

СПОСОБ ЛОКАЦИИ НА ПРОСВЕТ БЕЗ ЛОЖНЫХ ТРЕВОГ И ПРОПУСКА СИГНАЛА ПРОХОДА ОБЪЕКТА ЛОКАЦИИ

© 2018 г. В. А. Зверев*

*Институт прикладной физики РАН
Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*

**e-mail: zverev.24@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.04.2018 г.

Предложен и реализован в натурном опыте способ локации на просвет, формирующий изображение объекта локации (ОЛ) на протяжении всего пути его перемещения. Это делалось ранее лишь в точке, в которой сигнал ОЛ максимален, так как уровень сигнала при перемещении ОЛ уменьшается в соответствии с направленностью его излучения при постоянном уровне помехи. В предлагаемом способе выделения сигнала ОЛ горизонтальная антенна используется иначе и так, что помеха тоже убывает в соответствии с направленностью горизонтальной антенны. Тем самым создаются условия для формирования сигнала прохода ОЛ, вид которого помеха не может ни принять, ни замаскировать. Способ успешно применен в натурном опыте 1998 года.

Ключевые слова: локация на просвет, выделение сигнала, объект локации, горизонтальная антенна, неровное дно

DOI: 10.1134/S0320791918060163

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением исследования возможностей локации на просвет, начатого в [1, 2] и недавно продолженного в [3]. В [1, 2] исследования проводились на основе выделения сигналов известной формы на фоне шумов и помех. В [3] исследования были продолжены на другой основе – как получение акустических изображений с помощью когерентного синтеза апертуры. При этом была использована иная математическая модель (сигнал известной формы) – модель Б, позволяющая не только выделять движущийся объект локации, но и получать его изображение. В [1–3] было получено изображение источника в одной точке трассы, в которой рассеянный сигнал, рассеянный объектом локации, был максимальным. Кроме этого, в [3] с помощью процедуры выделения движения (ПВД) [4] получено сильно сжатое изображение объекта локации на основе сигналов вдоль всей трассы перемещения рассеивателя. Однако это изображение не совпадало с тем, которое ожидалось согласно математической модели опыта. В [3] возможной причиной несоответствия считалось многократное отражение выделяемого сигнала от неровного дна.

Задачей настоящей работы, с решения которой она началась, было выяснить физический механизм такого влияния. С этой целью был использован иной подход к исследованию локации на просвет. Этот подход основан на локализации

изображения рассеивателя на трассе на основе выделения доплеровского сигнала. Этот подход был известен и тогда, когда проводился опыт, и еще тогда он мог быть использован в исследовании, но этого было сделать нельзя из-за влияния помех.

В [1, 2] предполагалось, что помехами являются аддитивные шумы, неизменно сопровождающие любые опыты в акустике, а также сигналы, рассеянные на границах водоема или внутри него различными рассеивателями. Однако, как показано в [3], в этом опыте сигнал излучателя обладал столь большим уровнем, что влиянием аддитивной помехи можно пренебречь сравнительно с уровнем помех, вызванным рассеянием. Поэтому мы в дальнейшем будем принимать во внимание только помеху, обязанную своим происхождением рассеянию на взволнованной поверхности водоема. Эта помеха в условиях данного опыта подробно рассмотрена в [5]. Помеха, вызванная другими рассеивателями, мала сравнительно с помехой, вызванной поверхностным волнением, так как она стабильна во времени и подавляется фильтром низких частот [1].

Вдоль трассы перемещения объекта локации его сигнал сильно убывает из-за направленности его излучения, а помехи при выделении сигнала методами, развитыми в [1, 2], не убывают. Использование горизонтальной антенны, предложенное и реализованное в [3], кардинально изме-

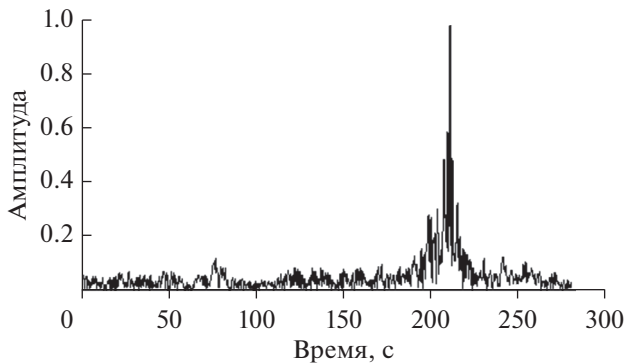


Рис. 1. Результат натурального опыта по рассеянию вперед, сигналы которого выделялись когерентно вдоль всей трассы прохода объекта локации.

нило эту ситуацию. Оказалось, что применение горизонтальной антенны, реализованное в [3], приводит к тому, что помеха вдоль трассы перемещения объекта локации убывает даже несколько больше, чем сигнал. В результате подход оказался применим, и было получено изображение рассеивателя в каждой точке трассы его движения, а не только в точке максимального рассеяния. При этом использование горизонтальной антенны, предложенное в [3], привело к тому, что качество изображений рассеивателя, полученных с помощью развитого подхода, фактически оказалось не хуже, а даже несколько лучше изображений, полученных в [1–3] только лишь в единственной точке трассы, в которой был максимальным сигнал, рассеянный объектом локации.

В результате первоначально поставленная задача выяснить влияние дна на форму выделяемого сигнала была успешно решена, но решение оказалось неожиданным. Неровности дна на форму сигнала оказывают значительно меньшее влияние, чем сигнал, рассеянный взволнованной поверхностью.

Решение этой задачи позволило получить изображение рассеивателя в каждой точке трассы, что дало возможность найти протяженный отклик на рассеянный сигнал длиной во всю трассу его перемещения. Этот отклик значительно надежнее как отклика в одной точке трассы, так и сжатого отклика, полученного в [3] вдоль всей трассы, так как ни шум, ни помеха не могут принять вид сигнала, в силу чего нет ложных тревог.

Важно и то, что при достаточно мощном сигнале излучателя ни одна из двух имеющихся помех в виде неровностей дна и влияния сигнала, рассеянного взволнованной поверхностью, не в состоянии маскировать отклик на проход сигнала рассеивателя, выделяемого методом, описанным в настоящей статье, а может только изменить его форму и добавить к нему спекл-шум, не влияющий на качество обнаружения прохода рассеива-

теля. Так что описываемый метод, ликвидируя ошибку ложной тревоги, гарантирует то же самое и для вероятности пропуска обнаружения прохода, что невозможно при обнаружении импульсного сигнала в шуме или среди помех, а все прежние методы обнаружения прохода рассеивателя при локации на просвет сводились именно к этому [1–3].

НАБЛЮДЕНИЕ СИГНАЛА ПРОХОДА РАССЕИВАТЕЛЯ В ЦЕНТРЕ ТРАССЫ

Начнем изложение с результата только что законченной работы [3], с которого началось настоящее исследование.

На рис. 1 показан результат опыта по локации на просвет, полученный в [3]. Мы не будем здесь повторять то, что уже описано в [3] относительно этого опыта, а только обозначим возникшую при этом проблему. Результат выделения, показанный на рис. 1, неплохой, а проблема в том, что он согласно расчетам, приведенным в [3], не должен быть таким, а должен выглядеть иначе. Согласно расчетам, приведенным в [3], в отклике на проход рассеивателя должен быть не один короткий импульс, а два, следующие один за другим примерно через 10 с. В силу каких-то причин этого не получилось. Не только интересно, а и важно выяснить, каковы эти причины, так как возможно, что в других условиях так хорошо не будет, а получится много хуже. Чтобы этого не случилось, надо выяснить причину получившегося отклонения формы отклика на проход объекта локации, полученного в опыте и показанного на рис. 1, от того, что должно быть.

Была гипотеза, что отклонение формы отклика возможно связано с тем, что дно, от которого сигнал многократно отражается, чрезвычайно неровное. На рис. 2 показана схема озера, в котором был произведен этот опыт с изобарами глубин, по которым видно, что глубина и уклоны дна водоема сильно изменяются вдоль трассы распространения сигнала.

В [3] приведено возможное объяснение картины, наблюдаемой в опыте, основанное на предположении, что многократные отражения от дна приводят к интерференции двух сигналов прохода рассеивателя. Это вызвано тем, что дно сильно искривлено, так что в опыте был не один луч, соединяющий излучатель и приемник, а два луча, которые в том месте, где перемещался рассеиватель, отстояли один от другого на расстояние вдоль горизонта порядка 5 метров, а использование синтеза апертуры позволяет разрешать эти лучи. Это предположение объясняет наблюдаемый в опыте эффект, но оно чрезвычайно маловероятно, и не только из-за того, что время между двумя проходами рассеивателя точно равно времени прохода рассеивателя на его собственную

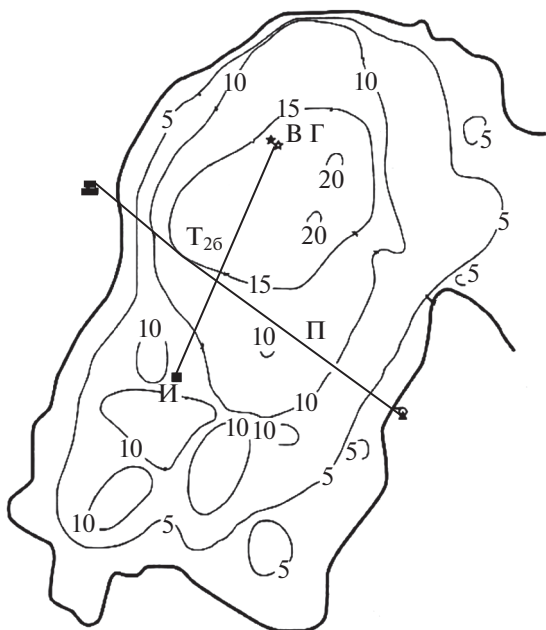


Рис. 2. Карта озера, на котором выполнен опыт, с изобарами глубин через 5; 10; 15 и 20 метров. На схеме обозначено: И – излучатель, Г – горизонтальная антенна, В – вертикальная антенна, П – трасса перемещения объекта локации.

длину. Чтобы эти два луча могли быть разрешены синтезом апертуры, они должны существовать во все время прохода рассеивателя и быть все это время равными при отражениях луча от разных участков дна. Это тоже вряд ли возможно. Данное предположение объясняет результат опыта, но является лишь достаточным условием для такого объяснения, не являясь необходимым. Перед нами стояла задача определить, как в действительности обстояло дело в этом опыте. Эта задача была нами решена с получением неожиданного результата: дно, даже такое неровное, ни при чем, и не оно изменяет форму выделенного сигнала объекта локации. В процессе решения этой задачи мы получили новые результаты, которые для локации на просвет значительнее, и намного значительнее решения первоначально поставленной задачи. Поэтому настоящая статья в основном посвящена решению другой, более важной и даже, как оказалось, значительно более простой задачи.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ

Для решения первоначально поставленной задачи, относящейся к тому как влияют неровности дна на выделение сигнала объекта локации, надо было использовать иной подход к локации на просвет, учитывающий особенности и детали процесса выделения сигнала. В основе развиваемого подхода к выяснению деталей процесса вы-

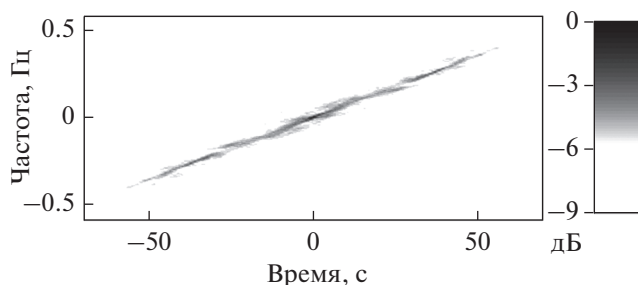


Рис. 3. Спектр частот Доплера в сигнале прохода объекта локации, полученный методом Вигнера–Вилля [6].

деления сигнала при локации на просвет был использован известный факт наличия в рассеянном сигнале частоты Доплера.

На рис. 3 показан спектр доплеровских частот, полученный с предельно высоким разрешением по частоте, равным 0.007 Гц, с сохранением текущей локализации сигнала во времени методом Вигнера–Вилля [6]. По этому спектру можно сказать, где находится рассеиватель в данный момент времени, рассеивая при этом сигнал, смещенный по частоте на конкретную частоту Доплера. А можно по наблюдаемой частоте Доплера локализовать положение рассеивателя в данный момент времени.

Развиваемый нами в настоящей статье подход к локации на просвет использует указанную возможность локализовать рассеиватель по его доплеровскому спектру. Эта возможность была известна и тогда, когда проводились опыты, но использовать ее мешала помеха. Вот как это описано в [1]: “Прямая проверка, т.е. наблюдение в эксперименте, например, временной зависимости $P_d(t)$ и ее сравнение с (1) (имеется в виду сравнение сигнала с его математической моделью – В.З.) была невозможной из-за малости дифрагированной компоненты по сравнению с остаточными флуктуациями прямого сигнала”.

Последующие исследования [3] показали, что эти “остаточные флуктуации прямого сигнала” отсутствуют, но их роль восполняют сигналы многих лучей, отраженных от взволнованной поверхности. Эта разница в происхождении помех сути дела не изменяет, так как все сигналы – как флуктуации прямого сигнала (если они есть), так и сигналы, рассеянные поверхностью (а они есть), приходят с одного горизонтального направления, а именно – от излучателя, и выказанные в [1] опасения полностью справедливы для тех методов и приемов выделения сигнала рассеивателя, которые были известны и использовались в то время.

Тогда в [1, 2] тоже использовалась горизонтальная антенна, и использовалась столь же эффективно как и в [3], но только иначе. В [1, 2] сиг-

нал объекта локации на просвет сначала полностью выделялся каждым отдельным приемником антенны. Эти приемники не направлены, и каждый из них принимает как сигнал от объекта локации, так и сигнал, исходящий от направления на излучатель, в котором содержится помеха. При перемещении объекта локации его сигнал ослабевает в силу направленности его излучения, а сигнал помехи, исходящий все время со стороны излучателя, не убывает с перемещением рассеивателя. А если помеха не убывает, то она подавит в каждом отдельном приемнике сигнал рассеивателя, как только последний станет много меньше своего максимального значения. Но это подавление существует только до тех пор, пока в дело не вступила вся антенна. Она вступает в дело путем когерентного сложения сигналов приемников, в каждом из которых уже выделен сигнал объекта локации, подавленный помехой. При когерентном накоплении сигналов вдоль всей антенны помеха в каждом выделенном сигнале подавляется, и сигнал накапливается вдоль всей трассы его перемещения уже с ослабленной помехой. Но при этом антенна участвует только при накоплении сигнала вдоль всей трассы, что не дает возможности выделить сигнал в отдельных точках трассы.

В [3] был предложен и применен принципиально иной способ использования горизонтальной антенны при выделении сигнала рассеивателя, отличающийся тем, что операция выделения сигнала посредством его свертки с сигналом математической модели совершалась после того, как сигнал был уже выделен антенной. С этой целью антенна на всем протяжении пути рассеивателя фазирована в соответствии с положением рассеивателя в данный момент времени, и так, чтобы максимум диаграммы ее направленности был все время направлен надвигающийся объект локации. Это привело к тому, что помеха, которая идет с направления на излучатель, в каждый момент времени попадает на антенну только через боковое поле антенны, т.е. в ослабленном виде. Это кардинально изменило ситуацию с выделением сигнала вдоль траектории его движения. При таком способе выделения сигнала объекта локации он защищен от помех с помощью антенны на всем протяжении трассы его перемещения.

В результате получается, что уровень сигнала убывает вдоль трассы движения рассеивателя благодаря убыванию бокового поля диаграммы направленности рассеивателя. Уровень помех при выделении сигнала антенной по [3] тоже убывает благодаря убыванию бокового поля направленности антенны. Поэтому вдоль трассы идет соревнование двух боковых полей: бокового поля антенны и бокового поля рассеивателя. Эти поля убывают примерно одинаково, если учесть, что источником сигнала является сферическая вол-

на, а рассеиватель находится от источника этой волны на вдвое меньшем расстоянии, чем антенна, и апертуры у них тоже различаются примерно вдвое.

Сказанное выше подтверждает результат опыта. На рис. 3 показан фурье-спектр того самого $P_d(t)$, который согласно [1] наблюдать в эксперименте было нельзя. Оказалось же, что получить фурье-спектр того, чего наблюдать прежде было действительно нельзя, вполне возможно с помощью способа использования горизонтальной антенны, описанного в [3], о чем свидетельствует рис. 3, полученный с использованием горизонтальной антенны по способу, описанному в [3].

Развиваемый в настоящей работе подход к локации на просвет основан на возможности получить изображение рассеивателя в момент, когда он излучает доплеровские частоты. Когда рассеиватель излучает значительную полосу доплеровских частот, то по его доплеровскому спектру можно получить его изображение, и оно будет соответствовать тому времени и положению объекта локации, в котором излучались соответствующие доплеровские частоты. Это даже доказывать и показывать не надо, так как и показ, и рассказ уже опубликованы в [1, 2]. Там получены сигналы прохода рассеивателя в полосе доплеровских частот, тесно примыкающих к нулю. Вклад остального спектра незначителен, так как остальной спектр сильно ослаблен диаграммой направленности излучения протяженного рассеивателя. Но этот спектр, сильно убывая, остается при выделении его антенной согласно [3] меньше помехи, которая тоже убывает. Поэтому оказалось, что весь спектр нам доступен, и мы можем получить изображение рассеивателя, воспользовавшись для этого моделью Б на любой выделенной полосе доплеровских частот, а следовательно, при всех положениях рассеивателя на трассе его перемещения. На рис. 4 показано, что уровень спектра помех во всем спектре частот Доплера ± 0.5 Гц не превышает уровня спектра суммы помехи и рассеянного сигнала.

На рис. 4 показан уровень спектра всего сигнала, выделенного антенной как во время прохода рассеивателя, так и в отсутствие этого прохода. Чтобы можно было сравнивать эти уровни между собой, на рис. 4б показан не уровень спектра сигнала при отсутствии прохода рассеивателя, а результат вычитания этого уровня из уровня того же сигнала, но во время прохода рассеивателя. Спектр сигнала прохода рассеивателя лежит в полосе частот ± 0.5 Гц. Вне этой полосы частот сигнала рассеивателя нет. Как видно из рис. 4, внутри этой полосы частот наблюдается превышение уровня спектра при проходе рассеивателя на 5 или даже 10 дБ на протяжении всей полосы частот доплеровского спектра сигнала рассеивателя. Это

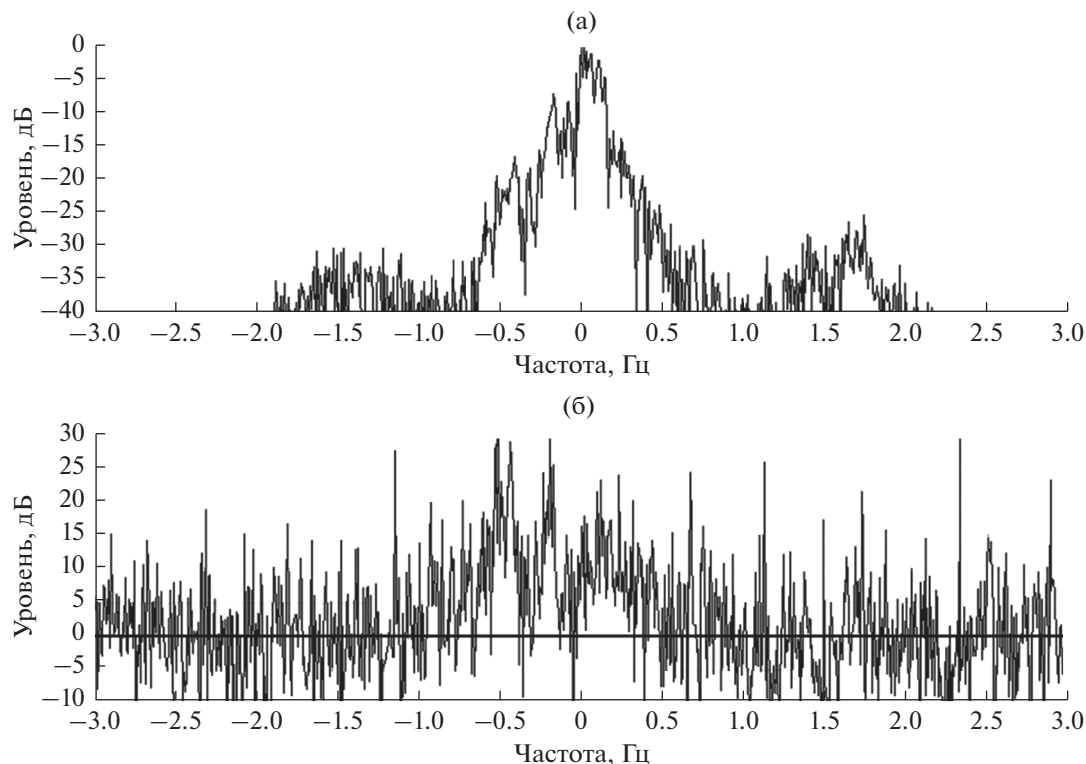


Рис. 4. Модуль спектра сигнала прохода рассеивателя, выделенный антенной (а), и результат вычитания из него помехи (б).

означает, что несмотря на значительное падение уровня сигнала рассеивателя при его удалении от центра трассы, его сигнал превышает уровень сигнала помехи, что позволяет корректировать уменьшение сигнала рассеивателя с эффектом сохранения информации, получаемой от рассеивателя вдоль всей траектории его движения.

Изображение получается в результате свертки, что означает формирование этого изображения произведением спектра сигнала рассеивателя, показанного на рис. 4, и спектра сигнала математической модели (5). Этот спектр, формирующий изображение рассеивателя, показан на рис. 5 в том же формате, в котором показан спектр сигнала рассеивателя на рис. 4.

Как видно из рис. 5, на формирование изображения рассеивателя оказывает влияние лишь та часть спектра помехи, которая лежит в той области спектра, где уровень сигнала рассеивателя превышает уровень помех. Это, судя по величине превышения уровня сигнала над помехой вдоль всего спектра, обеспечивает получение изображения рассеивателя того же качества, которое получено в [1, 2], не только при положении максимального рассеивания, а и при всех иных положениях рассеивателя на трассе. Все эти изображения получены по спектру, полученному за все время прохода, и все эти изображения приведены к одному моменту времени.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТРАССЫ ПРОХОДА РАССЕИВАТЕЛЯ

Результат наблюдения за изображением рассеивателя по его доплеровской частоте показан на рис. 6. На нем показано изображение рассеивателя, полученное при излучении в среду непрерывного зондирующего сигнала частоты 2499 Гц, в интервале частот Доплера шириной 0.143 Гц, что занимает 20 с времени движения рассеивателя. Изображения получены с шагом в 0.007 Гц или примерно 1/140 от полного времени перемещения рассеивателя.

По рис. 6 можно восстановить влияние неровностей дна. Эти неровности изменяют ход луча в том месте, где этот луч пересекает движущийся равномерно по трассе рассеиватель. Вследствие этого наблюдаются отклонения положения изображения рассеивателя от того единого времени, к которому отнесены все изображения рассеивателя. Это изображение окружают сигналы, обладающие доплеровской частотой.

Рассмотрим, что это за сигналы. Эти сигналы могут быть только сигналами, рассеянными взволнованной поверхностью водоема, так как никаких иных сигналов в этом опыте нет. Сигналы, рассеянные взволнованной поверхностью водоема, достигают антенны, отразившись от поверхности водоема и от его дна, причем многократно. Эти сигналы исходят по горизонтальному

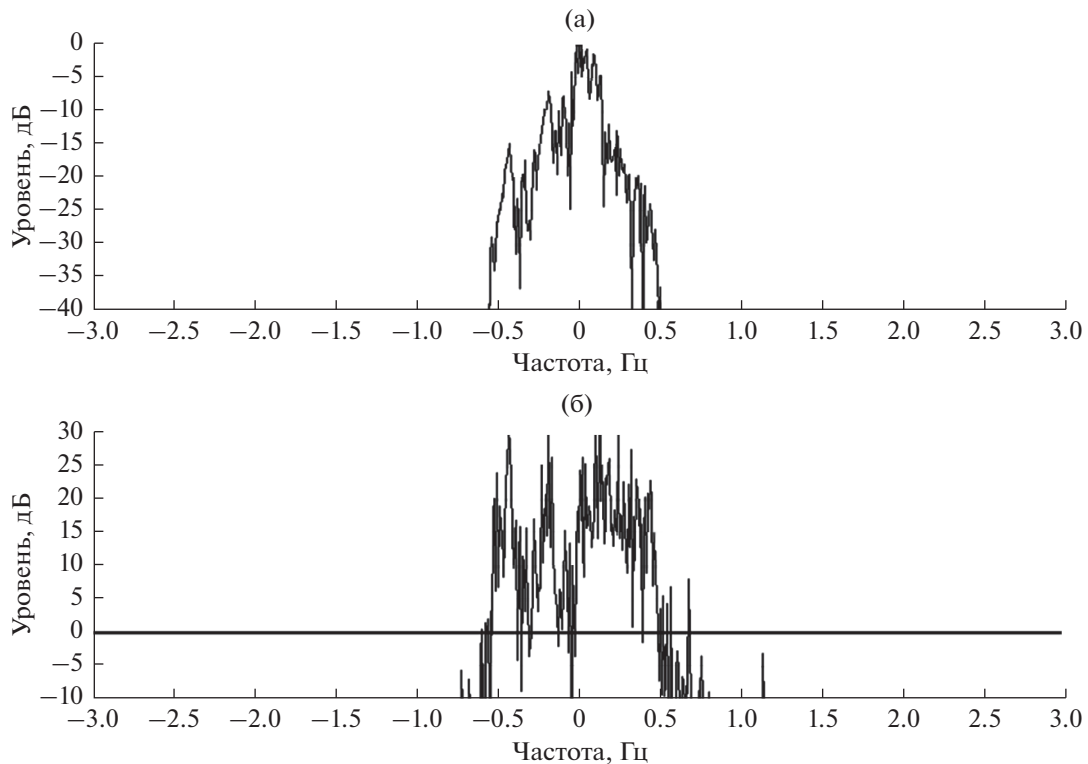


Рис. 5. Спектр сигналов, формирующих изображение рассеивателя: (а) при проходе рассеивателя, (б) разность уровней спектров при проходе рассеивателя и в его отсутствие.

направлению от излучателя, который в этом опыте не абсолютно точечный, так как сигналы от него, отражаясь от неровностей дна, тоже отклоняются по азимуту. Правда, эти отклонения не постоянны, так как сигнал многолучевой, разные лучи имеют свои неоднородности по азимуту и, интерферируя между собой, создают сложную временную картину изображения источника, размытого отражениями от неровного дна по-разному в разное время в зависимости от результатов интерференции. Доплеровские частоты этих сиг-

налов случайно распределены и могут возникать в разное время. Поэтому эти сигналы окружают сигнал рассеивателя в виде фона, распределенного хаотичным образом во времени.

Есть одна существенная черта указанных сигналов, состоящая в том, что они примыкают к сигналу рассеивателя. Почему так получается, что эти сигналы имеют вид облака, окружающего изображение рассеивателя, а вне рассеивателя они значительно слабее? Это происходит потому, что этот шум принимается от излучателя боковым полем антенны, максимум которой направлен в этот момент на излучатель. Поэтому вблизи изображения рассеивателя мы имеем сумму двух сигналов, а если рассеивателя нет, то мы имеем всего один сигнал, рассеянный взволнованной поверхностью. Поэтому при отсутствии рассеивателя шум, вызванный рассеянием, становится меньше, а при наличии рассеивателя этот шум возрастает. Это важно, так как дает возможность определять наличие прохода рассеивателя даже не по самому сигналу, а по увеличению шума. Возможно, это в каком-то случае и может понадобиться.

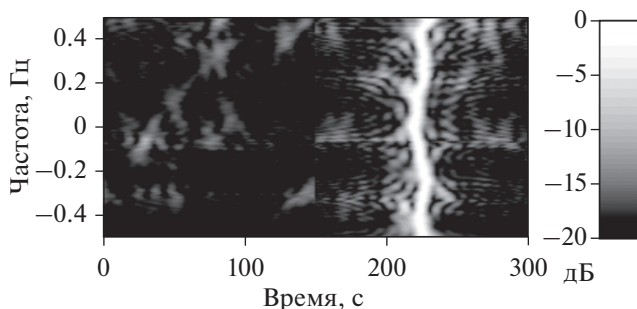


Рис. 6. Изображение рассеивателя в процессе его перемещения вдоль трассы. Сигнал нормирован на значение его максимума в каждой отдельной строке рисунка (значение частоты Доплера в сигнале объекта локации).

На рис. 7 показаны смещения прихода луча по времени, вызванные отклонениями луча вдоль горизонтали, которые действительно имели место в опыте вследствие неровного дна. Эти отклонения лежат в пределах порядка 10 с, и они прак-

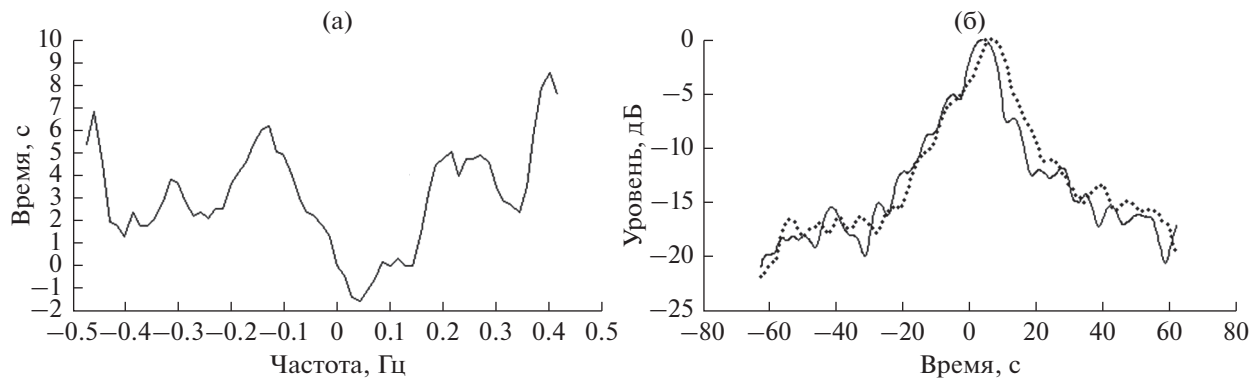


Рис. 7. (а) Величина смещения во времени изображения рассеивателя $\Delta(t)$ в результате отражения луча от неровного дна, (б) результат некогерентного накопления сигналов по доплеровским частотам с компенсацией смещений (сплошная линия) и без компенсации (пунктир).

тически не оказывают влияния на результат некогерентного накопления изображений, полученных с малым разрешением в одной точке трассы. Однако при когерентном накоплении вдоль всей трассы может быть иначе.

Обратим внимание на то, что визуализация всей трассы прохода рассеивателя, показанная на рис. 6, служит отличным средством обнаружения факта прохода рассеивателя. Заметим, что такой способ обнаружения необычен тем, что он совсем не имеет никаких ложных тревог. Это справедливо не только при рассматриваемых здесь помехах, вызванных рассеянием волн на взволнованной поверхности водоема, но и при любых импульсных помехах, достаточно редких. Сильный аддитивный шум, конечно, способен полностью замаскировать сигнал прохода, но он не может его имитировать. Чтобы не было маскировки сигнала прохода, сигнал излучателя должен иметь достаточно большой уровень — такой, при котором аддитивным шумом, способным маскировать сигнал, можно пренебречь, как получилось в этом опыте согласно [3].

Любое, сколь угодно эффективное обнаружение прохода рассеивателя в виде короткого импульса не является столь надежным. Это происходит потому, что помехи при локации на просвет тоже импульсные, но они в отличие от аддитивных тепловых шумов не обладают знаменитым ограничением по уровню в 3σ , а практически ограничены только мощностью излучателя, вследствие чего критерии обнаружения, установленные для обычного гауссова шума, при локации на просвет не всегда работают. Поэтому выделение сигнала при локации на просвет в виде коротких импульсов, подобных тем, которые приведены в [1–3], не всегда надежно. Надежными сигналами при обнаружении факта прохода являются сигналы, форма которых значительно

отличается от формы сигналов, формируемых помехами.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Приведем использованную нами математику, следуя [3]. Будем исходить из того, что мы располагаем комплексными амплитудами приемников с номерами k горизонтальной антенны как функциями времени t , которые запишем в виде $P_k(t)$. Для начала получим угловой спектр горизонтальной антенны. Для получения углового спектра антенны к сигналам приемников антенны применим преобразование Фурье, которое имеет вид

$$W(t, \alpha) = \sum_k P_k(t) \exp\left(i \frac{2\pi d}{\lambda} k \cos(\beta) \sin(\alpha)\right), \quad (1)$$

где λ — длина волны; d — расстояние между приемниками антенны; α , β — углы, под которыми приходит сигнал к антенне: α — в горизонтальной плоскости, β — в вертикальной плоскости. Угол α отсчитывается от нормали к антенне, а β от горизонтали. Угол β является постоянным во время опыта, так как весь опыт протекает в одном луче, а угол α изменяется при движении рассеивателя.

Теперь сделаем так, чтобы антенна своим главным максимумом была направлена на движущийся рассеиватель, трасса которого определяется немногими параметрами. Их можно точно подобрать, наблюдая за уровнем сигнала антенны вдоль трассы движения рассеивателя. Для этого следует учесть геометрию опыта. Полный учет геометрии опыта приведен в [2], и здесь нам нет необходимости его повторять. Мы ограничимся случаем, когда трасса перемещения рассеивателя нормальна по отношению к линии, соединяющей излучатель и приемник. Это соответствует геометрии рассматриваемого здесь опыта. В этом

случае рассеиватель расположен по отношению к антенне под углом α , синус которого равен

$$\sin(\alpha) = \frac{v(t - t_a)}{\sqrt{R^2 + v^2(t - t_a)^2}}, \quad (2)$$

где t_a – время пересечения объектом локации нормали к антенне, проведенной из центра антенны; v – скорость движения рассеивателя по трассе его движения; R – расстояние от точки приема до трассы движения рассеивателя вдоль линии, соединяющей излучатель и приемник.

Подставив (2) в (1), мы получим сигнал на выходе антенны от точки, расположенной на рассеивателе, что нам и надо для восстановления трассы перемещения рассеивателя. Выход антенны в этом случае зависит только от времени и имеет вид

$$W(t) = \sum_k P_k(t) \exp(ikQ(t - t_a)), \quad (3)$$

где

$$Q(t - t_a) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{v(t - t_a)}{\sqrt{R^2 + v^2(t - t_a)^2}} d \cos(\beta). \quad (4)$$

Для выделения сигнала прохода рассеивателя из (3) мы будем использовать модель Б [3]. Эта модель представляет собой сигнал антенны, полученный при рассеянии точечным рассеивателем, движущимся вдоль трассы перемещаемого протяженного рассеивателя. Как показано в [3], модель Б дает возможность выделять сигнал рассеивателя не хуже, а даже лучше использованной в [1, 2] модели А, но она содержит меньше параметров, и поэтому предпочтительнее модели А. Сигнал модели Б согласно [3] запишем в виде

$$S(t) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{R^2 + v^2 t^2} + \sqrt{Z^2 + v^2 t^2}\right)\right), \quad (5)$$

где Z – расстояние от излучателя до трассы движения рассеивателя вдоль линии, соединяющей излучатель и приемник.

Для выделения сигнала рассеивателя надо согласно [1–3] свернуть сигналы (3) и (5) посредством

$$F(\tau) = \sum_t W(t) \overline{S(t - \tau)}, \quad (6)$$

где черта сверху означает комплексное сопряжение.

Полученная в результате (6) функция является изображением рассеивателя, так как использованная нами при выделении рассеянного сигнала модель Б позволяет получать такое изображение [3]. Однако это изображение сформировано сигналом вдоль всей трассы перемещения рассеивателя. Фактически оно сформировано только частью этой трассы, так как не весь спектр функции $W(t)$ сильно убывает с увеличением частоты Доплера, и он весьма слабо участвует в формировании изображения (6). На рис. 5 показан модуль спек-

тра (6), который формируется произведением спектров как $S(t)$, определяемой (5), так и $W(t)$. А так как спектр $S(t)$ равномерный, то неоднородности всего спектра (6) относятся только к спектру $W(t)$. На рис. 5 видно, что главная часть спектра $W(t)$ примыкает к нулевым частотам, а это значит, что изображение, формируемое (6), показывает объект в том его положении, в котором его спектр Доплера близок к нулевым частотам, а именно в положении, примыкающем к линии, соединяющей излучатель и антенну (ее центр).

Если мы хотим увидеть рассеиватель, находящийся в другом положении на трассе, то надо в спектре (6) выделить некоторую полосу частот, где частоты Доплера соответствуют тому положению рассеивателя, в котором мы хотим видеть его изображение на трассе его движения. Для получения изображения рассеивателя надо совершить обратное преобразование Фурье от выделенной частоты спектра. В этом случае мы получим изображение рассеивателя в том его положении на трассе, которое нас интересует. А если мы хотим восстановить вид рассеивателя вдоль всей трассы, то мы должны проделать эту операцию вдоль всей трассы движения рассеивателя с некоторым шагом, длина которого меньше выделенной полосы частот. Аналогичная математическая операция производится с речевым сигналом и называется “видимая речь”. Только там выбирается интервал времени, а не полоса частот, и вычисляется спектр, а не функция времени. Но преобразование Фурье является симметричным по отношению к частотам и времени, поэтому практически в видимой речи используется тот же самый математический прием, который использован нами при восстановлении изображения рассеивателя вдоль всей траектории его движения.

Математически эту операцию можно записать следующим образом:

$$g(f) = \Phi[W(t)], \quad (7)$$

$$H(f, j) = 1, \text{ если } j < f < j + \Delta f, \quad (8)$$

$$H(f, j) = 0, \text{ если } f < j \text{ или } f > j + \Delta f, \quad (9)$$

$$G(t, j) = \Phi^{-1}[g(f)H(f, j)], \quad (10)$$

где Φ – функционал, обозначающий прямое преобразование Фурье от функции в квадратных скобках, а Φ^{-1} – функционал, который означает обратное преобразование Фурье от функции, стоящей в квадратных скобках; j – частота Доплера в той точке трассы, в которой мы хотим восстановить изображение рассеивателя; Δf – ширина полосы доплеровских частот, в области которых мы восстанавливаем изображение рассеивателя.

Действуя вышеописанным путем, мы получаем возможность сформировать изображение рассеи-

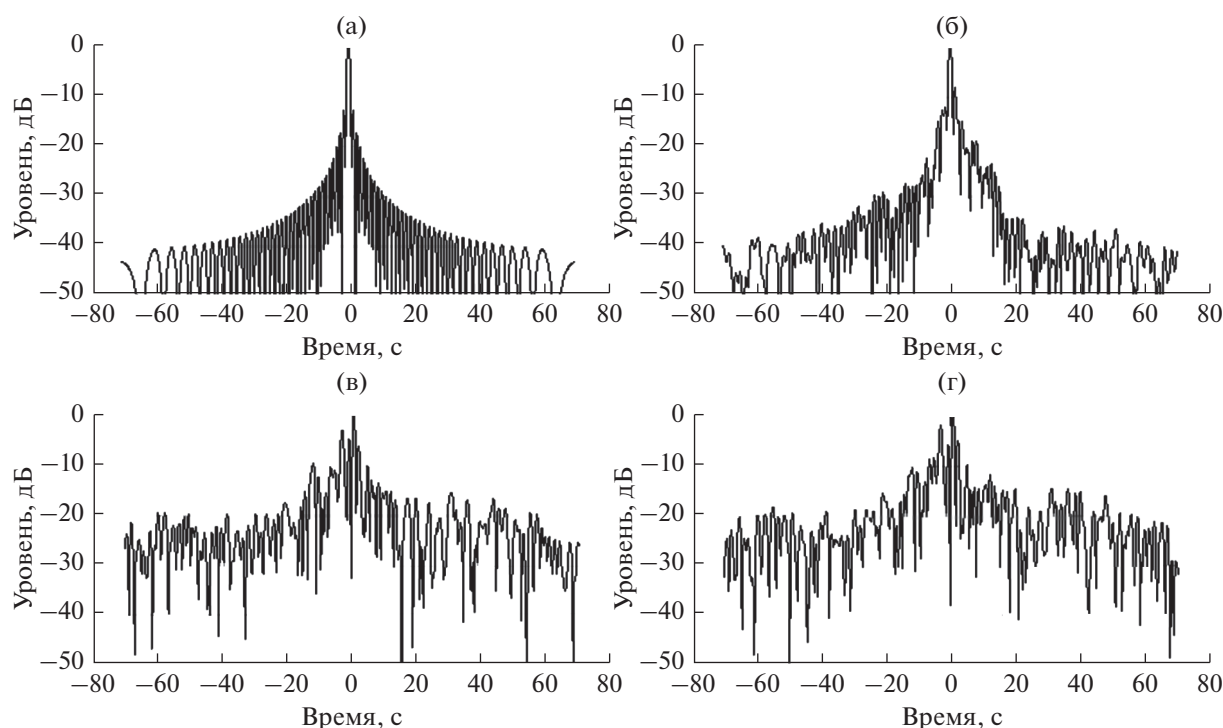


Рис. 8. Вид сигнала прохода рассеивателя: (а) выделенного идеально без помех по (б); (б) с учетом помех только от неровного дна по (11); (в) в опыте; (г) в опыте с компенсацией помех от неровного дна.

вателя в виде функции (10) вдоль всей его траектории движения на основе изображения (б) операциями с (7) по (10). При этом появляется возможность уравнивать все полученные изображения по амплитудам, пронормировав их на уровень максимального сигнала (10) в каждой полосе частот j .

Вышеприведенные расчетные соотношения приведены в том виде, в котором они использованы в настоящей статье. При этом предполагается, что объект локации пересекает луч под прямым углом. Это частный случай возможной геометрии данного опыта. Формулы, описывающие общий случай пересечения трассой движения рассеивателя луча под любым углом, содержатся в [1, 2], и приводить их здесь нет необходимости.

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ДНА НА КОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ СИГНАЛА

Теперь остановимся на решении первоначально поставленной задачи, а именно – выяснению влияния неровностей дна на обнаружение прохода объекта локации путем его выделения когерентным накоплением вдоль всей трассы его движения, как это показано на рис. 2. Этот вопрос нельзя рассмотреть, используя только сигналы опыта, так как последние искажены добавлением сигналов, рассеянных взволнованной поверхностью водоема. Поэтому для рассмотрения эффек-

тов, связанных только с неровным дном, следует использовать наряду с сигналами опыта также и математическое моделирование, чтобы увидеть эффект, создаваемый неровностями дна без влияния на него сигнала, рассеянного поверхностью.

Для математического моделирования мы воспользуемся моделью Б, представленной (5). Влияние дна в чистом виде без добавления добавочных сигналов можно описать формулой (5), добавив $\Delta(t)$ – задержку сигнала от времени, полученную в опыте и показанную на рис. 6а.

Итак, мы имеем чистый сигнал, на который не влияют никакие помехи, имеющий вид $S(t)$, и сигнал, на который влияет только неровное дно, и влияет точно так, как оно влияет в опыте, изменяя время приема сигнала антенной от движущегося рассеивателя. Влияние неровностей дна описывается формулой вида

$$D(t) = S(t + \Delta(t)), \quad (11)$$

где $\Delta(t)$ – смещение луча во времени, полученное в опыте и показанное на рис. 7.

Влияние дна определим на основании (6) как изменение результата (6) при замене в ней сигнала опыта $W(t)$ на $D(t)$ по (11). Получим

$$Fd(\tau) = \sum_t D(t) \overline{S(t - \tau)}. \quad (12)$$

Результат вычислений показан на рис. 8. На этом рисунке видно, как реально может повлиять

неровное дно, имеющееся в опыте, на выделение сигнала рассеивателя вдоль всей траектории его движения. Полученный результат (рис. 8б) показывает, что это влияние незначительное, и им можно пренебречь, так как оно только делает сигнал на выходе случайным, не изменяя фактически ни степени его сжатия, ни уровня бокового сигнала, который остался на том же уровне — около -40 дБ от максимума, — который получается и при абсолютно чистом сигнале без всяких помех. В опыте сигнал сжат почти так же сильно, но его уровень сравнительно с уровнем бокового сигнала упал на 20 дБ. Это показывает, что другая помеха, которая есть в опыте, значительно сильнее влияет на результат накопления сигнала вдоль всей его траектории движения, чем исключительно неровное дно, которое есть в этом опыте. Из этого можно сделать важный вывод, что неровное дно при многократных отражениях от него не вносит существенных корректив в обнаружение сигнала. Основной помехой оказываются не неровности дна, как это считалось ранее на основании умозрительных заключений, а совсем иное: рассеяние на поверхностном волнении.

ВЫВОДЫ

В результате мы выяснили реальное влияние значительных неровностей дна на результат выделения сигнала рассеивателя. Установлено, что даже такое сильно неровное дно, какое было в этом опыте, не приводит к значительному увеличению спекл-шума при когерентном накоплении вдоль всей траектории. Практически весь спекл-шум, наблюдаемый в этом опыте, обязан своим происхождением сигналу, рассеянному взволнованной поверхностью водоема.

Используя восстановленные изображения рассеивателя, мы получаем визуализацию всей трассы перемещения рассеивателя, а это является надежным способом его выделения. Этот способ замечателен тем, что вид сигнала прохода рассеивателя, полученный таким образом, никакая помеха не может ни принять, ни замаскировать, вследствие чего отсутствуют как ошибки ложных тревог, так и ошибки пропуска искомого сигнала.

Автор признателен П.И. Коротину и А.И. Малеханову за интерес к работе и поддержку.

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. *Зверев В.А.* Два феномена при локации на просвет // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 4. С. 454–467.
4. *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.
5. *Лебедев А.В., Салин Б.М.* Исследования эффектов локализации областей рассеяния звука на ветровом волнении // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 813–826.
6. *Козн Л.* Время-частотные преобразования. Обзор // ТИИЭР. 1989. Т. 77. № 10. С. 72–120.