

УДК 534.21

ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТЕЙ ВРЕМЕН РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ВДОЛЬ ЛУЧЕЙ С БОРТА ДРЕЙФУЮЩЕГО СУДНА

© 1999 г. А. Л. Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин, А. А. Стромков

*Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
E-mail: viro@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 09.03.98 г.

Обсуждаются результаты обработки импульсных звуковых сигналов, зарегистрированных с борта дрейфующего судна в ходе томографического эксперимента в западной части Средиземного моря. Сигналы излучались точечным источником, стационарно установленным примерно на оси подводного акустического волновода (глубина оси около 125 м). Показано, что при регистрации на одиночный гидрофон возможность разрешения во времени звуковых сигналов, пришедших в точку наблюдения по разным лучам, существенно зависит от глубины приемника. На больших глубинах удается разрешать и идентифицировать приходы сигналов по отдельным крутым лучам, в то время как на малых глубинах эту задачу удается решить лишь для их четверок. Несмотря на обусловленные дрейфом вариации дистанции, разности времен приходов сигналов, пришедших по лучам, или их четверок неплохо согласуются с результатами расчетов по лучевой программе.

Классическая схема лучевой акустической томографии океана, предложенная в известной работе Манка и Вунша [1], основана на анализе экспериментально измеряемых времен пробега звуковых сигналов по лучам (об альтернативных подходах к решению задач акустического мониторинга в океане см., например, работы [2, 3] и имеющиеся там ссылки). Эти времена будем называть просто временами приходов сигналов. Идея Манка и Вунша состоит в восстановлении температурных неоднородностей среды по измеренным вариациям времен приходов сигналов, вызванных этими неоднородностями. Одним из ключевых этапов в практической реализации данной схемы является разрешение сигналов, пришедших на приемник по разным лучам, и их идентификация. Для этой цели проводится сопоставление временной реализации принятого сигнала с результатами расчета по лучевой программе. Расчет выполняется для некоторой опорной модели волновода, построенной на основе имеющейся априорной информации. Опорный волновод заведомо отличается от реального – в противном случае вообще не было бы необходимости решать обратную задачу. В этих условиях идентификация сигналов возможна, когда восстанавливаемые неоднородности среды приводят лишь к сравнительно небольшим вариациям их времен приходов.

Возможность практического решения задач разрешения и идентификации неоднократно демонстрировалась в экспериментах на стационарных акустических трассах (см., например, [4–6]). Гораздо хуже этот вопрос изучен применительно

к ситуации, когда прием и/или излучение ведется с борта дрейфующего судна. В нашей работе приведены результаты исследования возможности разрешения и идентификации сигналов по экспериментальным данным, полученным летом 1994 года в Средиземном море: с борта НИС “Академик Сергей Вавилов” регистрировались сигналы от стационарных источников, работавших по программе международного томографического эксперимента THETIS-2 [7].

В ходе данного эксперимента изучались фазоманипулированные импульсы (ФМИ) с манипуляцией фазы по псевдослучайному закону. Ниже представлены результаты обработки принятых сигналов от одного из источников, работавшего на несущей частоте 400 Гц. Модулирующая фазу псевдослучайная последовательность имела длину 511 единиц (5.11 с), равных 4 периодам несущей частоты (0.01 с). Несколько раз в сутки излучались серии из 40 одинаковых импульсов. Суммарная длительность каждой такой серии составляла 204.4 с.

Прием велся одновременно, как на опущенную с борта дрейфующего судна вертикальную цепочку ненаправленных гидрофонов, перекрывающую диапазон глубин от поверхности до 127.5 м (расстояние между соседними гидрофонами около 8.5 м), так и на одиночный гидрофон, опущенный на глубину 300 м.

В процессе обработки проводилось сжатие принятых сигналов путем их корреляции с копией первоначально излученного импульса (ФМИ). Идея этой стандартной процедуры, которая так-

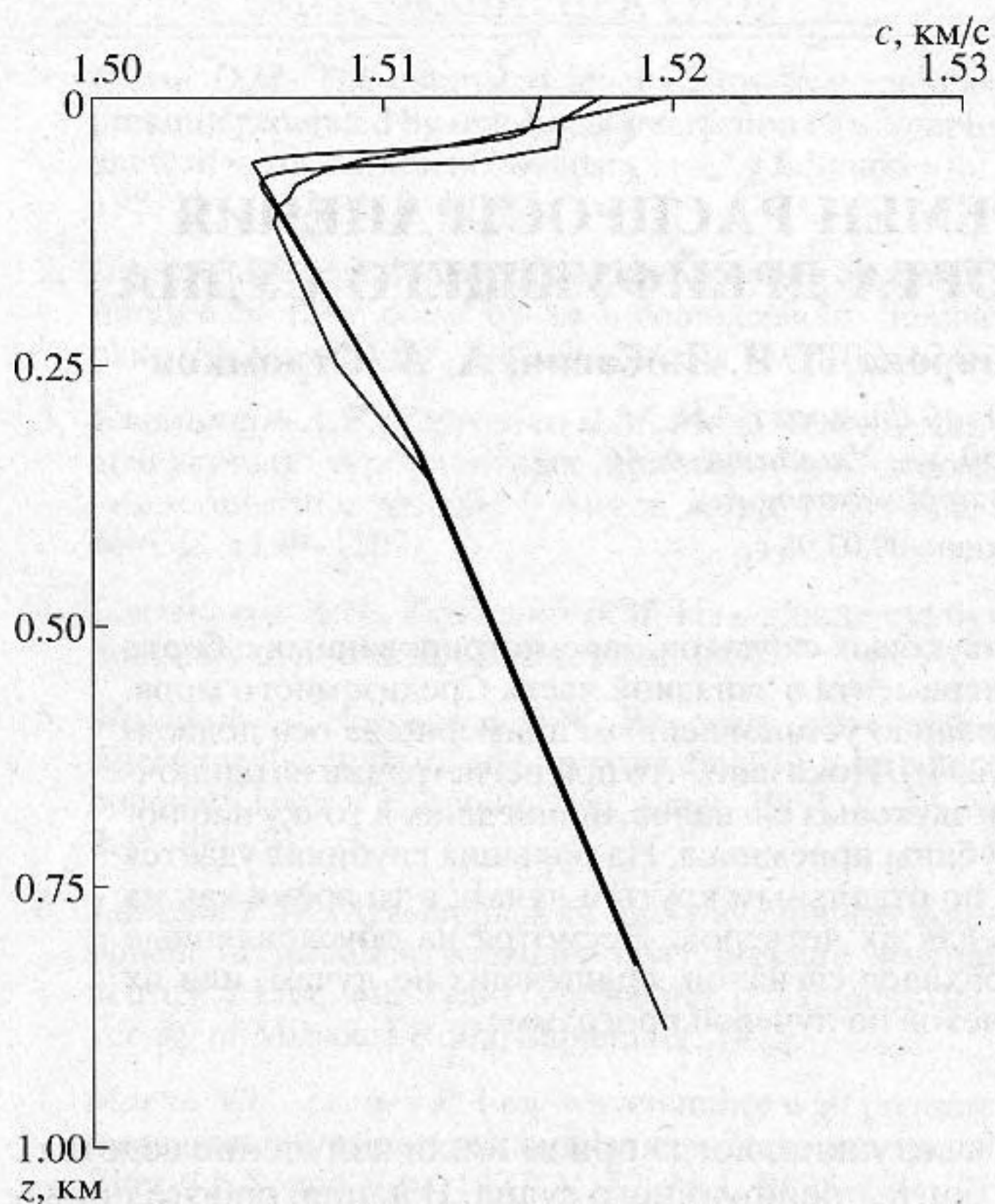


Рис. 1. Типичные профили скорости звука.

же называется согласованной фильтрацией, основана на том, что эффективная ширина функции автокорреляции излученного импульса равна длительности единицы моделирующей фазу псевдослучайной последовательности (в нашем случае 0.01 с). Поэтому, в силу линейности задачи сжатый сигнал эквивалентен тому, который был бы принят после излучения короткого импульса, имеющего форму функции автокорреляции реально излученного сигнала. Таким образом, на выходе коррелятора получалась последовательность импульсов, временное распределение которых соответствует распределению времен приходов короткого импульсного сигнала, пришедшего по разным лучам. Распределение времен приходов такого сигнала и параметры излученных ФМИ таковы, что они могут разрешаться либо полностью, либо частично, либо вообще не разрешаться.

По данным гидрологических измерений, проведенных одновременно с акустическими, подводный волновод был подповерхностным на всей исследуемой акватории. Источник звука располагался чуть ниже оси звукового канала на глубине $z = 150$ м. Прием выполнялся на нескольких станциях, удаленных от источника на расстояния от 80 до 300 км и расположенных примерно на одной прямой (проходящей через источник). На тех

же станциях снимались вертикальные профили скорости звука, три из которых представлены на рис. 1. При численном расчете времен приходов сигналов, необходимом для решения задачи идентификации, мы пользовались плоскостой моделью опорного волновода. Численное моделирование показало, что вариации профиля скорости звука по трассе в показанных на рис. 1 пределах оказываются достаточно малыми в том смысле, что вызванные ими вариации времен приходов сигналов не затрудняют идентификацию последних. В каждом из проводимых ниже сопоставлений теории с экспериментом параметры лучей рассчитывались в рамках модели плоскостойкого волновода с профилем скорости звука, совпадающим с измеренным в месте приема.

Как показывают и аналитические оценки, и данные численного моделирования, на приемный гидрофон сначала приходят сигналы, прошедшие по наиболее крутым лучам, а потом – по более пологим траекториям. Гидрологические условия, наблюдавшиеся во время эксперимента, были таковы, что при излучении источником короткого импульса в сигнале с приемника, расположенного вблизи оси волновода, сначала наблюдаются разрешившиеся и частично разрешившиеся сигналы, пришедшие по крутым лучам, а затем большой пик, формируемый вкладами множества неразрешившихся сигналов, пришедших по приосевым лучам. Часть принятого сигнала, формируемая вкладами сигналов, пришедших по крутым лучам, обычно содержит пики, отвечающие либо приходам отдельных сигналов, либо их четверок. Лучи, образующие каждую такую четверку, имеют близкие горизонты заворота (число нижних точек заворота у всех лучей из одной четверки одинаково), но различаются наборами знаков углов выходов из источника и приходов в приемник [8].

Алгоритм обработки, в основном, не отличался от традиционно применяемых при анализе данных, полученных на стационарных трассах с использованием сложных сигналов, за исключением необходимости компенсации искажений принятого сигнала, обусловленных дрейфом судна. Свободный дрейф НИС приводил к изменению его временного масштаба, вызванному доплеровским смещением несущей частоты. Поскольку углы приходов лучей лежали в небольшом (от -12° до 12°) диапазоне, учет проекции скорости дрейфа на направление прихода луча, соответствующего разрешаемому сигналу, не проводился.

Компонента скорости дрейфа в направлении на источник оценивалась различными методами – от оценки по данным корабельной навигационной системы до измерения периода следования импульсов по автокорреляционной функции. В основном использовался метод, основанный на вычислении взаимно корреляционных функций каждого сигнала

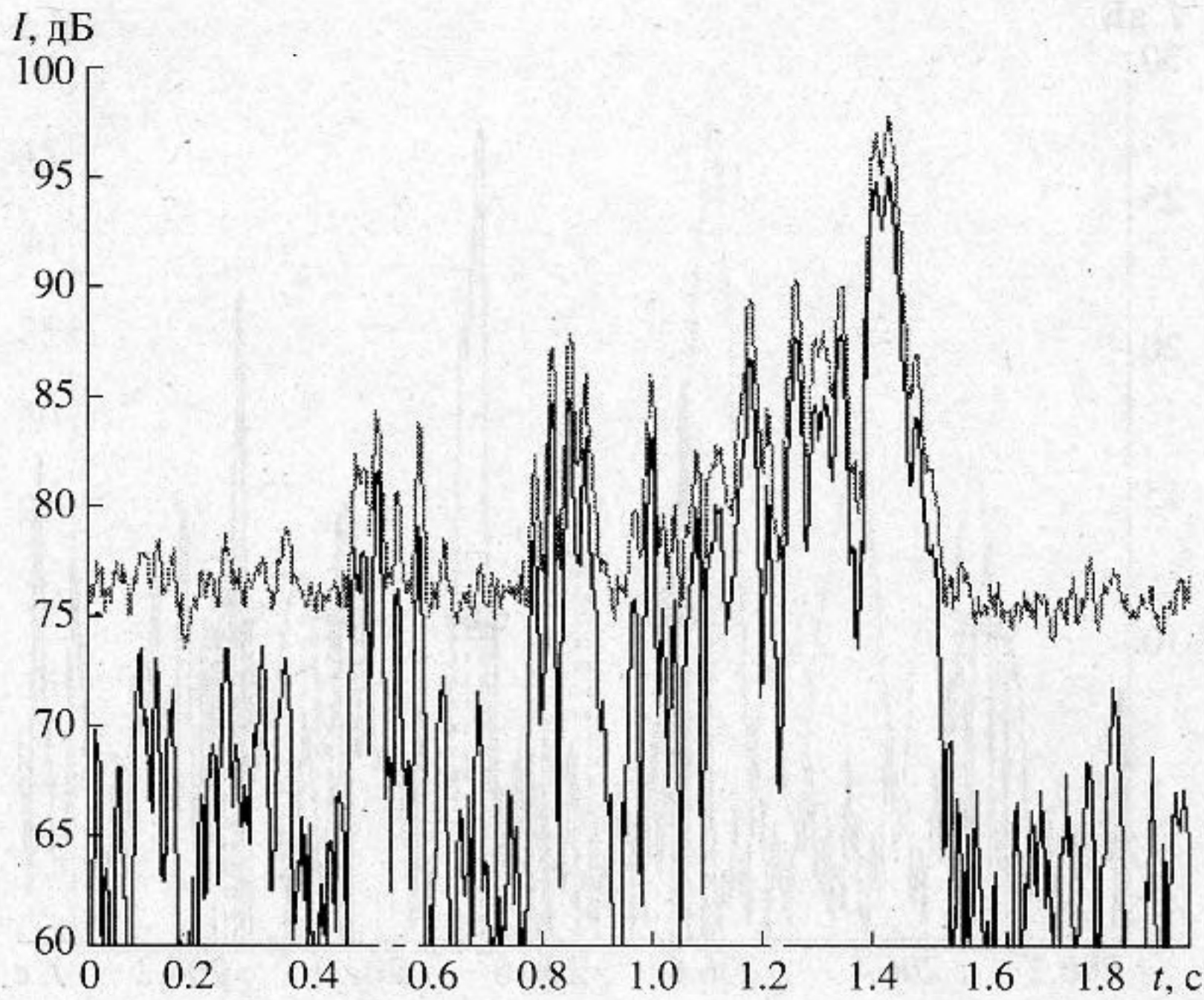


Рис. 2. Результаты когерентного (верхняя кривая) и некогерентного (нижняя кривая) усреднения по серии из 40 сжатых импульсов.

ла из серии, принятого на приосевой гидрофон, с набором копий излучаемых импульсов, трансформированных соответственно разным допустимым доплеровским скоростям. В качестве оценки скорости дрейфа принималось значение, отвечающее той копии, для которой амплитуда “реперного” импульса на выходе коррелятора была максимальной. В качестве этого “реперного” импульса мог выбираться пик, соответствующий любому пришедшему по лучу сигналу, хорошо выделившемуся из шума. Для реализации автоматической пакетной обработки “реперным” считался пик, формируемый неразрешаемыми сигналами, пришедшими по приосевым лучам. Вследствие интерференции сигналов, формирующих этот пик, величина данного максимума может флуктуировать. Однако, как свидетельствуют экспериментальные данные, эта интерференция не приводила к значимому отклонению измеренных значений скорости от значений, полученных по разрешившимся сигналам. Полученные таким образом оценки скорости дрейфа использовались для компенсации доплеровских искажений при обработке сигналов, принятых всеми гидрофонами цепочки.

На рис. 2 приведены результаты накопления 40 сжатых сигналов, входящих в одну и ту же серию. Показаны зависимости интенсивности накопленного сигнала от времени. Здесь под сжатым сигналом мы понимаем результат свертки (вычисления взаимно корреляционной функции) принятого сигнала с копией излучаемого ФМИ импульса, трансформированного согласно изме-

ренной скорости. Более темная кривая, идущая ниже, получена путем суммирования комплексных огибающих сжатых сигналов, а другая кривая – путем суммирования их интенсивностей. Как видим, амплитуды максимумов в обоих случаях меняются мало, в то время как уровень шумов при когерентном усреднении, как и следовало ожидать, сильно “проседает”. Действительно,

результат когерентного $s_c = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n(t) \right|^2$ и некогерентного $s_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n(t)|^2$ сложения пол-

ностью совпадают при компенсации доплеровского сдвига для детерминированного импульса. В то же время, для шума с $\langle x_n(t)^2 \rangle = \xi$ оценки интенсивности имеют вид: $s_c \sim \xi/N$, $s_i \sim \xi$ соответственно и показывают, что уровень шума при когерентном суммировании ниже, чем при некогерентном. Таким образом, тот факт, что и то, и другое суммирование дают примерно одинаковую величину максимумов сигнала, свидетельствует, что на протяжении одной серии (204.4 с) корреляция между различными ФМИ высока, и метод компенсации эффектов, обусловленных нестационарностью приема, является вполне эффективным. Такая компенсация позволяет обеспечить практически когерентное накопление на интервале длительности сигнала не менее 200 с при условии компенсации доплеровских искажений.

Дополнительной трудностью, возникающей вследствие дрейфа судна при измерении времен

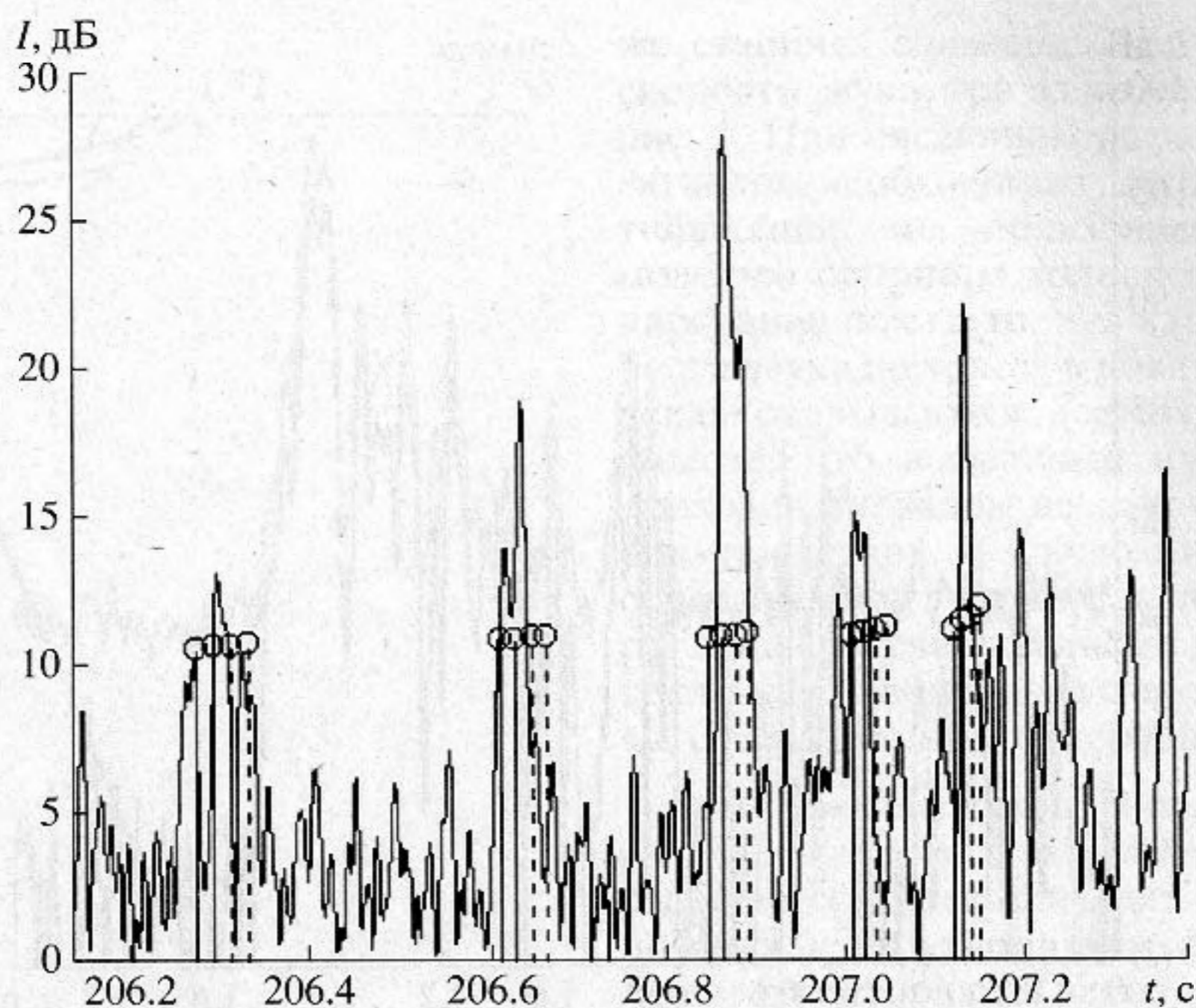


Рис. 3. Разрешение четверок сигналов, пришедших по крутым лучам, на дистанции 312 км. Глубина приема 80 м.

приходов сигналов, является неточность в определении координат приемного гидрофона. Ошибка в определении горизонтальных координат приемника в данном эксперименте составляла около 100 м. Вследствие неравномерного дрейфа наклон троса, на котором были закреплены гидрофоны, также сильно изменялся и неконтролируемые изменения глубин гидрофонов за счет этого эффекта, а также вследствие качки судна, по нашим оценкам достигали 10 м.

Такие неточности в определении координат приводят к ошибкам в измерении времен приходов сигналов, достигающим десятков мс. Эта величина сопоставима с типичной временной задержкой между приходами двух последовательных (лучше всего разрешаемых) четверок сигналов, распространяющихся по наиболее крутым лучам в данном волноводе. К счастью, как показывают оценки (простые формулы для оценок даны в [9]) и численные расчеты, разности времен приходов сигналов гораздо более устойчивы к вариациям положения приемника: как правило, они не превышают 0.1–1 мс. По этой причине сравнение теории и эксперимента на представленных ниже графиках выполнялось путем сдвига всех рассчитанных времен приходов сигналов на одну и ту же величину для их наилучшего совпадения с пиками принятого импульса (разумеется, после сжатия последнего). Это означает, что при сравнении теории с экспериментом фактически сопоставлялись не времена приходов сигналов, а их разности.

На рис. 3–5 приведены примеры огибающих когерентно накопленных сжатых импульсов, принятых на один из гидрофонов с разных дистанций. Показаны зависимости интенсивности сигнала от времени. На тех же рисунках вертикальными столбиками указаны результаты численных расчетов времен приходов сигналов. Сплошные столбики отвечают лучам, вышедшим из источника вверх, а штриховые — лучам, вышедшим из источника вниз. Высота каждого столбика показывает интенсивность соответствующего сигнала, рассчитанную по формулам геометрической оптики в опорном волноводе.

На рис. 3 (расстояние от источника до приемника 312 км) представлена ситуация, когда отдельные сигналы, пришедшие по лучам, не разрешаются, но удается надежно идентифицировать их четверки. На рис. 4 (дистанция порядка 83 км) удается идентифицировать пары сигналов. Глубина приемника в обоих случаях 80 м.

На рис. 5 (дистанция 197 км, глубина приемника 300 м) проиллюстрировано разделение по времени и идентификация отдельных сигналов. Здесь удается разрешить приходы первых (приходящих раньше других) восьми.

Следует отметить, что теоретически рассчитывались и сопоставлялись с экспериментальными данными лишь времена приходов сигналов, распространяющихся по лучам, не касающимся дна. Дело в том, что имеющаяся информация о дне (глубина и наклон в точке отражения) не позволяет рассчитать с необходимой точностью вре-

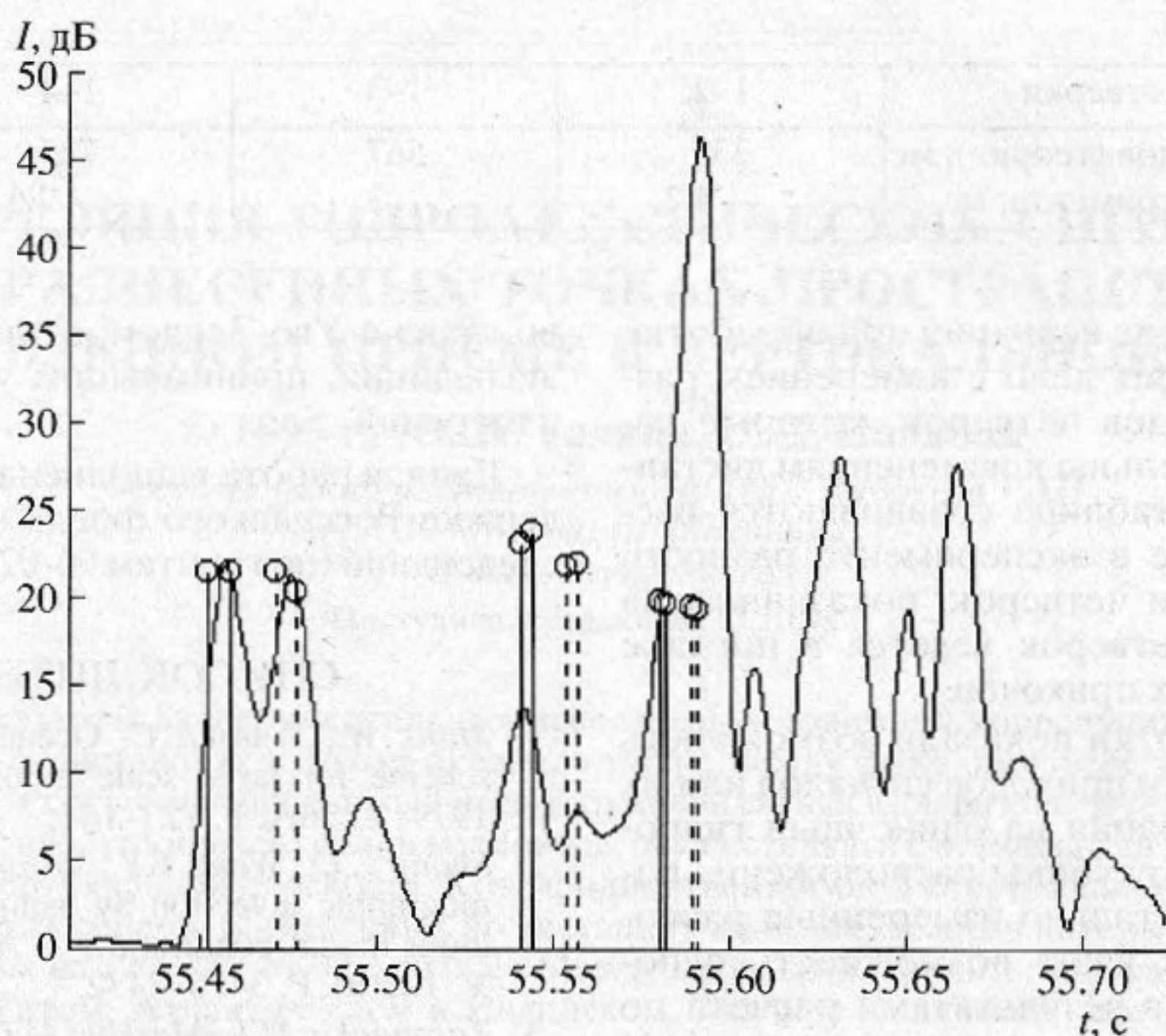


Рис. 4. Разрешение пар сигналов, пришедших по крутым лучам, на дистанции 83 км. Глубина приема 80 м.

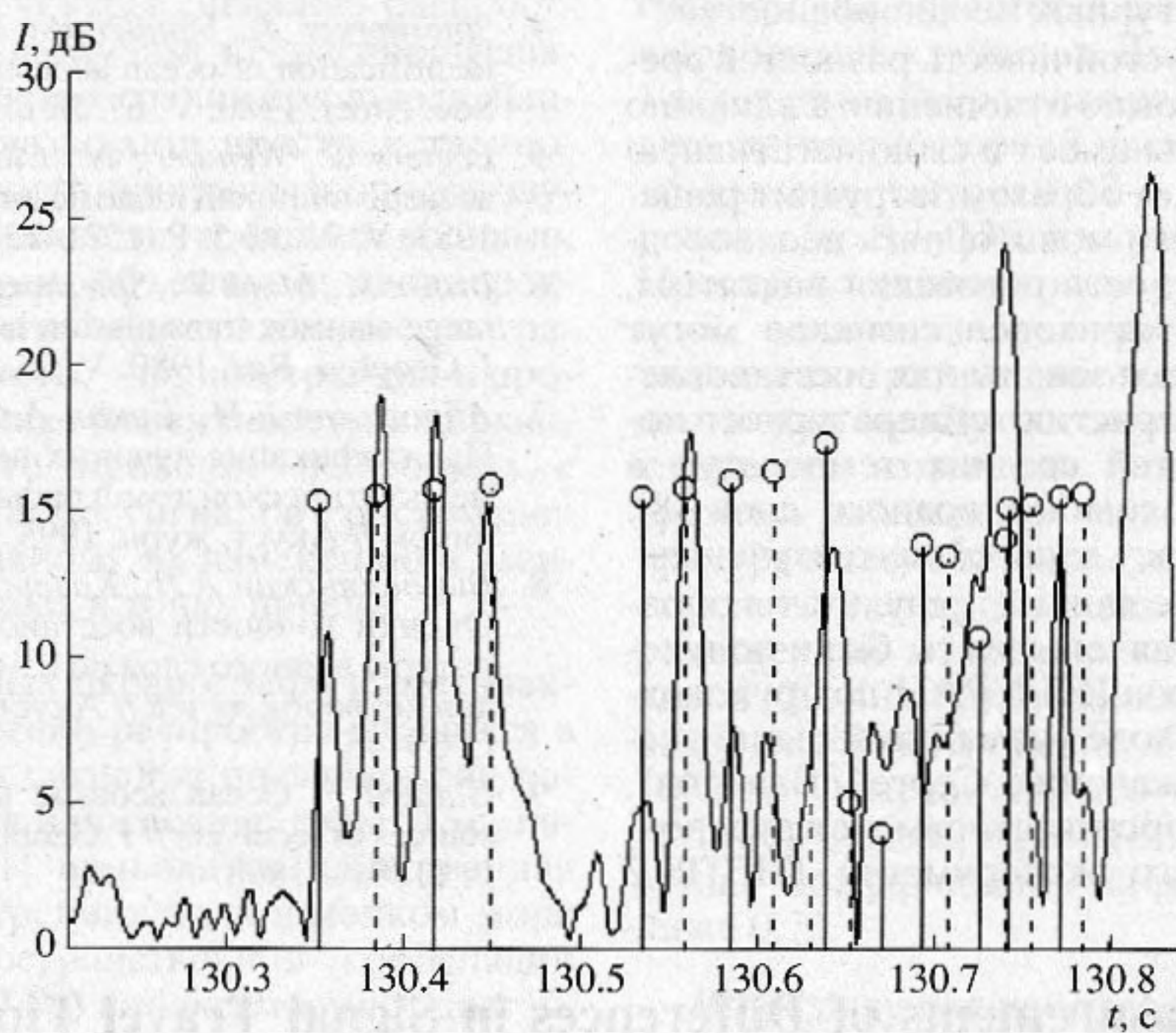


Рис. 5. Разрешение сигналов, пришедших по крутым лучам, на глубоком гидрофоне (глубина 300 м). Дистанция 197 км.

мена приходов сигналов, прошедших по отраженным от дна лучам.

Как видим, при регистрации сигналов на одиночный гидрофон на небольших глубинах отдельные сигналы, пришедшие по лучам, не разрешаются, но зато надежно разрешаются приходы их четверок. Времена их приходов могут быть ис-

пользованы в качестве входных параметров при решении обратных задач [8].

Время прихода четверки можно определить как "центр тяжести" пика, образованного вкладками сигналов, пришедших по составляющим ее лучам. Как уже отмечено выше, из-за дрейфа судна возникает серьезная проблема точного определе-

Таблица

Сравниваемые четверки	1-2	1-3	1-4	1-5
Разности времен приходов (теория), мс	337	567	725	836
Отличие теории и эксперимента, мс	-4.2	3	-9.6	-1.4

ния дистанции и учета ее вариаций при обработке данных. Проще обстоит дело с измерением разностей времен приходов четверок, которые гораздо менее чувствительны к изменениям дистанции. В приведенной таблице сравниваются расчетные и измеренные в эксперименте разности времен приходов пяти четверок, показанных на рис. 3. Нумерация четверок ведется в порядке возрастания времен их приходов.

Результаты обработки показали возможность идентификации времен приходов сигналов или их четверок при регистрации на одиночный гидрофон в зависимости от глубины расположения последнего. Экспериментально измеренные разности времен приходов дают возможность однозначно соотнести их с результатами расчета по лучевой программе, что позволяет надеяться на использование их в качестве информационных параметров при решении задач акустического мониторинга температурных неоднородностей.

С другой стороны, устойчивость разностей времен приходов импульсов по отношению к влиянию неоднородностей среды имеет и свою негативную сторону: она очевидным образом затруднит решение задач акустического мониторинга неоднородностей. Тем не менее, есть основания надеяться, что разности времен приходов сигналов могут быть эффективно использованы для восстановления некоторых характеристик температурного поля, например, разностей средних температур в верхней и нижней половинах водного слоя [8]. Этот вопрос заслуживает дальнейшего изучения.

Экспериментальные данные, результаты обработки которых представлены здесь, были получены группой сотрудников ИПФ РАН под руководством А.Г. Нечаева в ходе упомянутой выше экспедиции на НИС "Академик Сергей Вавилов". Авторы благодарны организаторам международного томографического эксперимента THETIS-2

во главе с Уве Зендом, а также всем участникам экспедиции, принимавшим участие в проведении измерений.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (по грантам 96-02-19444 и 97-05-65657).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // *Deep-Sea Res.* 1979. V. 26A. P. 123-161.
2. Shang E.C., Wang Y.Y., Voronovich A.G. Nonlinear tomographic inversion by using Wentzel-Kramers-Brillouin modal condition // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 102(6). P. 3425-3432.
3. Taroudakis M.I., Markaki M.G. On the use of matched-field processing and hybrid algorithms for vertical slice tomography // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 102(2). Pt. 1. P. 885-895.
4. Spiesberger J., Spindel R., Metzger K. Stability and identification of ocean acoustic multipaths // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. V. 67. № 6. P. 2011-2017.
5. Legters G., Weinberg N., Clark J. Long-range Atlantic acoustic multipath identification // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1983. V. 73. № 5. P. 1571-1579.
6. Brown M., Munk W., Spiesberger J., Worcester P. Long-range acoustic transmission in the Northwest Atlantic // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. N. C5. P. 2699-2703.
7. Абросимов Д.И., Еркин А.Ф., Казарова А.Ю. и др. Идентификация лучевых импульсов в лучевой схеме акустической томографии с движущимся приемником // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. № 4. С. 632-635.
8. Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Любавин Л.Я. Оценки точности восстановления средней температуры водного слоя по измерениям времен приходов четверок лучей // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 1. С. 39-45.
9. Gailard F. Ocean acoustic tomography with moving sources or receivers // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. N. C6. P. 11891-11898.

Measurements of Differences in Signal Travel Times over Rays on Board of a Drifting Ship

A. L. Virovlyansky, A. Yu. Kazarova, L. Ya. Lyubavin, and A. A. Stromkov

The results of sound pulse signal processing are discussed. The signals are recorded on board of a drifting ship in the western Mediterranean, in the course of the international tomography experiment. The sound signals are generated by a stationary point source located near the underwater acoustic channel axis (at a depth of ~125 m). It is found that, in the case of reception by a single hydrophone, the resolution of signals arriving at the point of reception along different rays significantly depends on the receiver depth. At large depths, it is possible to resolve and identify the arrivals of signals along individual steep rays, while at small depths, this problem can be solved only for the quartets of such rays. In spite of the random variations in range due to the ship drift, the differences in the travel times of signals or their quartets agree well with ray calculations.