

УДК 534.24:551.83

ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ДНА ОКЕАНА И НЕОБХОДИМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИСХОДНЫМ ДАННЫМ

© 2001 г. В. И. Воловов, С. А. Владимиров, В. И. Гельфгат,
А. И. Говоров, В. С. Гостев, Л. Н. Носова

Акустический институт им. Н.Н.Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 22.12.99 г.

Рассматриваются объем и детальность исходной информации применительно к новому методу картографирования дна океана, основанному на использовании тонкой пространственной структуры акустического поля, отраженного от дна при нормальном падении. Оценены искажения картографического материала, получаемого с помощью плоской многоэлементной приемной антенны, вызванные недостаточной подробностью данных из-за дискретности отсчетов регистрируемого параметра (амплитуды отраженного сигнала). Определены соотношения между количеством приемников, расстоянием между ними, апертурой приемной антенны и горизонтальным радиусом корреляции поля. Задача решается методом компьютерного моделирования с учетом обобщенных количественных данных, полученных в натуральных условиях глубокого океана.

Известно, что в горизонтальной плоскости изменчивость акустического поля, отраженного от дна глубокого океана при нормальном падении, характеризуется тремя пространственными масштабами. Экспериментально показано, что для каждого из этих масштабов отраженное поле можно картографировать, т.е. представлять его характеристики (например, амплитуду) в виде двухкоординатной функции в неподвижной относительной или (в случае соответствующей привязки) в географической системе координат [1–5]. Факт возможности такого картографирования особенно для наиболее “высокочастотного” масштаба изменчивости отраженного поля весьма важен, поскольку открывает новые возможности для решения ряда важных практических задач, в частности, для автономного определения параметров собственного движения над- и подводных плавсредств относительно дна, а также других навигационных задач. Принцип решения этих задач отличается от традиционных [5–7] и, по-видимому, является наиболее перспективным [2–4]. Однако возможность и качество их решения напрямую связано с временной стабильностью получаемого картографического материала, т.е. с его устойчивостью к влиянию реально существующих возмущающих факторов, изменяющихся на временном интервале, необходимом для решения той или иной конкретной задачи. Эти интервалы в реальных условиях изменяются в широких пределах от величины порядка секунд до величин, ха-

рактеризующих сезонную изменчивость гидрологической обстановки.

В работе [8] было подробно рассмотрено влияние на устойчивость предлагаемых акустических карт гидрологических возмущающих факторов, таких как мелкомасштабные турбулентные неоднородности океанской толщи, тонкоструктурные неоднородности, линзы и генеральное изменение профиля скорости звука. Рассмотрение было проведено применительно к наиболее “высокочастотному” (порядка длины волны излучения) масштабу изменчивости отраженного поля, образующему его тонкую пространственную структуру, поскольку она имеет фазовую природу и в максимальной степени подвержена влиянию возмущающих факторов [2, 8]. В [8] было показано, какими факторами и в каких случаях можно пренебречь, а когда для решения практических задач необходимы предварительные оценки.

Однако в реальных условиях гидрологические факторы не являются единственными, влияющими на качество получаемого картографического материала, и наряду с ними значительную роль могут играть возмущающие факторы технико-методического характера. Рассмотрим влияние на получаемые результаты подробностей исходного материала, используемого при построении карт. Рассмотрение, как и было оговорено, проводится нами применительно к тонкой пространственной структуре отраженного поля с применением методов компьютерного моделирования и с использованием имеющихся обобщенных дан-

ных, полученных нами в натуральных условиях в ходе многолетних систематических исследований отражения звука от дна океана [2].

Как известно, наиболее эффективным методом получения информации о тонкой пространственной структуре отраженного от дна поля в условиях глубокого океана является использование многоэлементных горизонтально расположенных приемных антенн. Информация в этом случае воспринимается конечным числом дискретных звукоприемников, расположенных в пределах апертуры антенны, при отдельном и независимом приеме отраженного сигнала на каждый из них, и тогда предоставляется возможность с использованием чисто вычислительных процедур построить карту рассматриваемого параметра в координатах, например, взаимно перпендикулярных сторон антенны. Переход от дискретных отсчетов к изолиниям осуществляется с использованием пакета стандартных программ. Используя совокупность данных, полученных при горизонтальном смещении антенны и при условии перекрытия апертуры в разных реализациях, картографический материал может быть собран на площади, существенно превышающей площадь апертуры, что показано в работе [4] в системе координат, жестко связанной с дном. Следует заметить, что в настоящее время прием отраженных (рассеянных) от дна сигналов в самых различных целях и с разной системой обработки признан наиболее целесообразным при использовании именно пространственно разнесенных приемных антенн [2, 4, 9, 10].

При определении необходимой подробности исходного материала совершенно очевидно, что дискретность точек приема, т.е. расстояние между соседними точками приема, должно быть достаточно мало, во всяком случае, меньше горизонтального радиуса корреляции отраженного сигнала. С другой стороны, чем ближе расположены точки приема, тем лучше для точности построения карты, однако, начиная с некоторого значения, получаемая информация становится избыточной при резком увеличении технических сложностей проведения измерений и стоимости технических средств, реализующих рассматриваемый метод картографирования дна.

Задача определения влияния дискретности точек приема на качество получаемого картографического материала наиболее эффективно может быть решена методами компьютерного моделирования. Это обусловлено тем, что в экспериментах приемная антенна представляет собой жесткую конструкцию с фиксированными точками приема [2–4], и единственная экспериментальная возможность изменения дискретности приема информации в этом случае при сохранении апертуры заключается в кратном умень-

шении числа приемников по сторонам антенны, что не позволяет произвести достаточно подробный и тщательный анализ существующих закономерностей. Моделирование позволяет избежать любых ограничений такого рода, что требует, однако, решения следующих частных задач:

- получение конкретных числовых реализаций распределения амплитуды отраженного сигнала по апертуре антенны при произвольной дискретности приемников в прямоугольной системе координат, образованной сторонами антенны, и при произвольном отношении радиуса корреляции амплитуды отраженного поля к дискретности расположения приемников ρ/d ;

- обеспечение соответствия полученных реализаций обобщенным экспериментальным данным (законы Рэлея или Райса для плотности вероятности значений амплитуды и гауссова функция автокорреляции амплитуды [2]) с заданными соотношениями радиуса корреляции к минимальному расстоянию между приемниками ρ/d с контролем соответствия полученных числовых массивов их заданным характеристикам;

- вычисление и воспроизведение изолиний измеряемого параметра (амплитуды) при произвольном их количестве и “шаге” между ними;

- выбор количественного критерия, характеризующего степень деформации карты при изменении числа приемников;

- выбор нужных соотношений между параметрами прямоугольной антенны: габариты (апертура) – число приемников – радиус корреляции отраженного сигнала.

Задачи по первым трем пунктам решались с использованием пакета стандартных программ, однако переход к произвольному числу приемников потребовал модификации стандартных программ с использованием существующих методов интерполяции.

На рис. 1 представлены карты одной и той же смоделированной численной реализации амплитуды отраженного сигнала при различном числе точек приема в пределах апертуры квадратной антенны, т.е. при различной дискретности точек приема. В качестве основы для моделирования (рис. 1а) была взята ситуация, характерная для глубокого океана и системы “Гранат” (число приемников 16×16 ; габариты антенны 4.2×4.2 м; частота 10.0 кГц) [2, 3] при трехкратном превышении отношения радиуса корреляции ρ амплитуды отраженного сигнала к расстоянию между ближайшими приемниками d . Изолинии представлены в относительных единицах, одинаковых для представленных случаев с шагом 10 относительных единиц. Изолинии пронумерованы в соответствии с возрастанием относительной амплитуды. Заметим, что при компьютерном моделировании рассматриваемой задачи ρ и ρ/d определяются

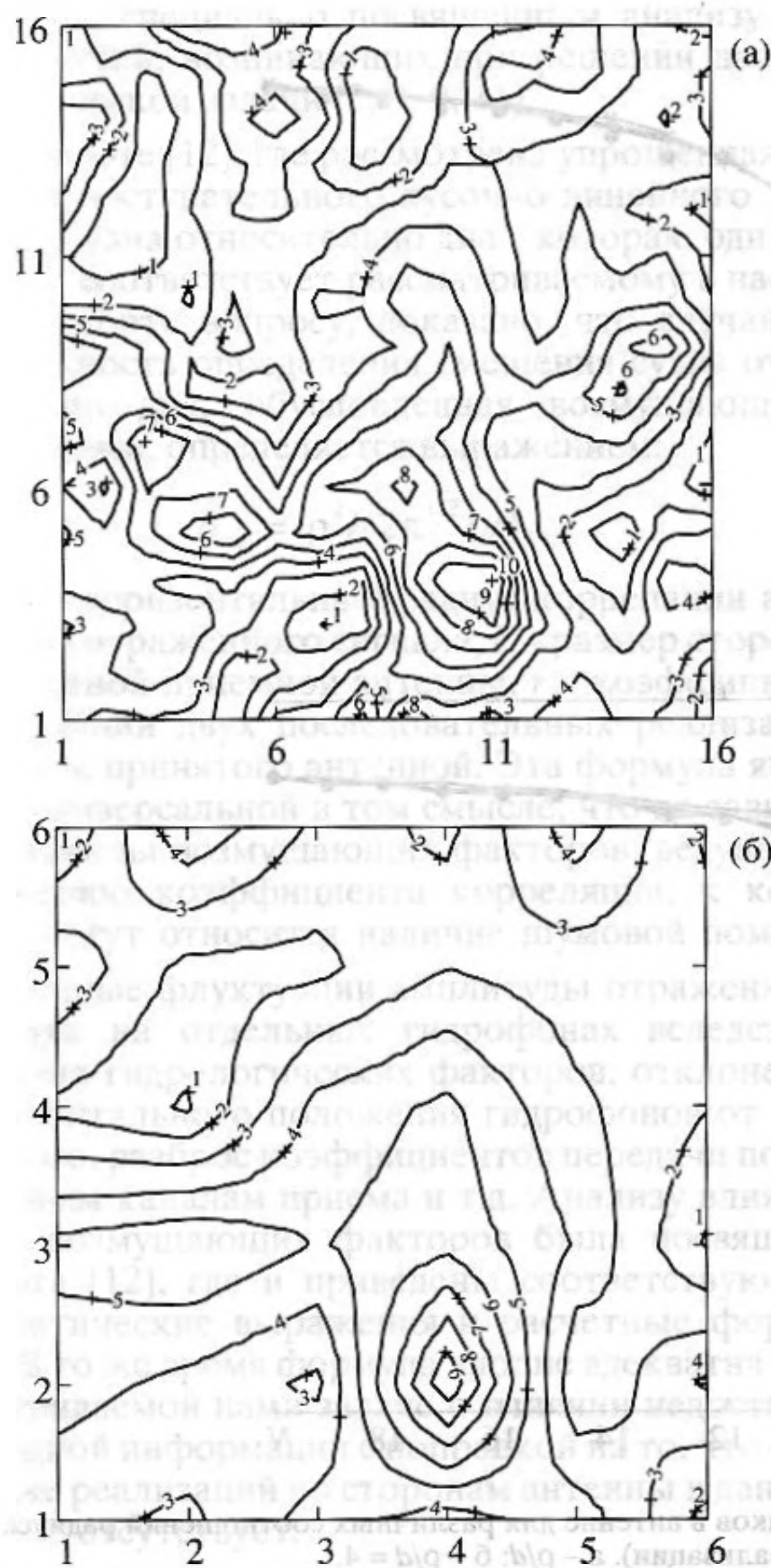


Рис. 1. Распределение амплитуды отраженного сигнала в пределах апертуры антенны при различном количестве точек приема. а – 16×16 ; б – 6×6 .

степенью фильтрации исходного поля, которое изначально задается в виде некоррелированного белого шума с нормальным распределением мгновенных значений и релейевским распределением значений огибающей.

Из представленных данных видно, что при увеличении дискретности точек приема полученная картина, сохраняя общие черты, деформируется, число изолиний уменьшается, а их форма искажается, т.е. качество получаемого картографического материала снижается. Это, однако, зависит не только от числа приемников, но и от характера воспроизводимой поверхности, поскольку плавные поверхности могут быть удовлетворительно воспроизведены меньшим числом точек, чем бо-

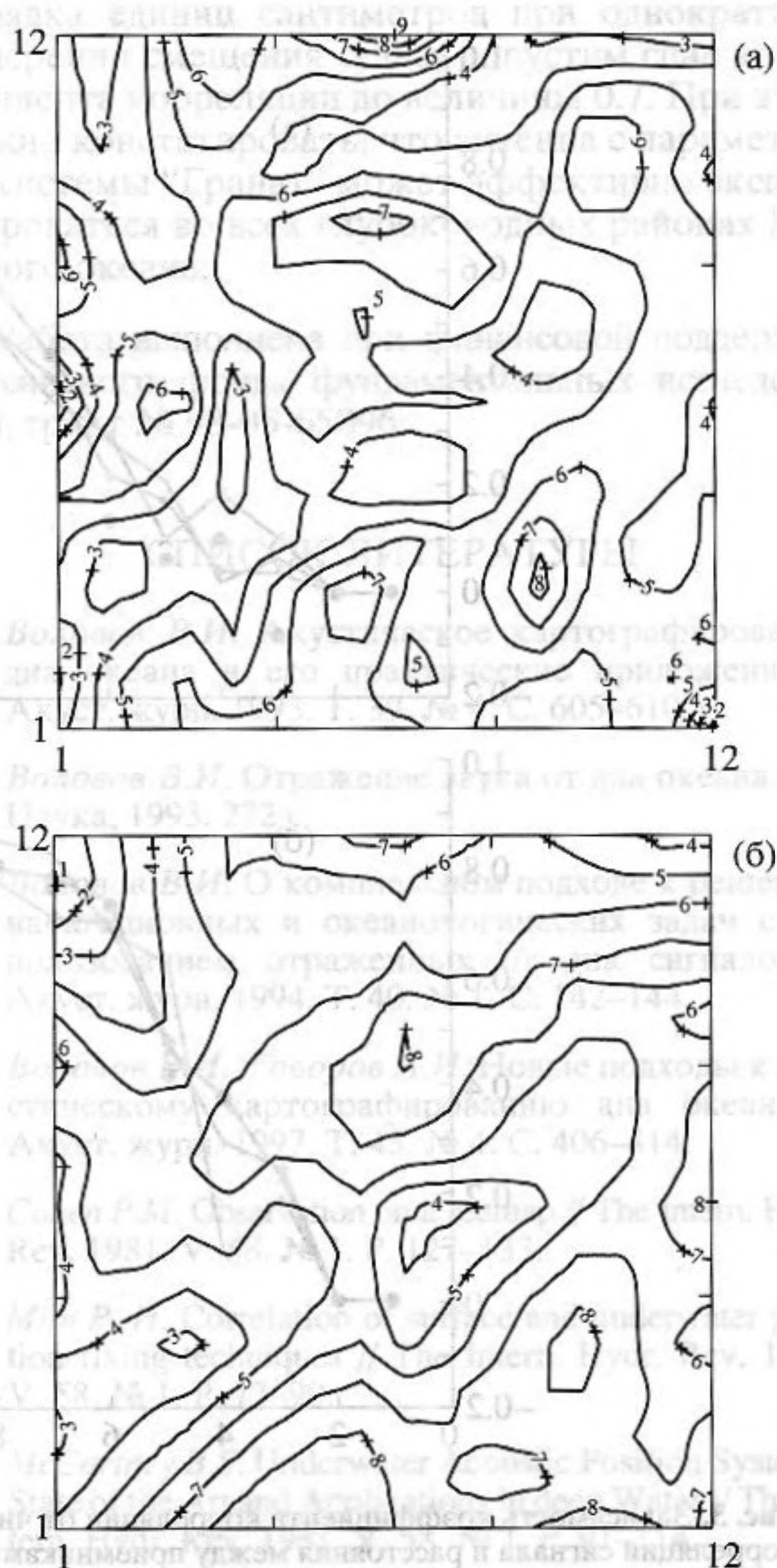


Рис. 2. Распределение амплитуды отраженного сигнала в пределах апертуры приемной антенны при фиксированном числе приемников (12×12) и при разной степени фильтрации исходного сигнала. а – $\rho/d = 2$; б – $\rho/d = 4$.

лее сложные, что в нашем модельном эксперименте определяется полосой фильтрации генерируемого процесса или соотношением радиуса корреляции полученной реализации к минимальному расстоянию между гидрофонами.

На рис. 2 представлены карты, построенные для фиксированного числа приемников в антенне (12×12), но при разном отношении ρ к d . Данные иллюстрируют практически очевидную тенденцию, заключающуюся в том, что при увеличении радиуса корреляции структура карты упрощается, а затем, как показывают расчеты при больших значениях радиуса корреляции, перестает зависеть от него. Это свидетельствует о том, что возможность увеличения точности построения

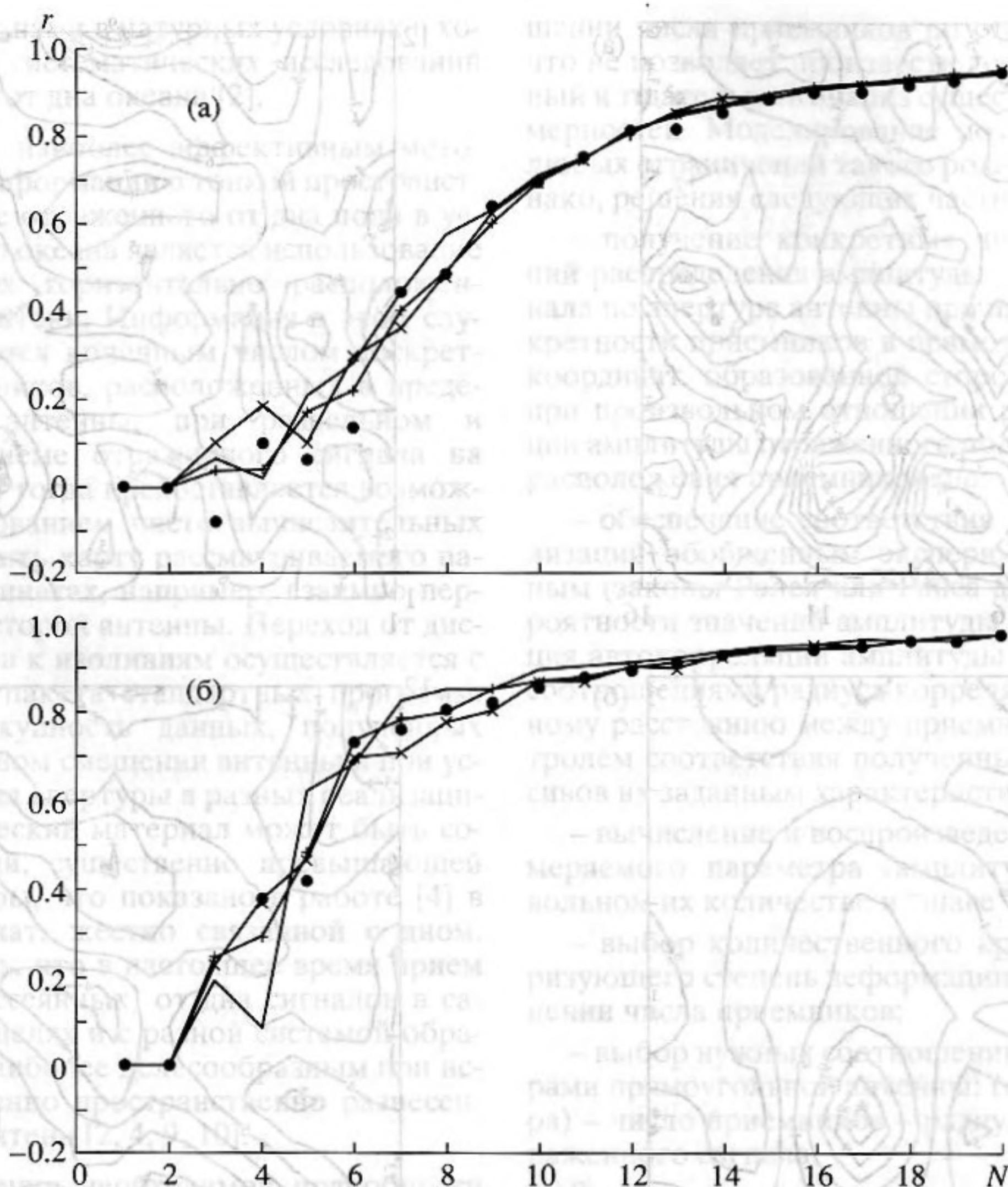


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции от числа приемников в антенне для различных соотношений радиуса корреляции сигнала и расстояния между приемниками (разные реализации). а – ρ/d ; б – $\rho/d = 4$.

карты при данном числе приемников и габаритах антенны полностью исчерпана.

В связи с изложенным возникает вопрос о количественном критерии корректности получаемого картографического материала при изменении числа приемников на апертуре антенны. Таким критерием естественно выбрать коэффициент корреляции между исходными центрированными значениями амплитуды (16×16) и теми, которые формируются в тех же точках при уменьшенном числе приемников.

На рис. 3 представлена зависимость полученного таким образом коэффициента корреляции от количества приемников на каждой стороне антенны. Данные приведены для нескольких численных реализаций, удовлетворяющих упомянутым средним характеристикам, чтобы проиллюстрировать характерный статистический разброс выбранного критерия. Как видно, этот разброс невелик, что

свидетельствует о достаточной представительности выбранных реализаций. Ход зависимости вполне объясним: при увеличении числа приемников коэффициент корреляции асимптотически стремится к единице (полное совпадение карт), а при их уменьшении, начиная с некоторого числа, резко падает практически до нуля (полное несовпадение изображений).

На рис. 3а и 3б графики представлены для двух разных значений отношения ρ/d . Видно, что его увеличение ведет к более медленному спаду коэффициента корреляции при большом числе приемников и к более резкому – при малом. Допустимый спад коэффициента, связанный с уменьшением числа приемников в антенне, определяется конкретной задачей, решаемой с помощью полученных карт. Если ориентироваться на задачу особо чувствительного определения смещения судна относительно дна, то следует обратиться к

работам, специально посвященным анализу погрешностей, возникающих при решении данной практической задачи [2, 3, 9, 11].

В работе [12], где рассмотрена упрощенная ситуация поступательного кусочно-линейного движения судна относительно дна¹, которая, однако, вполне соответствует рассматриваемому в настоящей работе вопросу, показано, что случайная погрешность определения смещения судна относительно дна, обусловленная возмущающими факторами, определяется выражением:

$$\delta_{\text{сл}} = \rho^2 / (2\pi^{1/2} Lr), \quad (1)$$

где ρ – горизонтальный радиус корреляции амплитуды отраженного сигнала, L – размер стороны квадратной приемной антенны, r – коэффициент корреляции двух последовательных реализаций сигнала, принятого антенной. Эта формула является универсальной в том смысле, что не зависит от природы возмущающих факторов, ведущих к снижению коэффициента корреляции, к которым могут относиться наличие шумовой помехи, временные флуктуации амплитуды отраженного сигнала на отдельных гидрофонах вследствие влияния гидрологических факторов, отклонение горизонтального положения гидрофонов от расчетного, разброс коэффициентов передачи по отдельным каналам приема и т.д. Анализ влияния этих возмущающих факторов была посвящена работа [12], где и приведены соответствующие аналитические выражения и расчетные формулы. В то же время формула вполне адекватна рассматриваемой нами задаче о влиянии недостатка исходной информации с поправкой на то, что смещение реализаций по сторонам антенны в данном случае отсутствует.

Используя введенные ранее обозначения ρ/d , $L = d(N-1)$, после несложных преобразований получаем:

$$r_{\text{мин}} = \left(\frac{\rho}{d}\right)^2 \frac{d}{2\pi^{1/2}(N-1)\delta_{\text{сл}}}. \quad (2)$$

Это выражение определяет минимально допустимую величину коэффициента корреляции, при которой обеспечивается заданная погрешность $\delta_{\text{сл}}$ измерений смещений судна относительно дна. При определении необходимой дискретности распределения приемников в антенне следует использовать совокупность графиков типа представленных на рис. 3.

Оценки показывают, что для получения приемлемых результатов в условиях глубокого океана с использованием системы “Гранат” (точность

порядка единиц сантиметров при однократном измерении смещения судна) допустим спад коэффициента корреляции до величины 0.7. При этом можно констатировать, что антенна с параметрами системы “Гранат” может эффективно эксплуатироваться во всех глубоководных районах Мирового океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 98-05-65096.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воловов В.И. Акустическое картографирование дна океана и его практические приложения // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 4. С. 605–610.
2. Воловов В.И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.
3. Воловов В.И. О комплексном подходе к решению навигационных и океанологических задач с использованием отраженных от дна сигналов // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 142–144.
4. Воловов В.И., Говоров А.И. Новые подходы к акустическому картографированию дна океана // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 4. С. 406–414.
5. Cohen P.M. Observation on a seamount // The Intern. Hydr. Rev. 1981. V. 58. № 1. P. 127–133.
6. Miln P. H. Correlation of surface and underwater position fixing techniques // The Intern. Hydr. Rev. 1981. V. 58. № 1. P. 77–90.
7. McCartney B.S. Underwater Acoustic Position Systems: State of the Art and Applications in deep Water // The Intern. Hydr. Rev. 1981. V. 58. № 1. P. 91–114.
8. Воловов В.И., Говоров А.И., Гостев В.С., Носова Л.Н. Влияние гидрологических факторов на стабильность тонкой пространственной структуры акустического поля, отраженного от дна океана // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 68–74.
9. Dickey F.R., Edward I.A. Velocity measurements using correlation sonar // IEEE Plans Position Location Navigation Symposium Record. San Diego. 1978. P. 255–271.
10. Riyait V. S., Lawlor M.A., Adams A.E., et al., A Review of the ACID Synthetic Aperture Sonar and Other Sidescan Sonar Systems // The Intern. Hydr. Rev. 1995. V. 72. № 1. P. 115–124.
11. Воловов В.И., Ключев М.С. Влияние поворота приемной антенны на точность измерения малого смещения судна акустическим методом // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 571–574.
12. Воловов В.И., Ключев М.С. Точность измерения малого смещения судна и отслеживание его траектории акустическим методом // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 72–76.

¹ Более сложный случай, когда наряду с поступательным движением судна существует и угловое перемещение антенны (рыскание судна на галсе) рассмотрен в работе [11].

Acoustical Mapping of the Ocean Bottom and the Requirements on the Initial Data

V. I. Volovov, S. A. Vladimirov, V. I. Gelfgat, A. I. Govorov, V. S. Gostev, and L. N. Nosova

The amount and degree of detailing of the initial information are analyzed as applied to the new method of the ocean bottom mapping on the basis of the fine structure of the bottom-reflected sound field at normal incidence. For the mapping data obtained with a planar multielement receiving array, the distortions caused by the insufficiently detailed information derived from the discrete measurements of the bottom-reflected amplitude are considered. The relations between the number of receivers, the receiver spacing, the array aperture, and the horizontal correlation length of the sound field are determined. The problem is solved by a computer simulation with the use of the generalized quantitative data obtained in deep-water ocean experiments.

1. Воловов В.И., Владимиров С.А., Гельгат В.И., Говоров А.И., Гостев В.С., Носова Л.Н. // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. № 4. С. 602-610.

2. Воловов В.И. Отраженные звуки от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.

3. Воловов В.И. О комплексном подходе к решению обратных задач в океанологии // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 1. С. 142-144.

4. Воловов В.И., Говоров А.И. Новые подходы к акустическому картографированию дна океана // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 4. С. 406-414.

5. Cohen P.M. Observation on a seabed // *The Intern. Hydro. Rev.* 1981. V. 28. № 1. P. 127-133.

6. Min P. H. Correlation of surface and underwater position fixing techniques // *The Intern. Hydro. Rev.* 1981. V. 28. № 1. P. 27-30.

7. McCartney B.S. Underwater Acoustic Position Systems: State of the Art and Applications in Deep Water // *The Intern. Hydro. Rev.* 1981. V. 28. № 1. P. 91-114.

8. Воловов В.И., Говоров А.И., Гостев В.С., Носова Л.Н. Влияние гидрологических факторов на точность тонкой обратносторонней структуры акустического поля, отраженного от дна океана // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 4. С. 62-74.

9. Dick F.R., Lawler J.A. Velocity measurement using correlation with planar position location navigational systems // *IEEE J. Oceanic Technol.* 1978. P. 252-271.

10. Gelfgat V.I., Vladimirov S.A., Govorov A.I., Nosova L.N. The ACIP System: A Review of the ACIP System // *The Intern. Hydro. Rev.* 1992. V. 29. № 1. P. 113-124.

11. Воловов В.И., Гостев В.С., Владимиров С.А. Обратносторонняя структура акустического поля // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 4. С. 271-274.

12. Воловов В.И., Клевко В.С. Точность измерения глубины с помощью системы // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 4. С. 23-26. Как видно из...

...т.е. ρ — горизонтальная корреляция звукового поля, Δ — размер стороны квадрата, γ — коэффициент корреляции двух последовательных измерений. Эта формула является упрощенной в том смысле, что не учитывает природы возмущающих факторов, ведущих к снижению коэффициента корреляции. В том случае, когда корреляция звукового поля обусловлена флуктуациями амплитуды отраженного сигнала на отдельных гидрологических факторов, отклонение горизонтальной поперечной структуры от расчетного, в значительной мере определяется флуктуациями амплитуды отраженного сигнала. В то же время формула вполне адекватно описывает обратную задачу о влиянии недостаточности исходной информации с погрешкой Δ , что имеет значение для определения по сторонам затенены в данном случае «отсутствует».

Используя введенные ранее обозначения $\Delta = d(N-1)$, после несложных преобразований получаем выражение для коэффициента корреляции γ в зависимости от точности измерения глубины d и количества измерений N . Это выражение определяет минимально допустимую точность измерения глубины d для заданного количества измерений N . При измерении глубины относительная погрешность измерения глубины δd определяется соотношением $\delta d = d/N$. Таким образом, для заданной относительной погрешности измерения глубины δd можно определить минимальное количество измерений N . При этом можно видеть, что для заданной относительной погрешности измерения глубины δd количество измерений N должно быть тем больше, чем больше точность измерения глубины d . Это означает, что для измерения глубины с высокой точностью необходимо большое количество измерений.