

## ДВА ФЕНОМЕНА В ОПЫТАХ ПО ЛОКАЦИИ НА ПРОСВЕТ

© 2018 г. В. А. Зверев

*Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46, Россия  
e-mail: zverev.24@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2017 г.

В результате новой обработки полученных ранее экспериментальных данных выявлены два феномена, позволившие получить необходимые и достаточные условия для выделения сигнала, лоцируемого на просвет, с наибольшей эффективностью. Объект локации должен пересекать один из лучей, соединяющих излучатель и приемник, не касающийся водной поверхности. Это служит основой первого феномена, состоящего в значительном (более 100 раз) сжатии выделяемого сигнала. Второй феномен состоит в том, что шумовой фон, окружающий выделяемый сигнал, оказался особым видом помехи, формируемой неровным рельефом дна. Эта помеха не создает ложных тревог и физически аналогична спекл-шуму в оптике. Показано, что аддитивные шумы формируются преимущественно сигналами, рассеянными взволнованной поверхностью озера, и при выделении полезного сигнала подавляются слабо, но могут быть устранены путем придания направленности источнику подсвечивающего сигнала. Все другие шумы полностью подавляются.

*Ключевые слова:* локация на просвет, выделение сигнала, синтез апертуры, объект локации

**DOI:** 10.1134/S0320791918040147

### ВВЕДЕНИЕ

При локации на просвет объект расположен между излучателем и приемником, вследствие чего разделение по времени прихода сигналов излучения и рассеяния на объекте локации становится невозможным. Поэтому для локации на просвет должны применяться свои методы селекции полезного сигнала. Эти и многие другие вопросы использования локации на просвет были поставлены и успешно решены в серии натурных опытов, выполненных в 1997–1999 гг. на озере Санхар Владимирской области [1–3]. Условия проведения опытов и основные методы выделения сигналов объекта локации были подробно описаны для случаев горизонтальной [1, 2] и вертикальной [3] приемных антенн.

Несмотря на полученные ранее важные результаты и их подробный анализ, эти исследования в настоящее время продолжаются на основе сохранившихся записей сигналов комплексных амплитуд с приемников горизонтальной антенны. К этому времени установлены факты, которые позволяют объяснить ряд наблюдавшихся явлений и проверить ряд предположений об особенностях распространения волн в этих опытах. В настоящей статье публикуется та часть результатов, которая к настоящему времени представляется законченной. Эта часть включает исследование особенностей распространения волн,

формирующих сигналы на входе антенны, и установление физической природы помех, препятствующих эффективному выделению сигнала локации на просвет. Результаты этих исследований позволяют пересмотреть ряд положений, содержащихся в [1, 2], как о физической природе помех, так и о влиянии флуктуаций среды на вид выделяемого сигнала. Последнее оказалось настолько меньше предполагаемого, что позволило успешно использовать не только главный лепесток диаграммы направленности рассеивателя (объекта локации), но и его боковые лепестки вплоть до тех, которые слабее главного лепестка на ~30 дБ.

Целью настоящего исследования является показать, что опыт, выполненный в условиях озера, дал возможность сформулировать необходимые и достаточные условия для того, чтобы выделение сигнала на просвет обладало наибольшей возможной эффективностью. Для этого надо, чтобы объект локации при своем движении пересекал один из лучей, соединяющих излучатель и приемную антенну, и чтобы этот луч не касался взволнованной поверхности водоема. Выполнение этих условий необходимо и достаточно для того, чтобы выделяемый сигнал не флуктуировал, что позволяет эффективно использовать всю апертуру движения выделяемого рассеивателя и реализовать полностью весь потенциальный выигрыш согласованной фильтрации, применяемой при

выделении лоцируемого сигнала. Эта процедура дает возможность реально оптимизировать выделение искомого сигнала на фоне гауссовых помех. Этот вид помех не устраним никакими иными методами. Что касается других помех, в частности помех, обусловленных рассеянием подсвечивающего сигнала на взволнованной поверхности, то метод позволяет подавлять и эту помеху, но не так эффективно, как гауссову. Однако помеху, образованную рассеянием подсвечивающего излучения поверхностным волнением, можно исключить иным способом, а именно путем придания соответствующей направленности источнику подсвечивающего сигнала.

Очевидно, что новые результаты обработки выполненных ранее экспериментов относятся к тем же конкретным условиям их проведения (тип акватории, дистанции, частотный диапазон) и не могут рассматриваться как универсальные положения, характеризующие метод локации на просвет в целом. Тем не менее, с помощью этого единичного опыта удалось выяснить физические аспекты формирования на входе приемной антенны полезного сигнала и фоновых помех, влияющих на эффективность метода выделения полезного сигнала. В данных условиях это является принципиальным моментом и имеет, на наш взгляд, значительную важность для оценки практических возможностей просветного метода, заложив начало созданию научных основ его применения.

### 1. О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН В ОПЫТЕ

Начнем изложение полученных нами результатов с анализа вопроса о том, каким образом формируются волновые поля на входе приемной антенны в обсуждаемых экспериментах. Подчеркнем, что этому вопросу ранее не уделялось большого внимания, но его решение во многом, как будет показано, определяет возможности метода локации на просвет. На рис. 1 показана схема опыта, выполненного на озере Санхар Владимирской области. В [1] показана карта этого озера с его профилем дна и расположением акустических трасс, используемых в этом опыте.

Ниже обсуждаются результаты обработки данных по одной трассе, имеющей в длину 300 м. Как сказано в [1], “излучатель устанавливался жестко на глубине 0.7 м от дна на различных глубинах”. Глубины движения объекта локации и положения горизонтальной антенной решетки составляли 6 м. Приемная антенна состоит из 64 приемных элементов, расположенных через 0.19 м; длина волны 0.6 м; общий размер антенны составляет 12 м. Объект локации имеет размер 5.81 м, т.е. его волновой размер составляет ~10 длин волн. Трасса перемещения объекта пересекает акустическую трассу посередине, скорость перемещения объек-

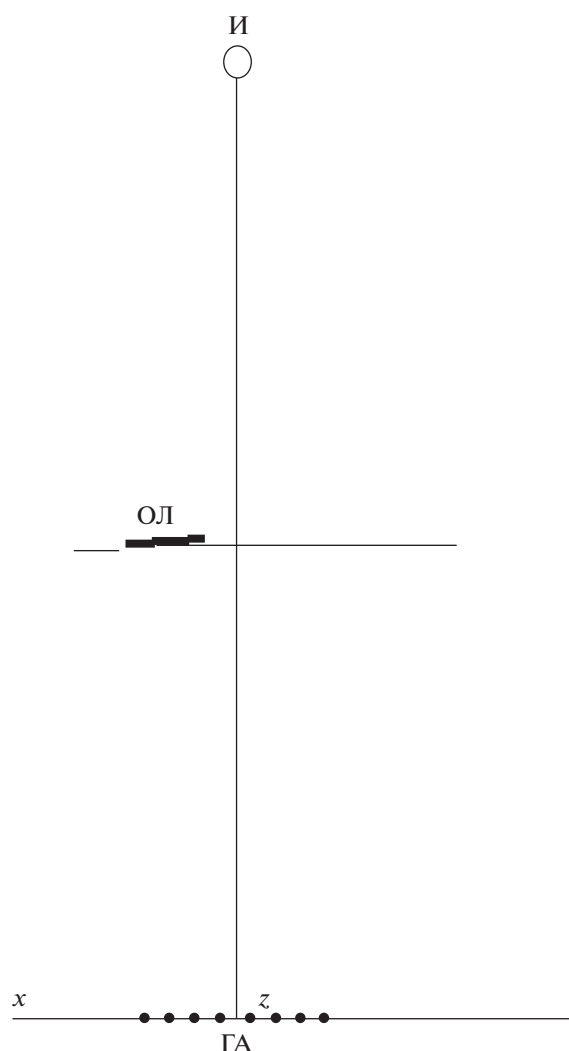
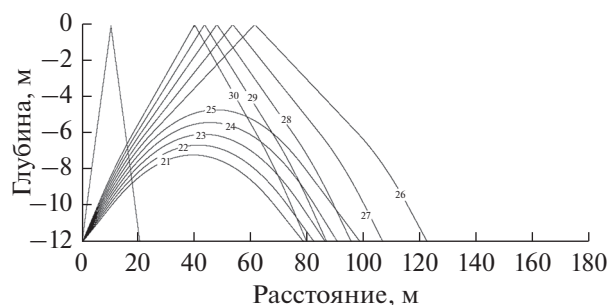


Рис. 1. Схема опыта, использованная для его математического моделирования. На схеме обозначено: И – излучатель; ОЛ – объект локации; ГА – горизонтальная антенна.

та составляет 0.565 м/с. Рельеф дна вдоль трассы сильно изменчив на величину, заметно превосходящую длину звуковой волны, при этом есть значительные уклоны как вдоль трассы, так и поперек нее [1].

В озере во время опыта существовал градиент температуры по глубине, приводящий к градиенту скорости звука. Величина градиента скорости звука в опыте показана в [1], но для опыта важен не градиент скорости звука, а ход лучей, формируемых этим градиентом. Ни во время самого опыта, ни позже при подготовке к опубликованию его результатов, лучевые картины для этого опыта не строились. Лучевая картина для этого опыта, построенная на основе гидрологии, близкой к приведенной в [1], показана на рис. 2. Здесь показаны только лучи, отвечающие распростра-



**Рис. 2.** Лучевая картина опыта, построенная до точек касания лучами донной поверхности. Цифрами показаны углы выхода лучей из источника в градусах.

нению до первого касания дна, дальнейшее их распространение представляло бы собой повторение показанной картины распространения для каждого луча, вышедшего под определенным углом из излучателя.

Из приведенной лучевой картины следует важный вывод, что никакой луч не может достичь точки приема волн, отстоящей от излучателя на 300 м, не отразившись несколько раз от дна. Последующие отражения лучей от ровного дна практически не изменяют углов, под которыми эти лучи пересекают заданный горизонт. При неровном дне это не так, и эти углы могут изменяться в пределах изменений наклона дна. Это лишает нас возможности представить точную лучевую картину. Нам важны только эти углы пересечения лучами определенных горизонтов, пусть с некоторыми вариациями. Поэтому для нашей цели нам будет достаточно рис. 2. Заметим, что из приведенной лучевой картины с необходимостью вытекает ошибочность утверждения, приведенного в [1], о том, что принимаемый сигнал формировался большим числом (10–20) распространяющихся мод. Никаких подробностей или доказательств этого утверждения в той работе не приведено.

Из лучевой картины следует также, что лучи, вышедшие из излучателя под углами  $20^\circ$  и меньше, не поднимаются на горизонт рассеяния и приема (6 м) и поэтому не могут принимать участия в формировании принимаемых сигналов. На этот горизонт попадают лучи, вышедшие из излучателя под углами, близкими к  $24^\circ \pm 1^\circ$ , и не касающиеся поверхности (мы назовем их “водными лучами”), и лучи, вышедшие из излучателя под углом более  $25^\circ$ , которые достигают поверхности и отражаются от нее (эти лучи назовем “поверхностными”). И те, и другие лучи могут достигать приемной антенны и рассеивателя.

Известно, что луч нельзя физически трактовать в виде бесконечно тонкой линии. Ширину луча предпочтительно трактовать с учетом дифракции как размер такой площадки экрана, ко-

торая, будучи установлена поперек луча, может существенно перекрыть собой прием сигнала по этому лучу. Размер такой площадки согласно волновой теории определяется первой зоной Френеля с центром на траектории луча, поперечный размер которой  $D$  определяется из условия

$$r = \frac{D^2}{\lambda},$$

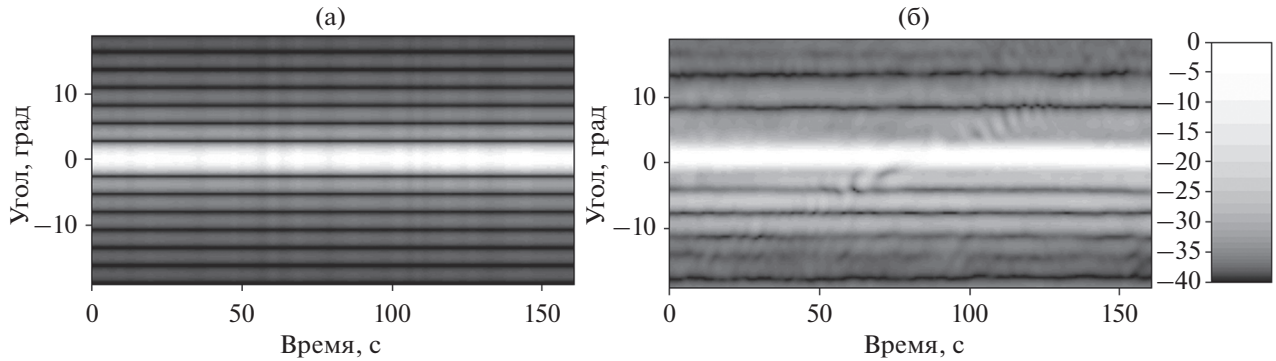
где  $r$  — половина длины луча от точки его излучения до точки его приема. Отсюда найдем угловую ширину луча  $\Delta\theta$  в виде

$$\Delta\theta = \frac{D}{r} = \frac{\sqrt{r\lambda}}{r} = \sqrt{\frac{\lambda}{r}}.$$

Угловая ширина луча определяется расстоянием до половины длины луча и не зависит от текущей дистанции, благодаря чему она является более универсальной характеристикой луча, чем его поперечник. В условиях нашего опыта ширина луча получается порядка  $4^\circ$ , что означает, что в условиях опыта существует всего один прямой водный луч, в то время как поверхностных лучей может быть очень много.

Здесь мы сделаем следующее очень важное для дальнейшего анализа уточнение. При решении задачи выделения сигнала, рассеянного движущимся объектом, путем согласованной фильтрации с математической моделью этого сигнала с высокой точностью определяются параметры опыта. В число этих параметров входит  $\cos \beta$ , где  $\beta$  — вертикальный угол, отсчитанный от горизонтали, под которым лучи приходят к горизонтальной антенне. В прежних работах  $\beta$  просто полагался равным нулю, что не оказывало влияния на качество выделения сигнала, так как компенсировалось ошибкой при измерении других параметров опыта. Как видно из рис. 2, если угол  $\beta$  действительно близок к нулю, то это означает, что антенной принимается единственный водный луч, так как все поверхностные лучи на горизонте антенны обладают значительно большими углами  $\beta$ . В нашем исследовании угол  $\beta$  определялся для луча, рассеянного объектом локации, и его значение действительно оказалось весьма близким к нулевому и составило около  $\pm 10^\circ$ , что соответствовало приему водного луча, распространяющегося от рассеивателя к антенне. Поэтому можно полагать, что луч, испытавший рассеяние, попадает на приемную антенну единственным образом как водный луч.

В то же время поверхностных лучей может быть много, и они приходят к антенне под разными углами. При этом чрезвычайно маловероятным представляется, что рассеиватель находится в том единственном водном луче, который приходит от излучателя к приемной антенне. Даже существование такого водного луча, соединяющего



**Рис. 3.** Отклик горизонтальной антенны на сигнал излучателя: (а) математическая модель однолучевого сигнала, (б) результат опыта.

излучатель и антенну, весьма сомнительно, так как набор таких возможных лучей невелик, и при гидрологии, показанной на рис. 1, на глубине 6 м есть зоны тени, в которых нет ни одного водного луча.

Здесь мы опять сделаем существенное уточнение. Важным результатом [1] является то, что упрощенная модель сигнала в области рассеяния вперед получила подтверждение в опыте. В основе этой модели лежит геометрия рассеяния. Поэтому подтверждение правильности этой модели служит доказательством того, что рассеиватель при своем движении по трассе пересекает именно тот единственный луч, который соединяет излучатель и приемник. Рассеиватель может пересекать и другие лучи, но выделяется он только за счет того, что пересекает именно этот луч. Все другие сигналы, образующиеся при пересечении других лучей, выступают только в качестве помех обнаружению, так как у них иная геометрия, приводящая к появлению сигналов иной формы относительно выделяемого сигнала.

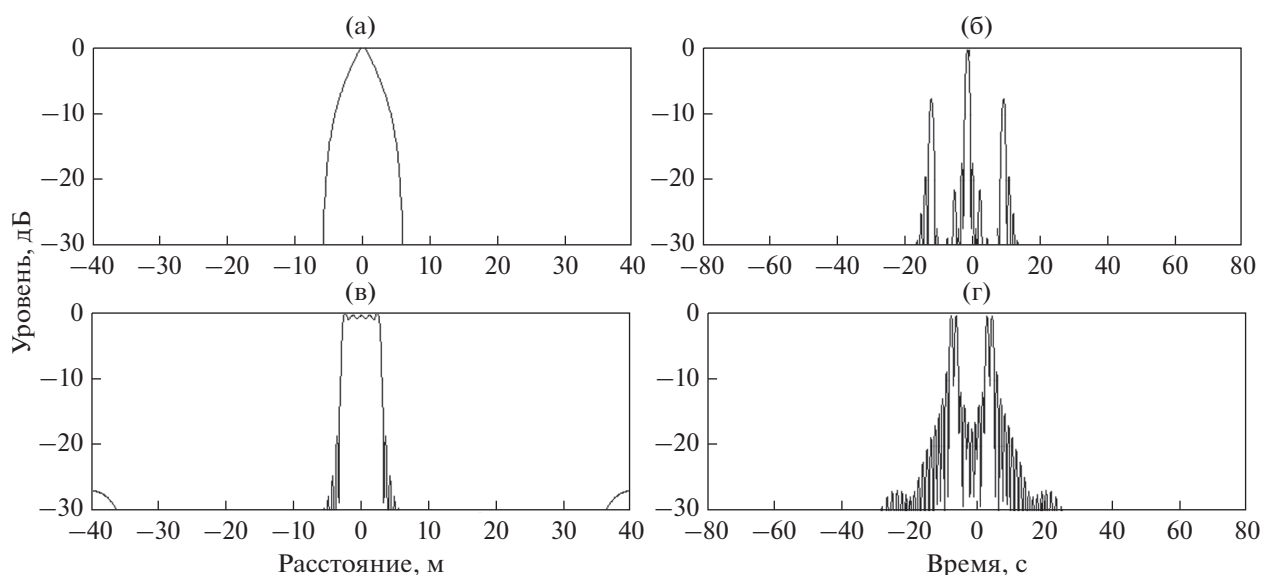
Этот луч превышает остальное поле на горизонтальной антенне примерно на 20 дБ, что показано на рис. 4 работы [1]. Луч формируется многочисленными отражениями от неровного дна и поэтому имеет сложную структуру в горизонтальной плоскости. Это практически не заметно по положению максимума отклика антенны, так как ее разрешения для этого недостаточно, но хорошо заметно по положению нулей отклика антенны, показанному на рис. 3. На этом рисунке видно, что на положение луча практически не влияют флуктуации среды, так как глубокие нули в течение продолжительного времени остаются на своих местах и не смещаются под действием флуктуаций.

Выясним теперь, какие сигналы, кроме сигналов одного водного луча, принимает приемная антенна. Это необходимо для того, чтобы знать, откуда и как возникают помехи обнаружению сигнала,

рассеянного движущимся объектом локации. Для этой цели мы используем картину лучей, показанную на рис. 2, а также рис. 4 из работы [1].

Начнем с того, какую информацию дает сигнал с вертикальной антенны, угловой спектр которой как функции  $\sin \beta$ , где  $\beta$  — угол в вертикальной плоскости, приведен на рис. 4 [1]. Вертикальная антенна принимает как водные, так и поверхностные лучи. Наблюдаемый максимум, приходящийся на вертикальный угол порядка  $\pm 10^\circ$  (0.2 рад), говорит о том, что он создается водными лучами и что эти лучи достаточно интенсивны на заданном удалении антенны. С ростом вертикального угла наблюдается экспоненциальный спад уровней сигналов, который может быть обусловлен двумя причинами. Одна причина спада при углах, близких к углам водных лучей, заключается в том, что водные лучи при этих углах широко расходятся по углу, а это расхождение приводит к значительному спаду уровня сигнала с увеличением расстояния. Поверхностные лучи с увеличением угла наклона к горизонту расходятся значительно меньше, но зато они испытывают на своем пути большее число отражений от дна, и под большими углами, что является второй причиной ослабления на больших углах. Этими соображениями может быть объяснена картина углового спектра на вертикальной антенне.

На том же рисунке приведена и картина углового спектра на горизонтальной антенне. На ней виден максимум, обладающий, несмотря на сдвиг по углу, формой диаграммы направленности горизонтальной антенны на частоте постановки опыта. Четкий, хорошо сформированный максимум легко объяснить тем, что горизонтальная антенна принимает всего один водный луч, который достаточно интенсивен для того, чтобы превышать на 20 дБ уровень почти равномерного фона, образованного поверхностными лучами, приходящими со всех возможных направлений.



**Рис. 4.** Моделирование выделения СОЛ на основе математических моделей А (а, б) и Б (в, г). На (б, г) выделение осуществлено с использованием ПВД.

Из приведенного здесь анализа вытекают эффективные способы повышения помехоустойчивости метода локации на просвет: либо путем добавления вертикальной направленности приемной горизонтальной антенне, чтобы отсеять крутые лучи, которые несут только помеху, либо путем формирования направленности поля излучения, сосредоточив его в секторе углов водных лучей, принимаемых горизонтальной антенной (второй способ представляется заметно более простым).

Итак, мы выяснили акустическую картину распространения и рассеяния сигналов в этом опыте и показали, что для исследования метода локации на просвет в этих условиях вполне достаточно модели сигналов, справедливой в свободном пространстве, но не усложняемой учетом значительного числа ни волноводных мод, ни лучей, как это обсуждалось ранее в работах [1–3].

## 2. ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ОБЪЕКТА ЛОКАЦИИ НА ФОНЕ ШУМОВ

Сигнал прохода объекта локации выделялся в [1–3] методом, аналогичным тому, который используется в радиолокации. Под радиолокацией здесь понимается известный метод синтеза апертуры в радиолокации бокового обзора [4–6]. Этот эффективный метод получения изображений применим к акустической локации на просвет, что дает возможность использовать для ее анализа формализм, приведенный, например, в [6]. При акустической локации на просвет аналогом приемной антенны, установленной на движущемся носителе (самолете), является дви-

жущийся протяженный объект локации. Последний облучается сигналом источника и переизлучает (рассеивает) этот сигнал в направлении приемников горизонтальной антенны. Изображение источника волн при этом может быть сформировано по сигналу, принятому приемником антенны. Объект локации благодаря своим размерам тоже обладает направленностью излучения, описываемой математически теми же соотношениями, которые описывают направленность лоатора бокового обзора, установленного на самолете. Математическое описание процесса формирования акустического изображения, приведенное в [1], не отличается от аналогичного процесса, применяемого в радиолокации, рассмотренного в [6]. Поэтому можно, не повторяя расчетов, приведенных в [6], сделать вывод о том, что и в локации на просвет при получении изображения точечного источника излучения, которым является излучатель волн подсветки объекта локации, мы получим не точку, а пятно, размер которого определяется размером объекта локации.

Как в радиолокации, так и при локации на просвет изображение объекта локации формируется в виде функции времени  $t$  модулем свертки  $P_n(t)$  – комплексной амплитуды сигнала, принятого приемником номера  $n$  антенны, и  $S(t)$  – математической моделью выделяемого сигнала [1, 6]:

$$W_n(t) = |P_n(t) \otimes S(t)|. \quad (1)$$

Математическая модель, формируемая по схеме, показанной на рис. 1, представляет собой зависимость от времени сигнала на выходе приемника антенны, принимающего сигнал, рассеянный движущимся вдоль трассы рассеивателем,

без учета помех и в свободном пространстве. В нашем случае оба эти предположения обоснованы. Сигнал, рассеянный движущимся объектом локации, возникает и распространяется в одном луче, что эквивалентно свободному пространству. Луч, приходящий от рассеивателя, целиком водный, не содержащий флуктуаций. Помехи добавляются при приеме антенной поверхностных лучей. Среди этих аддитивных помех (мультипликативные помехи, упоминаемые в [1–3], отсутствуют) нужно выделить сигнал, обязанный своим происхождением проходу рассеивателя. Исходя из этих соображений может быть сформирована математическая модель локации на просвет. В отличие от [1–3], где используется всего одна математическая модель, мы сформируем две модели, которые назовем моделями А и Б.

Модель А представляет собой теоретически вычисленную зависимость сигнала в одном приемнике антенны от времени, которая получается в результате приема этим приемником сигнала, рассеянного всем протяженным объектом локации. Эта модель позволяет получить изображение излучателя подсвечивающего сигнала путем приема сигнала, рассеянного перемещающимся объектом локации точно так, как это делается в радиолокации с помощью сигналов, принятых протяженной антенной, установленной на движущемся носителе. Важно то, что путем этого опыта определяется форма сигнала излучателя, и если в силу каких-либо причин излучатель окажется не точечным, то мы должны это увидеть. Форму излучателя и факт его присутствия можно заметить только в том случае, если проход рассеивателя действительно состоялся. Поэтому данная модель может быть использована в (1) для определения факта прохода объекта локации, в виде получения мощного отклика на сигнал в форме этой модели в (1). Опираясь на упрощенную схему опыта, показанную на рис. 1 для модели А, получим выражение в виде

$$S_A(t) = F\left(\frac{t-t_0}{T}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \times \left(\sqrt{R_1^2 + v^2(t-t_0)^2} + \sqrt{R_2^2 + v^2(t-t_0)^2}\right)\right). \quad (2)$$

Здесь  $v$  – скорость перемещения объекта локации;  $t_0$  – время пересечения объектом локации вертикальной плоскости, проходящей через излучатель и приемник антенны;  $R_1$  – расстояние между центром антенны и объектом локации в момент пересечения последним прямой, соединяющей излучатель и центр антенны;  $R_2$  – расстояние между излучателем и объектом локации в момент пересечения последним прямой, соединяющей излучатель и приемник антенны;  $T$  – параметр, определяемый из опыта, пропорциональный  $1/L$ , где  $L$  – размер объекта локации;  $F(x)$  –

диаграмма рассеяния объекта локации, которая для объекта локации прямоугольной формы имеет вид [1]

$$F(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}. \quad (3)$$

В [1] и последующих работах [2, 3] в качестве математической модели сигнала  $S(t)$  приведена следующая формула:

$$S(t) = F\left(\frac{t-t_0}{T}\right) \exp(i\gamma(t-t_0)^2), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – определяемый в опыте параметр, величина которого зависит от геометрии опыта и скорости движения объекта локации. Формула (2) эквивалентна (4) в параксиальном приближении, которое справедливо для условий [1–3] в силу малой действующей апертуры синтеза, но несправедливо для настоящей работы, в которой апертура синтеза сильно увеличена.

Модель Б взята нами из радиолокации. Она основана на выделении сигналов отдельных точек рассеивателя, и поэтому сигналом  $S(t)$  в ней становится зависимость от времени сигнала точечного источника, излучающего постоянный сигнал в интервале времени движения по трассе объекта локации, который считается одним из приемников антенны. Эта модель такая же, как в радиолокации, задачей которой является определение формы рассеивающей поверхности (получение изображения местности). Модель Б запишется в виде

$$S_B(t) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{R_1^2 + v^2(t-t_0)^2} + \sqrt{R_2^2 + v^2(t-t_0)^2}\right)\right). \quad (5)$$

Математические модели (2) и (5) позволяют различным образом сформировать изображения точечного источника исходного сигнала подсветки и объекта локации.

На рис. 4 показаны результаты моделирования задачи выделения сигнала объекта локации (СОЛ) на основе моделей А и Б. В результате свертки сигнала, задаваемого выражением (2), с его математической моделью того же вида получается импульс, длительность которого, как известно, обратно пропорциональна произведению ширины спектра сворачиваемого сигнала на его длительность. Длительность сигнала, принимаемого приемником антенны, определяется временем прохода главного лепестка диаграммы направленности рассеивателя, которое составляет примерно 20 с. Ширина спектра сигнала определяется этим же временем, так как частота рассеянного сигнала изменяется пропорционально времени со скоростью 1 Гц за 140 с. В результате процесса выделения получается сжатие исходного

сигнала длительностью 20 с примерно втрое (в 2.8 раза). Это приводит к выигрышу в отношении выделяемого нами сигнала к гауссову шуму, который согласно [1] представляет собой помеху обнаружению сигнала величиной порядка 4 дБ (4.47 дБ).

Длительность сигнала в данном случае определяется временем перемещения объекта локации в пределах главного лепестка его диаграммы направленности, но сигнал от объекта с доплеровской частотой сдвига поступает на приемник во все время движения объекта локации по заданной траектории, только эти сигналы слабые, а временами они даже равны нулю. Можно увеличить эти слабые сигналы так, чтобы длительность сигнала возросла. Для этого следует воспользоваться известной в радиолокации процедурой выделения движения (ПВД), которая уже применялась в опытах по акустической локации на просвет [7]. Эта процедура может быть реализована путем следующего действия с сигналом:

$$K(t) = W(t - \tau) - W(t + \tau), \quad (6)$$

где  $\tau$  – постоянный промежуток времени, определяемый исходя из наибольшей эффективности преобразования. Здесь преобразование ПВД (6) применялось дважды при значении  $\tau = 1$  с.

Процедура ПВД (6), примененная дважды, эквивалентна частотному преобразованию по закону  $f^2$ . Это преобразование позволяет для слабо флуктуирующих сигналов увеличить уровень боковых лепестков диаграммы направленности рассеивателя, позволяя тем самым довести время существования сигнала до 140 с (полное время перемещения рассеивателя в этом опыте). При этом ширина спектра возрастает до 1 Гц, что приводит к значительно большему сжатию сигнала, уже в 140 раз, и к выигрышу относительно гауссова шума на ~20 дБ (21.461 дБ).

Как видно из сравнения рис. 4а и 4б, использование ПВД в математической модели А действительно привело к дополнительному существенному сжатию отклика на СОЛ. На рис. 4б видны две боковые составляющие, появление которых связано с тем, что нули диаграммы направленности объекта локации скомпенсированы быть не могут и частота появления нулей в направленности излучения объекта локации приводит к 100% амплитудной модуляции сжатого рассеянного сигнала, что при фурье-преобразовании сигнала, принятого приемником антенны, добавляет к сигналу два боковых лепестка. На рис. 4 показан также результат выделения СОЛ на основе модели Б. При таком выделении, как и в радиологической, получается форма перемещающегося рассеивателя, которая при моделировании принималась прямоугольной посредством выбора направленности излучения в виде (3). При использо-

вании ПВД сигнал превращается в двойной, состоящий из отдельных точек. Это происходит потому, что крайние точки изображения обладают наибольшими частотами и поэтому сильно подчеркиваются путем использования ПВД.

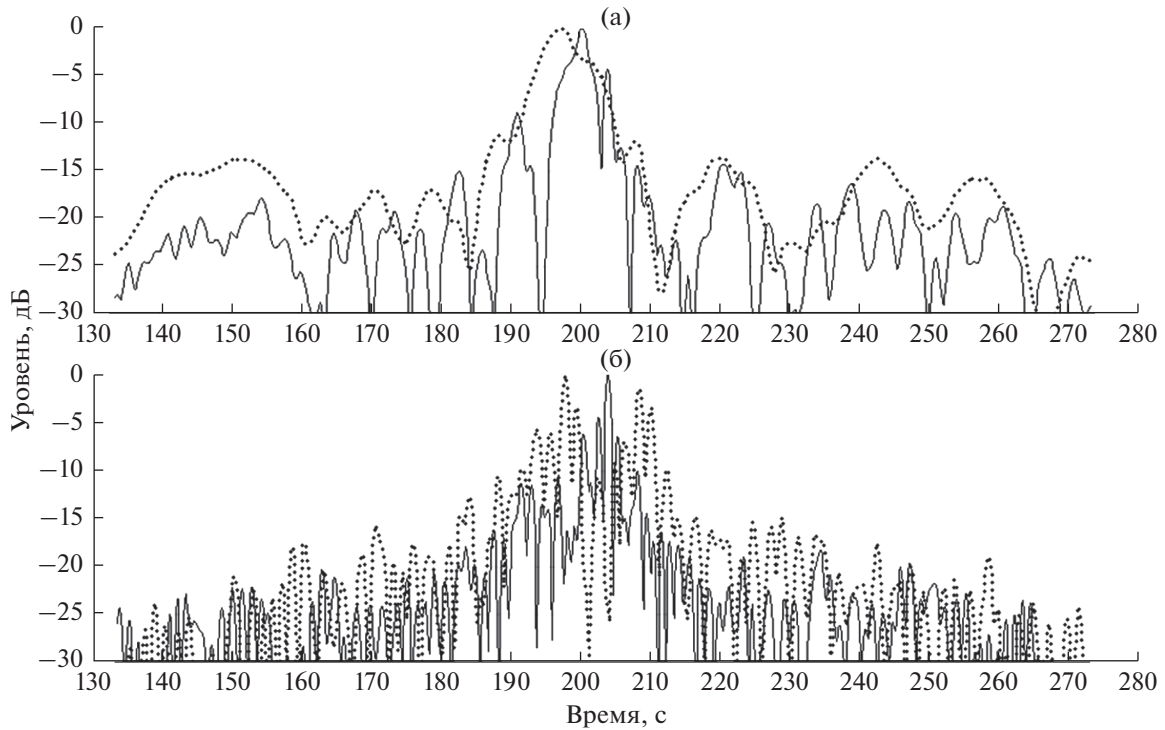
Опираясь на приведенные здесь модельные результаты, сделаем следующий естественный шаг и применим их для обработки хорошо сохранившихся записей исходных сигналов, полагая, что флуктуации сигналов, принимаемых по водному лучу, пренебрежимо малы.

### 2.1. Результаты опыта

Необходимо сделать ряд предварительных пояснений. В [1, 2] СОЛ сначала выделяется на каждом отдельном приемнике антенны, а затем после компенсации задержек все выделенные сигналы суммируются когерентно. В используемой в настоящей работе процедуре существенно изменен порядок выполнения действий. Сначала производится когерентное сложение сигналов приемников антенны с такими фазами, чтобы максимум диаграммы направленности антенны был направлен на движущийся рассеиватель. Результат такого сложения, эквивалентный приему сигнала отдельным приемником антенны, расположенным в центре антенны, и обладающий выигрышем в отношении сигнала к шуму всей антенны, используется для выделения СОЛ. Эта процедура отличается от процедуры, используемой в [1, 2], только возможностью получения изображения источника сигналов в широком диапазоне углов. Процедура, использованная в [1, 2], ограничивает получаемое изображение источника диаграммой направленности антенны. По помехоустойчивости обе процедуры равнозначны, но использованная нами процедура не требует компенсации задержек сигналов СОЛ, выделяемых отдельными приемниками антенны. Применяемая здесь операция сопровождения цели заменяет компенсацию задержек сигналов, используемую в [1, 2]. Результаты опыта показаны на рис. 5.

Остановимся сначала на том, что получилось в опыте при выделении СОЛ с помощью модели А. Согласно результату математического моделирования, показанного на рис. 4, в выделенном сигнале на рис. 5б должны быть две боковые частоты, а в опыте видна только одна боковая частота увеличенного уровня. Это можно объяснить тем, что точечный источник подсвечивающего сигнала стал двойным в результате отражений от неровного дна. В результате появились два сигнала, смещенных по времени таким образом, что основной сигнал одного из них встал на место одной из боковых составляющих второго.

Теперь обратим внимание на результат с выделением СОЛ с помощью модели Б. На рис. 5б на-



**Рис. 5.** Результат опыта по выделению СОЛ с помощью свертки (1) с использованием модели А (пунктир) и модели Б (сплошная линия) без использования ПВД (а) и с использованием ПВД (б).

блюдается существенное отличие от того, что получено при моделировании на рис. 4. Должен быть двойной отклик, а на опыте он оказался одинарным. Это явление можно объяснить уже упомянутым выше отражением от неровного дна, которое могло привести к появлению при модели А всего одной боковой составляющей. Добавление второго источника, сдвинутого на то же самое время, при котором происходит удвоение бокового отклика при модели А, приводит к совмещению двух откликов на СОЛ, показанных на рис. 5б для модели Б.

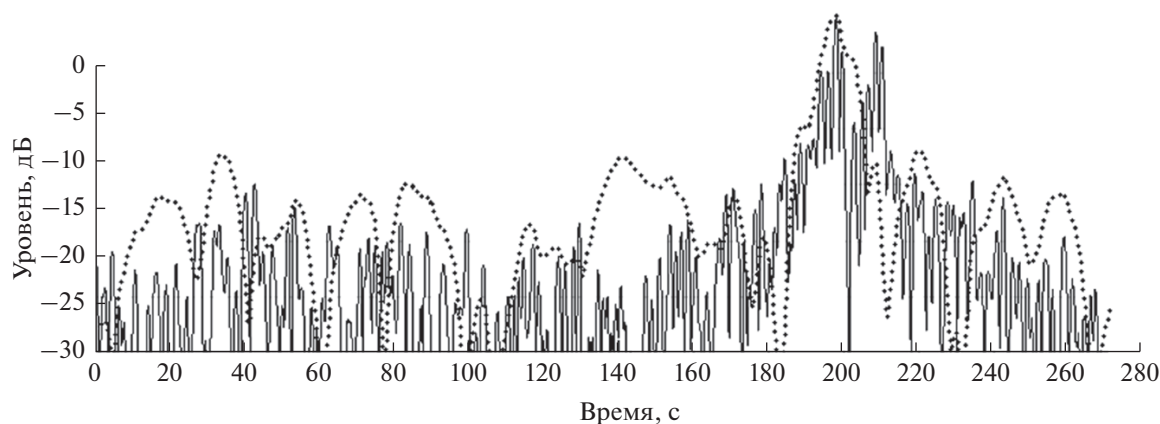
Появлением дополнительных изображений точечного сигнала источника подсветки можно объяснить то, что при обеих моделях наблюдаются дополнительные отклики. Эти отклики обычно напоминают шумовой сигнал, но в данном случае это не так. Это результат точного воспроизведения рельефа дна при трехкратном отражении от него. Аналогичное происхождение имеет так называемый спекл-шум в оптике [6], который появляется из-за точного воспроизведения мелких неровностей в объекте, освещаемом монохроматическим источником света. Этот акустический спекл-шум, в отличие от обычного аддитивного шума, не образует ложных тревог и потому не оказывает никакого влияния на обнаружение СОЛ.

На рис. 5б видно, что в опыте действительно произошло наибольшее возможное сжатие сиг-

нала, в 140 раз. Из этого следуют два важных вывода. Первый вывод – все параметры опыта, входящие в математические модели (2) и (5), определены правильно и вслепую. Они определялись вслепую, поскольку сами записи сигналов превосходно сохранились, а значения параметров опыта должным образом не только сохранены, но и с нужной точностью измерены во время опыта. Второй – такое сжатие должно привести к увеличению помехозащищенности СОЛ на 20 дБ. Выигрыш сжатия должен возрасти на 16 дБ, что наблюдалось бы на рис. 6, на котором помещены вместе результаты, полученные с моделью А как без использования ПВД (сжатие в три раза), так и с использованием ПВД (сжатие в 140 раз).

Этот выигрыш определен относительно уровня аддитивного гауссова шума, который согласно [1] есть в этом опыте. На рис. 6 выделенный сигнал, как это делалось и в [1], и в последующих работах, показан не только в момент появления СОЛ, но и в то время, когда прохода еще не было. Когда прохода еще нет, уровень сигнала с ПВД должен превышать уровень сигнала без ПВД на 16 дБ. Однако разность уровней сигналов с ПВД и без ПВД много меньше этого значения, несмотря на то, что сжатие сигнала есть, и существенное! Это неожиданный результат, который требует своего объяснения.





**Рис. 6.** Результат опыта по выделению СОЛ с помощью модели А с использованием ПВД (сплошная линия) и без использования ПВД (пунктир).

### 2.2. Акустический спекл-шум как помеха выделению СОЛ

Рассмотрим сначала вопрос о “размножении” сигналов вследствие отражений от неровного дна. При перемещении рассеивателя сигналы прямого луча отражаются от различных участков дна, имеющих различные наклоны к горизонтали. Дно может не только зеркально отражать волны на ровных участках, но и рассеивать волны, уподобляясь морской поверхности. Рассеяние в этом случае формирует поле, определяемое двумерным спектром рельефа дна [8, 9]. В случае единственной реализации этот спектр сильно изрезан, что может быть причиной появления квазидискретных составляющих в спекл-шуме. Это одна из возможных причин, которая может породить специфическую помеху выделению СОЛ, аналогичную по своей природе спекл-шуму в когерентной оптике [6].

Но есть и другая возможная причина возникновения подобных помех — флуктуации сигнала при его распространении. В этом опыте, однако, таких флуктуаций практически нет, что следует из рис. 3б. На нем видно, что нули отклика антенны на сигнал излучателя стационарны и не смещаются во времени. В то же время, на том же рис. 3 видно, что форма отклика антенны на сигнал излучателя явно несимметрична и не соответствует форме отклика антенны на сигнал единственного точечного источника. Источник явно размыт. Это и порождает спекл-шум.

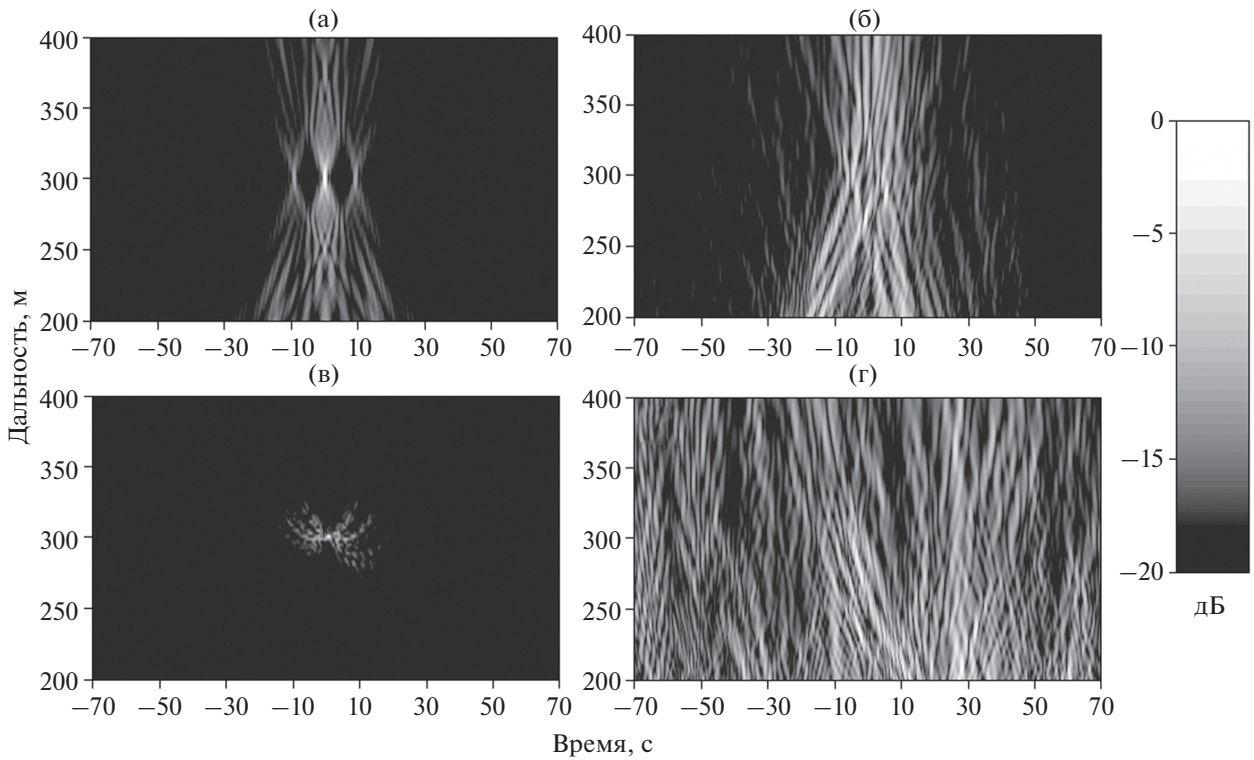
Для уточнения картины спекл-шума и ответа на вопрос, куда делись ожидаемые децибелы выигрыша согласованной фильтрации, потребуется представить результат опыта, показанный на рис. 5, иначе, а именно путем варьирования в математической модели параметром  $R$ , который определяет дистанцию расположения точечного источника сигнала. Такое представление результата синтеза является построением оценки коор-

динат источника излучения с помощью когерентного синтеза апертуры [5, 6].

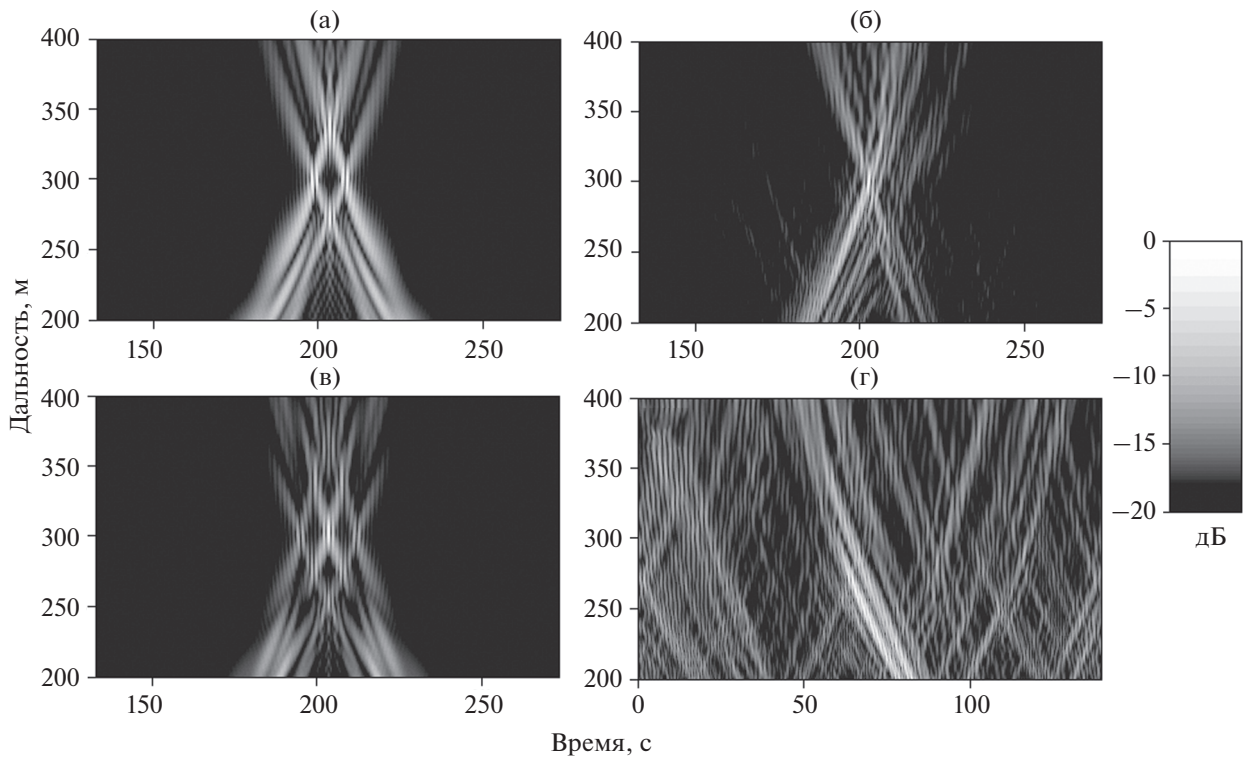
### 2.3. Когерентный синтез апертуры

Классический когерентный синтез апертуры [5, 6] предполагает, что сигнал монохроматического точечного источника принимается равномерно движущимся точечным приемником вдоль известной траектории. В результате этого действия можно получить сигнал, эквивалентный сигналу антенны, приемники которой расположены вдоль траектории движения приемника. В случае нашего опыта приемник неподвижен, а вдоль прямолинейной траектории движется рассеиватель конечных размеров. В этом случае также можно осуществить синтез апертуры вдоль трассы перемещения рассеивателя, если учесть соответствующее такому движению изменение геометрии трассы. Также необходимо, чтобы не было шумов, способных исказить принимаемый сигнал рассеивателя, что в нашем опыте также выполняется. Для компенсации уровня боковых лепестков диаграммы рассеяния объекта локации применяется ПВД, что позволяет осуществить процедуру синтеза по всей трассе перемещения рассеивателя.

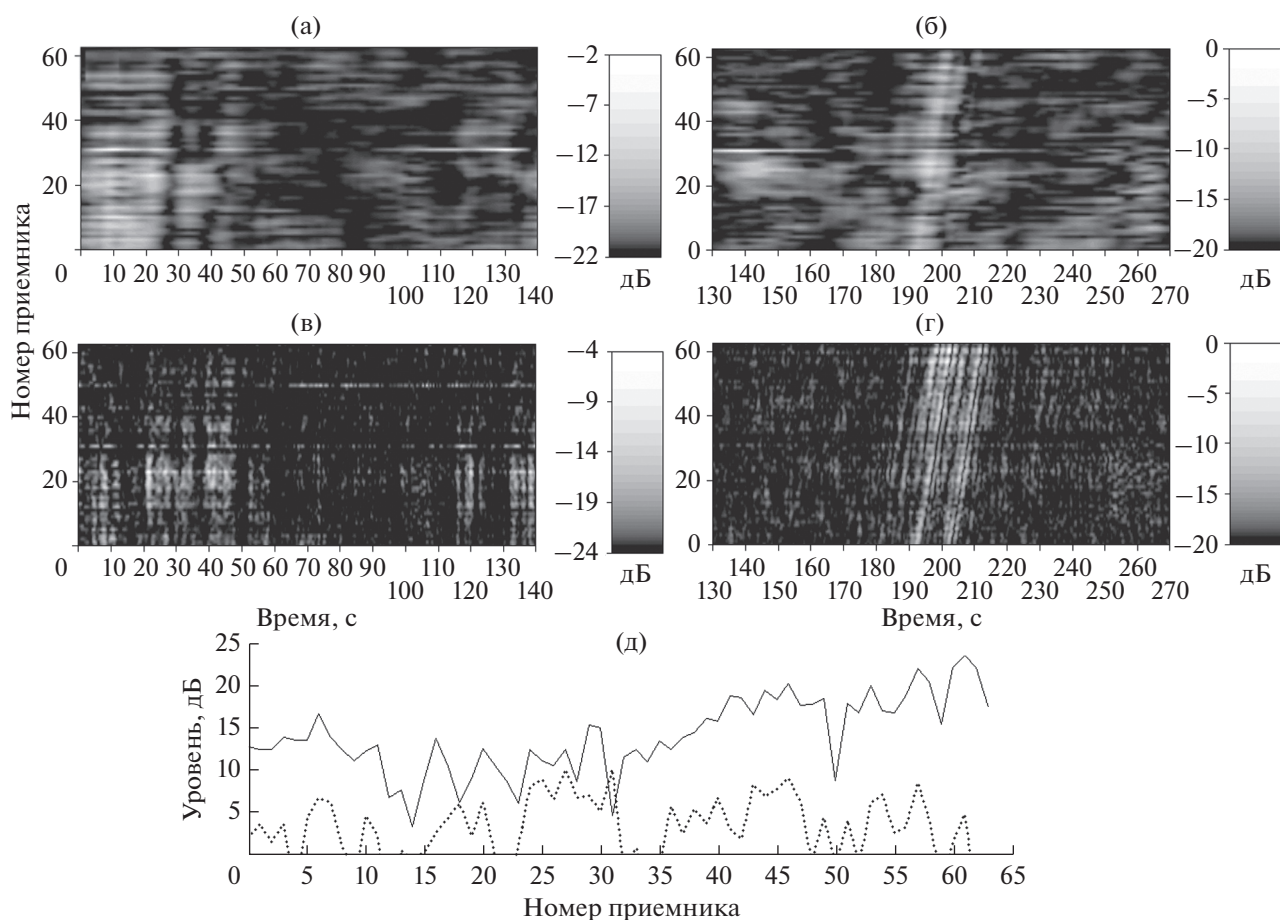
На рис. 7 приведен результат когерентного синтеза апертуры в этом опыте. На рис. 7а показан результат когерентного синтеза апертуры по сигналу математической модели А. При этом нет ни шумов, ни флуктуаций. Видно, что изображение излучателя дает верную оценку дальности. Два сигнала справа и слева от него возникли в результате модуляции рассеянного сигнала с частотой следования нулей диаграммы направленности движущегося рассеивателя. Получилась классическая картина когерентного синтеза апертуры, осложненного только модуляцией нулями диаграммы направленности рассеяния.



**Рис. 7.** Результат когерентного синтеза апертуры по сигналу математической модели А (а); опыта с использованием модели А (б); двумерная свертка комплексных амплитуд (а) и (б); результат синтеза в отсутствие движущегося рассеивателя (г).



**Рис. 8.** Результат когерентного синтеза апертуры по сигналу математической модели Б (а); опыта с использованием модели Б (б); сумма сигналов (а) со сдвигом во времени (в); результат синтеза в отсутствие движущегося рассеивателя (г).



**Рис. 9.** Выделение СОЛ с помощью модели А до прохода объекта локации (а, в) и при его проходе (б, г) на каждом отдельном приемнике горизонтальной антенны. На (д) показана величина SNR на приемниках антенны без ПВД (пунктир) и с использованием ПВД (сплошная линия).

На рис. 7б показана картина, полученная в опыте с помощью той же математической модели, что и на рис. 7а. Однако даже при полном отсутствии шумов, искажающих рассеянный сигнал, здесь не наблюдается результата, показанного на рис. 7а. Попробуем понять, почему это происходит.

В опыте рассеянный сигнал может попасть на антенну, испытав три последовательных отражения от дна водоема под углом скольжения не менее  $20^\circ$ . Это приводит, помимо больших потерь на отражение, которые преодолимы за счет мощного излучателя подсветки, к расширению углового спектра сигналов, вызывающему искажение формы рассеянного сигнала. Эти искажения могут быть следствием того, что дно на протяжении трассы неровное [1]. На рис. 7в показано, что и в этих акустических условиях существует нормальное зеркальное отражение от дна, в точности приводящее результат синтеза апертуры к виду, показанному на рис. 7а. Для того чтобы это показать, проведено специальное исследование. Рисунок 7в

получен путем свертки комплексных амплитуд сигналов, модули которых показаны на рис. 7а и 7б. Эта процедура позволила из всего пакета сигналов, показанных на рис. 7б, выделить сигнал, в точности по всем параметрам обладающий видом сигнала математической модели, показанного на рис. 7а. Этот результат вселяет надежду на то, что при более плоском дне форма сигнала опыта будет значительно ближе к его математической модели, вследствие чего отклик возрастет.

#### 2.4. Оценка помехоустойчивости выделения СОЛ

Прежде всего, заметим, что помеха не гауссова. Это видно по рис. 7г и 8г. Вид гауссовой помехи явно не соответствует тому, что мы должны при этом видеть. Помеха обнаружению имеет примерно тот же вид, что и СОЛ, но с иными параметрами, и поэтому она не подавляется так, как должен подавляться гауссов шум при согласованной фильтрации.

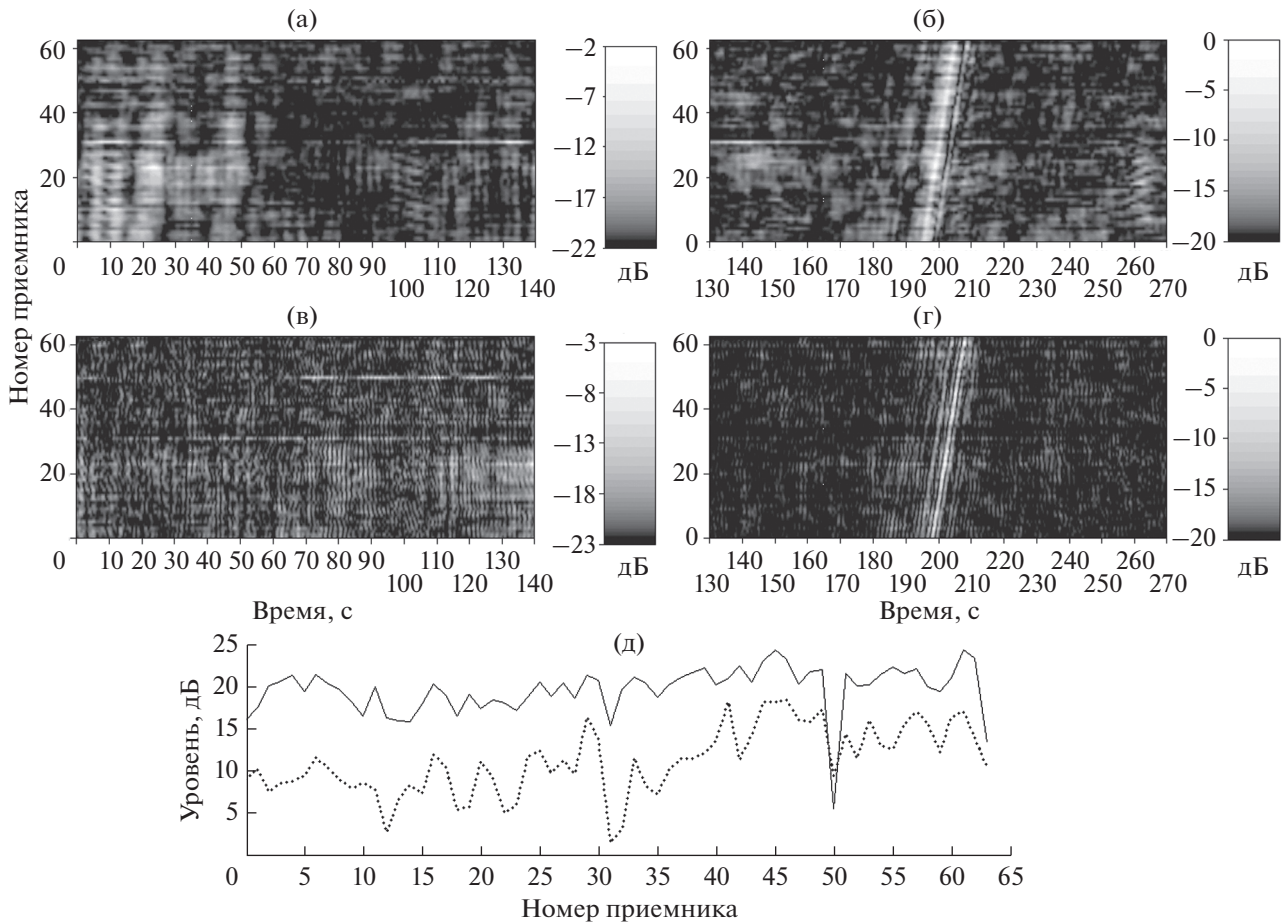


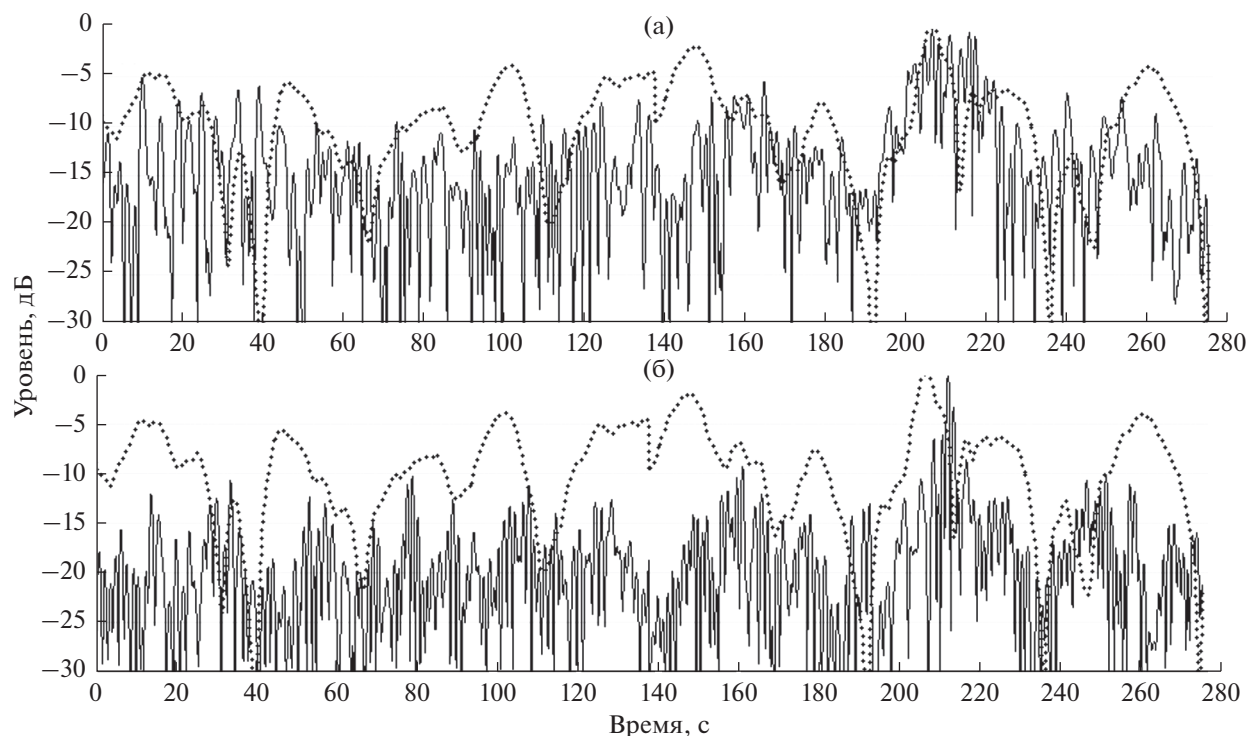
Рис. 10. То же, что на рис. 9, для модели Б.

Для оценки помехоустойчивости разных методов выделения СОЛ будем использовать стандартную величину отношения сигнал/шум SNR (signal-to-noise ratio). Величина SNR определяется как отношение отклонения средней величины выходного сигнала, обусловленного появлением полезного сигнала на входе, к стандартному отклонению выходного сигнала в случае отсутствия полезного сигнала. Это отношение использовано в [2] для той же цели сравнения различных методов выделения СОЛ.

На рис. 9 и 10 приведены значения SNR для выделения СОЛ на отдельном приемнике с помощью моделей А и Б как с использованием ПВД, так и без нее. Для получения величины SNR во время прохода использовалось только значение максимума сигнала, а среднее значение и дисперсия вычислялись на основе сигналов на антенне в то время, когда прохода еще не было. Это видно на рис. 9 и 10 по шкале времени. Начало прохода объекта локации соответствует времени 130 с, а проход заканчивается после 270 с. Из рисунков видно, что, несмотря на явно негауссову, и к тому же нестационарную помеху, выигрыш относи-

тельно помехи есть, и иногда по своей величине он даже почти соответствует степени сжатия сигнала. Отметим, что модель Б обладает более высокой помехоустойчивостью как без использования, так и с использованием ПВД. Модель А, видимо, не уступит модели Б с ПВД в том случае, если помеха будет более стационарной и ближе к гауссовой. Это можно сделать путем исключения приема сигналов поверхностных лучей, что достижимо путем придания соответствующей направленности излучателю [10, 11].

Заметим, что результаты исследований помехоустойчивости при выделении СОЛ отдельными приемниками антенны позволяют объяснить, почему приведенные выше результаты по выделению СОЛ всей антенной привели к значительно более скромным результатам. Это произошло потому, что уровень помех, как это видно на рис. 9 и 10, сильно изменяется вдоль антенны. При этом на отдельных приемниках антенны мы получаем ожидаемую величину увеличения помехоустойчивости выделения СОЛ за счет сжатия сигнала, но при усреднении вдоль всей антенны этого уже не может получиться.



**Рис. 11.** Выделение СОЛ по сигналу приемника антенны № 45. На (а, б) пунктиром показан результат выделения СОЛ на этом приемнике методом, использованным в [1–3] (модель А без ПВД); сплошной линией показан результат с помощью модели А с ПВД (а) и модели Б с ПВД (б).

На рис. 11 показано, как выглядит обнаружение СОЛ по сигналу приемника антенны № 45 с помощью моделей А и Б. Этот результат наглядно показывает преимущества ПВД и модели Б, впервые примененные нами для выделения СОЛ.

### ВЫВОДЫ

В качестве основного вывода из этого исследования отметим выявленные путем новой обработки данных экспериментов [1–3] специфические особенности метода активной локации объекта на просвет. Они связаны с сильным влиянием на конечный результат условий формирования принимаемых сигналов, включая полезный сигнал и помехи. Показанная в статье возможность формирования полезного сигнала чисто водными лучами приводит к существенному подавлению флуктуаций сигнала, играющих роль мультипликативной помехи. В то же время аддитивная помеха в условиях ее формирования в результате отражений от неравномерной по трассе поверхности дна имеет природу, аналогичную спекл-шуму в оптике, и поэтому может быть интерпретирована как акустический спекл-шум. Важно, что такой шум не может быть существенно подавлен путем стандартной согласованной фильтрации, что ограничивает возможности выделения СОЛ даже в условиях предельно слабых флуктуаций полезного сигнала.

Отметим, что для реализации первой из отмеченных особенностей необходимо обеспечить условие, чтобы рассеивающий объект при своем движении пересекал прямой водный луч источника подсветки, который при этом должен существовать при заданном расположении излучателя и антенны в канале. Для этого необходимо специально формировать направленность источника подсветки в вертикальной плоскости, т.е. использовать вертикальную излучающую антенну с регулируемым амплитудным распределением. Близкая по постановке задача управления полем вертикальной антенны в подводном канале обсуждалась авторами [10, 11].

Автор благодарен П.И. Коротину за помощь в работе. Без его помощи этой работы бы не существовало, так как именно он организовал превосходную запись данных, сохранил их и предоставил в наше распоряжение. Особую благодарность выражаю М.Б. Салину. Его помощь и поддержка и сделанные им замечания по тексту первоначального варианта этой статьи были мне необходимы. Еще раз благодарю всех сотрудников ИПФ РАН, упомянутых в [1]: А.Я. Балалаева, В.В. Бредихина, В.А. Лаухина, В.В. Папко, В.В. Пикалева, А.И. Потапова, В.А. Тютин, А.В. Циберева, А.С. Чащина, за подготовку и проведение этих уникальных экспериментов, в результате которых были получены записи сигналов столь высокого качества, позво-

лившего вернуться к их анализу и обработке спустя почти 20 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Митюгов В.В., Орлов Д.А., Салин Б.М., Турчин В.И.* Экспериментальные исследования дифракции звука на движущихся неоднородностях в мелководных условиях // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 2. С. 227–237.
2. *Матвеев А.Л., Орлов Д.А., Родионов А.А., Салин Б.М., Турчин В.И.* Сравнительный анализ томографических методов наблюдения неоднородностей в условиях мелкого моря // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 268–279.
3. *Matveev A.L., Spindel R.C., Rouseff D.* Forward scattering observation with partially coherent spatial processing of vertical array signals in shallow water // IEEE J. Oceanic Engineering. 2007. V. 32. № 3.
4. *Leith E.N.* Quasi-holographic techniques in the microwave region // Proc. IEEE. 1971. V. 59. № 9. P. 1305–1318.
5. *Зверев В.А.* Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике). М.: Сов. Радио, 1975. 304 с.
6. *Зверев В.А.* Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
7. *Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A.* Experimental results of localization of moving underwater signal by adaptive beamforming // IEEE Trans. Signal Proc. 1995. V. 43. № 10. P. 2249–2257.
8. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 428 с.
9. *Андреева И.Б.* Рассеяние звука поверхностью и приповерхностным слоем океана / Акустика океана. Современное состояние. Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. М.: Наука, 1982. С. 118–132.
10. *Артельный В.В., Артельный П.В., Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Коротин П.И.* Фокусировка поля в гидроакустическом волноводе в заданный интервал глубин // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 477–483.
11. *Артельный В.В., Артельный П.В., Вировлянский А.Л., Коротин П.И., Наседкин А.В., Потапов О.А., Циберев А.В.* Фокусировка звукового пучка в подводном волноводе с помощью вертикальной антенны // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 339–346.