дж.Б. Келлера и Дж.С. Пападакиса. М.: Мир, 1980. 230 с.

13. *Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др.* Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 552 с.

14. Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974.

Statistical Description of a Signal Propagation Channel with Application to Hydroacoustic Classification

S. K. Kadashnikov and A. I. Mashoshin

An approach is set out for statistical description of a signal propagation channel with a view to synthesizing algorithms for classifying underwater objects on the basis of their underwater acoustic field. The presentation is exemplified by calculations of the joint conditional probability density function of the normalized signal power at the output of the receiving channel for a shallow coastal region and every season of the year, depending on the class of objects and prevailing observation conditions.