

УДК 621.31.535.2

ФОКУСИРУЕМАЯ АНТЕННА В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

© 2004 г. В. А. Зверев

*Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru
Статья поступила 16.09.2002 г.*

Рассмотрена фокусировка поля акустической антенной в сильно неоднородной стационарной среде. Показана возможность определения координат ряда объектов путем активной локации. Предполагается, что объекты локации при их облучении волной с произвольным волновым фронтом рассеивают сферические волны и отстоят друг от друга по дистанции и/или по углу так, что легко разрешаются той же антенной в однородной среде. Процедура определения координат объектов локации предусматривает применение обращения волнового фронта для разделения сигналов от различных объектов. Определение координат производится методом оценки параметров для каждого объекта в отдельности. Показана высокая эффективность выделения аргумента комплексного сигнала для процедуры оценки параметров. Приведены результаты численного моделирования задачи и ее решения.

Фокусируемая антенна особенно эффективна при большой апертуре с большим числом приемных элементов. Однако такие антенны весьма чувствительны к однородности среды. Неоднородности среды могут быть достаточно плавными, чтобы не вызывать больших потерь энергии на многократное рассеяние, но в то же время такими, которые безнадежно портят изображение, получаемое с помощью фокусируемой антенны с большой апертурой. В [1] рассмотрен метод, позволяющий устранять искажения, получающиеся в результате прохождения волны через тонкий слой достаточно интенсивных неоднородностей. Толщина слоя в [1] должна быть такова, чтобы вносимые им искажения не зависели бы ни от дальности, ни от угла, под которыми располагаются различные объекты. Метод применим и для фокусируемой антенны. В [2] рассмотрена задача о получении акустического изображения антенной, расположенной в толстом слое неоднородностей среды, когда объекты, имеющие различные координаты, получают свои искажения. Однако при рассмотрении предполагалось, что все объекты локации располагаются в дальней зоне антенны, и специфика фокусируемой антенны не учитывалась. В настоящей работе рассмотрена работа фокусируемой антенны, помещенной в толстый слой неоднородностей, когда каждый объект имеет свои искажения.

Получение изображения объектов антенной, расположенной в толстом слое неоднородностей, основано на том, что различные объекты могут быть отделены друг от друга с помощью обращения волнового фронта (ОВФ) [3]. Процедура

ОВФ в акустике [3] состоит из двух этапов. На первом этапе одним из элементов приемно-излучающей антенны производится излучение импульса. Этот импульс, пройдя через неоднородную среду, достигает объектов локации и рассеивается на них. Объекты предполагаются такими, что поле, рассеиваемое каждым из них, представляет собою сферическую волну. Эти волны, снова пройдя через неоднородную среду, приходят на антенну. Второй этап состоит в том, что сигналы, пришедшие к антенне, запоминаются, а затем излучаются вновь в виде сигналов, комплексно сопряженных с принятыми и с измененным на обратное направлением хода времени по отношению к принятому сигналу. В результате в среду излучаются волны с обращенным волновым фронтом. Вновь пройдя через ту же самую среду, волны с ОВФ компенсируют накопившиеся новые искажения старыми и приходят к каждому объекту в виде сферических волн.

Эти волны вновь рассеиваются объектами и приходят к антенне через неоднородную среду. Отличие этого сигнала от предыдущего состоит в том, что от каждого объекта теперь приходит сигнал с удвоенным уровнем, так как рассеиваясь, волны вновь получают множители, определяемые силой цели каждого объекта. На этом явлении основано выделение каждого из рассеянных сигналов в отдельности с помощью ОВФ.

Сначала выделяется самый сильный сигнал. Процедура выделения самого сильного сигнала подробно описана и проиллюстрирована с помощью эксперимента в [3]. Она основана на многократном использовании (итерациях) ОВФ. При

Таблица 1

n	1	2	3
W_n	6	2	0.5
U_n	12	38	57
R_n	6.15L	8.9L	16L
y_n	24	16	8

каждой итерации принимаемые сигналы получают дополнительный множитель, равный амплитуде соответствующего рассеянного сигнала. В результате этого сильный сигнал усиливается по сравнению с остальными сигналами при каждой следующей итерации. Тем самым, выполнив нужное число итераций, можно практически выделить один сигнал. Этот сигнал запоминается для дальнейшей обработки с целью определения параметров сильного сигнала.

В [2] описан и численно иллюстрирован метод ОВФ, с помощью которого можно убрать самый сильный сигнал и при помощи многократных итераций выделить следующий по интенсивности сигнал. Метод позволяет одновременно оценить уровень убираемого самого сильного сигнала. В этом случае выполняется ОВФ с разностью сигналов двух итераций: одной начальной, умноженной на амплитуду устраняемого сигнала, и другой следующей, в которой устраняемый сигнал является преобладающим. Величина множителя, определяющего амплитуду устраняемого сигнала, подбирается, исходя из условия минимального значения усредненного по антенне уровня разностного сигнала, так как этот уровень существенно зависит от степени устранения самого сильного сигнала. Теперь второй по интенсивности сигнал становится наиболее сильным. После ряда итераций этот сигнал становится определяющим и запоминается для последующей обработки. Этот процесс можно продолжать до тех пор, пока не будут выделены все сигналы, параметры которых представляют интерес.

Подробно процесс разделения сигналов рассмотрен в [2]. Здесь мы на нем останавливаться не будем, так как он осуществляется одинаково как для нефокусируемой, так и для фокусируемой антенны. В данном случае для получения правильных значений всех амплитуд сигналов пришлось сделать ряд дополнительных итераций, которые не требовались в [2].

Мы остановимся на процедуре оценивания параметров [4, 5] уже выделенных сигналов от отдельных объектов. С целью иллюстрировать методику обработки конкретным примером воспользуемся численным моделированием задачи.

Пусть линейная антенна обладает 256 приемными и излучающими элементами, расположен-

ными через 0.5λ (λ – длина волны). Примем, что излучение осуществляется импульсами с монохроматическим заполнением, так, что за время длины импульса происходит много колебаний несущей частоты. Это позволяет нам пользоваться монохроматическим приближением при операциях с сигналами. Пусть объекты локации удовлетворяют условиям, необходимым для успешного осуществления ОВФ. Они рассеивают регулярные сферические волны при облучении произвольным волновым полем и расположены друг от друга на таких дистанциях, что уверенно различаются антенной в среде без неоднородностей. Расположение и амплитуды рассеяния волн объектами зададим в соответствии с табл. 1.

Здесь n – номер объекта; W_n – амплитуда рассеянного сигнала (в произвольных единицах); U_n – пространственная частота положения объекта (в единицах квантования). Пространственная частота в единицах квантования связана с углом θ_n , под которым объект виден со стороны антенны (угол между направлением на объект из центра антенны и нормалью к антенне, проведенной из ее центра) следующей формулой [6]:

$$\arcsin(\theta_n) = \frac{\lambda}{L} U_n, \quad (1)$$

где L – длина антенны. Расстояние до объектов локации в длинах антенны L указано в графе R_n . В последней нижней графе таблицы указан параметр, определяющий кривизну фронта волны, рассеянной объектом. Параметр указан в числах y_n , являющихся номерами массива функций, описывающих фазовый фронт сферической волны, определяемого ниже.

Прежде всего, заметим, что в рассматриваемом нами случае сильно неоднородной среды нельзя воспользоваться обычной обработкой сигналов фокусируемой антенны [6, 7], с помощью которой удается определять параметры принимаемых ею сигналов. На рис. 1 приведен результат обычной обработки сигнала, отделенного от других с помощью ОВФ, в случаях отсутствия и наличия неоднородностей среды. Обычная обработка исходит из предположения о том, что волны, принимаемые антенной, обладают сферической формой волнового фронта. Вследствие этого обычная обработка сигналов, принятых фокусируемой антенной, включает два этапа. На первом из них устраняется сферичность волнового фронта, а на втором определяется пространственная частота в получившемся гармоническом сигнале как функции координаты (номера) приемного элемента антенны. Этот процесс подробно описан в [7]. Однако в данном случае волновой фронт от каждого объекта вследствие влияния неоднородностей среды имеет сложную непредсказуемую форму. Поэтому обычная обработка сигналов фокусиру-

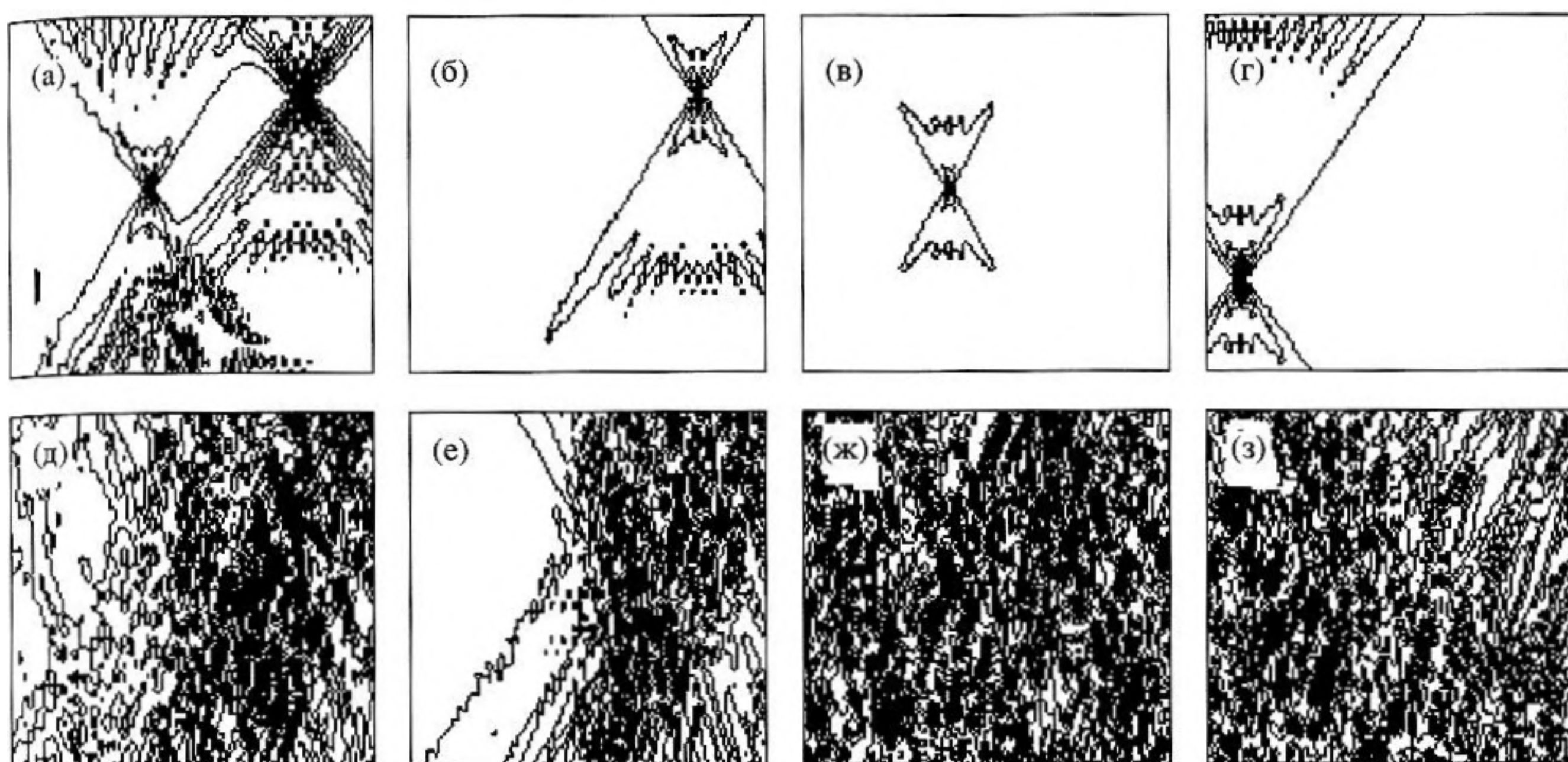


Рис. 1. Поле зрения фокусируемой антенны в координатах дальность (по вертикали) – угол (по горизонтали). Верхний ряд (а, б, в, г) получен в свободном пространстве. Нижний ряд (д, е, ж, з) получен в неоднородной среде. Весь сигнал показан на рис. (а, д). На остальных рис. показаны сигналы, отраженные от отдельных объектов и выделенные с ОВФ: первый сигнал (б, е), второй сигнал (в, ж) и третий сигнал (г, з).

емой антенны не дает возможности придать полю зрения антенны вид, который оно имеет в свободном пространстве. Это отлично видно из рис. 1. Нужно искать иные пути обработки сигналов фокусируемой антенны.

Чтобы найти эти пути, рассмотрим структуру сигналов, принимаемых фокусируемой антенной в неоднородной среде. Такие сигналы в виде функции пространственной координаты “ x ” имеют вид:

$$Af(x) = \sum_n A_n(x) \exp(iF_n(x)). \quad (2)$$

Здесь $A_n(x)$ – сигналы, принимаемые антенной в среде без неоднородностей; $F_n(x)$ – изменения фазы, вносимые средой для каждого сигнала. Эти изменения предполагаются величиной, много большей, чем π .

Примем, что источники сигналов находятся в ближнем поле антенны, в котором сигналы в чистой среде на антенне представимы в виде сферических волн [6]:

$$A_n(x) = W_n \exp\left(i\frac{2\pi}{L}xU_n + S_n(x)\right), \quad (3)$$

где W_n – амплитуда волны; U_n – пространственная частота; $S_n(x)$ – функция, учитывающая сферичность формы фронта волны:

$$S_n(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - 0.5L)^2 + R_n^2} - R_n, \quad (4)$$

где R_n – расстояние до объекта номера n .

Определение величины R_n как при обычном способе обработки сигнала фокусируемой антенны, применимым в однородной среде, так и с помощью оценки параметров производится путем перебора выделенного массива функций, описывающих форму фазового фронта сферической волны. Массив возможных дистанций R связывается с набором целых чисел y , начинающихся с нуля, следующим образом [7–9]:

$$R(y) = \frac{(0.5L)^2 - (0.4 + 0.2y)^2}{2(0.4 + 0.2y)}. \quad (5)$$

Такое формирование набора дистанций обеспечивает равномерное распределение дальностей выбираемых антенной из набора (5).

Форма каждого выделенного сигнала описывается, согласно (2), следующей функцией:

$$Q_n(x) = W_n \exp\left(i\frac{2\pi}{L}xU_n + iS_n(x) + iF_n(x)\right). \quad (6)$$

Основная идея, благодаря которой удастся построить систему оценки параметров объектов локации, состоит в выделении аргумента функции (6). Этот прием уже использовался нами ранее [8, 9]. На нем же построен метод разделения мультипликативно связанных спектров сигналов в [11], называемый комплексным кепструмом [11]. Здесь показано, что роль операции выделения аргумента комплексных сигналов не ограничивается возможностью разделения спектров получен-



Рис. 2. Зависимость аргумента функции (6) от номера приемного элемента. На рис. (а, б, в) помещены зависимости для сигналов с n , равным 1, 2, 3 соответственно.

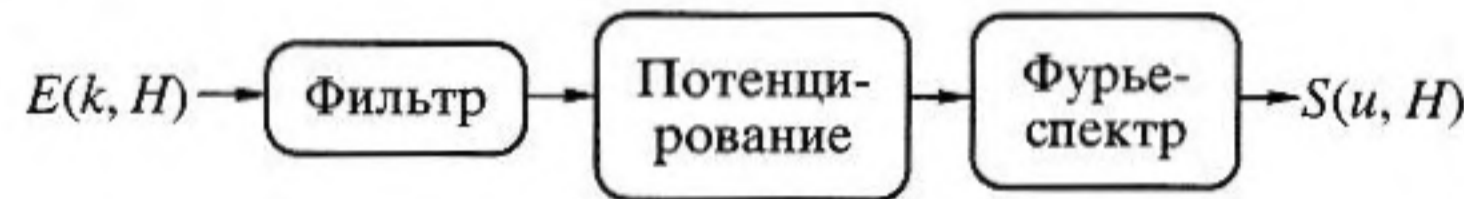


Рис. 3. Функциональная схема преобразования аргумента (8) с целью использования фильтрации для оценки углового положения сигнала.

ных аргументов или логарифмов комплексных сигналов. Эта операция дает еще одну возможность, на которую еще не обращалось внимание. С ее помощью можно эффективно осуществлять оценку параметров сигналов. Существенно, что это возможно и в том случае, когда спектры логарифмов сигналов неразделимы.

Аргументы всех выделенных сигналов $Q_n(x)$, вычисленные по методу, изложенному в [10], показаны на рис. 2. На этом рисунке заметны общий наклон, возрастающий с ростом пространственной частоты сигнала, изгиб фронта, заметный на рис. 2а, и искажения сигнала, определяемые $F_n(x)$.

На основе аргумента функции (6) следует оценить угловое положение и удаление источника сигнала от антенны. Эта задача допускает решение в два этапа, на одном из которых определяется только угловое положение источников сигналов, а на втором дистанция до них. Прежде всего, оценим угловое положение источника сигнала, так как это позволит компенсировать наклон аргумента функции (6), маскирующий кривизну фронта волны. Для этого умножим (6) на множитель вида:

$$M(x, H) = \overline{\exp\left(i\frac{2\pi}{L}xH\right)}, \quad (7)$$

где черта сверху означает комплексное сопряжение, а H – параметр, значение которого варьируется. Аргумент произведения (6) и (7) для каждого из n сигналов будет:

$$E_n(x, H) = \frac{2\pi}{L}x(U_n - H) + S_n(x) + F_n(x). \quad (8)$$

Из (8) видно, что при $H = U_n$ наклон линии (8) должен быть минимальным. Это можно, в частности, заметить, рассмотрев так называемую стандартную девиацию (8), определяемую как:

$$\sigma_n(H) = \sqrt{\left(\sum_x E_n(x, H)^2 - \left(\sum_x E_n(x, H)\right)^2\right)}. \quad (9)$$

Минимум (9) достигается при такой величине H , которая может служить оценкой для величины U_n . В проведенном численном эксперименте для $n = 1$ эта оценка отличается от U_1 , приведенных в табл. 1, на 1, а для остальных n совпадает с значением, указанным в таблице. Отличие может быть как больше, так и меньше в зависимости от конкретного вида и уровня реализации шума, используемого при моделировании неоднородной среды. Большей точности можно добиться, применив для оценки обработку, включающую фильтрацию случайного шума. Функциональная схема такой обработки показана на рис. 3. Фильтр, показанный на схеме, вырезает низкие частоты, в области которых находится помеха в аргументе (8).

Таким образом, один параметр сигнала мы оценили. Далее, умножив (6) на (7) с подставленным в него значением $H = U_n$, мы получаем основу для определения второго параметра – кривизны волнового фронта волны на антенне. Формула (6) переходит в этом случае в следующую:

$$AF_n(x) = W_n \exp(iS_n(x) + iF_n(x)). \quad (10)$$

Аргумент функции (10) как функция номера приемника антенны представляет собою сумму (аддитивную смесь) регулярного волнового поля

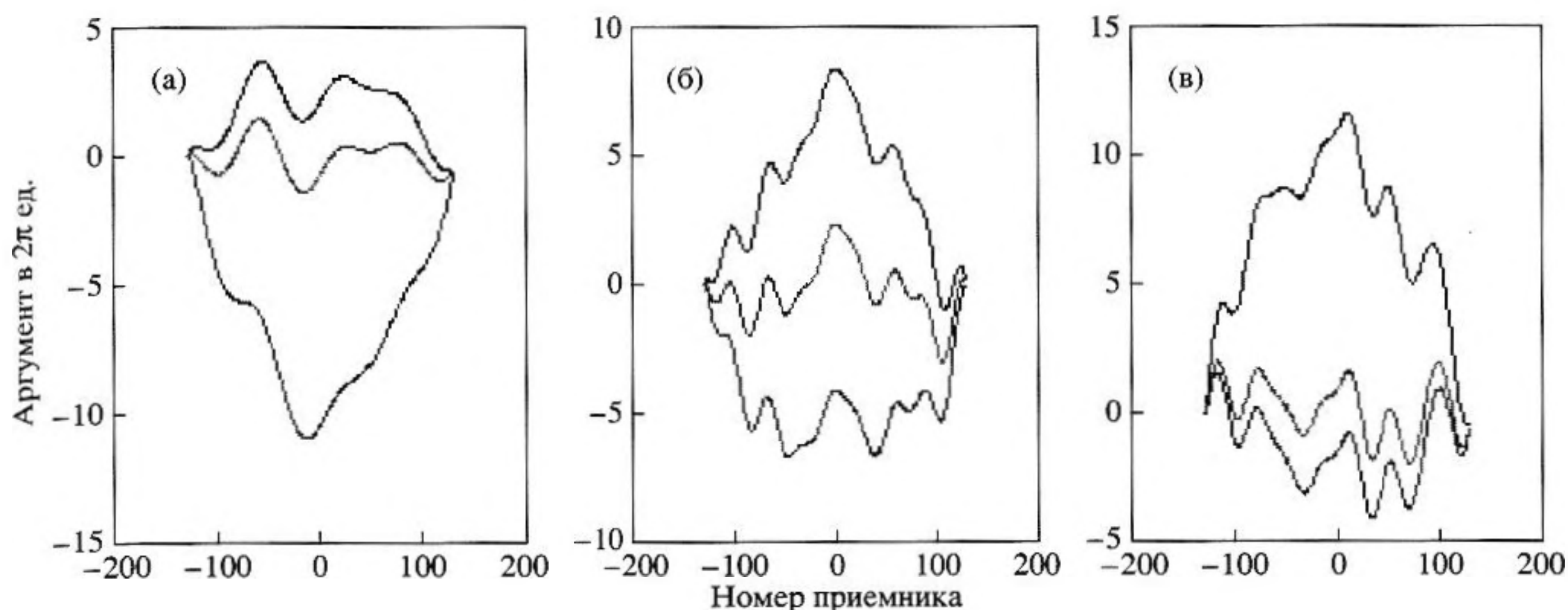


Рис. 4. Зависимость вида функции (12) от значения параметра u . Вверху и внизу крайние значения параметра. В центре значение параметра, при котором получается наименьший средний квадрат функции (12), т.е. остается только шум. На рис. (а, б, в) помещены зависимости для сигналов с n , равным 1, 2, 3 соответственно.

$S_n(x)$, имеющего вид (4), и случайного шума. Хорошо бы из этой смеси вычистить шум, но этого нельзя сделать, так как форма шумового сигнала нам неизвестна. Зато нам известен возможный вид регулярного сигнала. Придадим регулярному сигналу вид, в котором он зависит только от одного числового параметра. Для этого воспользуемся набором дистанций (5), зависящим от параметра u . С учетом сказанного и (4) регулярный сигнал запишем в виде:

$$RS_n(x, y_n) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{(x - 0.5\lambda)^2 + R(y_n)^2} - R(y_n)), \quad (11)$$

где $R(y_n)$ определяется (5) на массиве целых чисел y_n . Массив регулярных функций (11) составлен с учетом возможностей антенны различать волны, имеющие различную кривизну волнового фронта. Волны, разрешаемые антенной по кривизне волнового фронта на апертуре антенны, имеют числа u , отличающиеся больше, чем на единицу [7]. Это значит, что среди всех возможных функций вида (4) в рассматриваемом диапазоне дальностей найдется одна, которая практически с точностью до возможностей применяемой антенны совпадает с одной из функций (11). Если мы вычтем из аргумента (10) регулярный сигнал с значением u_n , близким к истинному, то в аргументе (10) останется только шум. Этот шум не зависит от того, что мы из аргумента вычитаем, следовательно, можно, действуя путем проб, найти момент, когда в аргументе (10) останется чистый шум. При этом средний квадрат аргумента должен быть минимальным. Этот момент можно заметить на основе рассмотрения следующей функции:

$$PS_n(x, y_n) = E(x, U_n) - RS(x, y_n) + RS(0, y_n). \quad (12)$$

В (12) функция $E(x, U_n)$ определяется (8). Последний член в (12) учитывает начальную фазу.

На рис. 4 показана функция (12) для всех трех искомых сигналов и трех значений параметра u_n в каждом случае. Из рисунка видно, как изменяется доля регулярного слагаемого в (12) в результате добавления функций из набора, зависящего от параметра u_n . Для оценки параметра составим на основе (12) выражение для стандартной девиации по примеру (10) и найдем ее минимум в зависимости от u_n . Такая зависимость приведена на рис. 5.

Результаты, полученные при обработке сигналов, наглядно показаны на рис. 6. Здесь показаны найденные с помощью обработки флуктуации аргументов каждого из сигналов, образующиеся в результате влияния неоднородной среды на процесс распространения волн. Эти флуктуации получены путем вычитания из аргументов (10) найденных значений функций (11). На тех же рисунках показаны пунктиром те истинные значения тех же функций, которые задавались при моделировании. Там, где пунктир не виден, он полностью совпадает со сплошной линией. На том же рисунке показаны поля зрения антенны, которые получаются в результате деления (6) на экспоненту от найденных значений флуктуаций. По таким картинкам нельзя уточнять значения параметров сигналов, таких как угол и дистанция. При изменении этих параметров картина поля зрения антенны смещается как целое, не деформируясь. Эти картинки не изменяются, если вместо найденных значений аргументов подставить истинные значения, показанные на рис. 6 пунктиром. Несмотря на это, картины поля зрения антенны на рис. 6 существенно отличаются от показанных

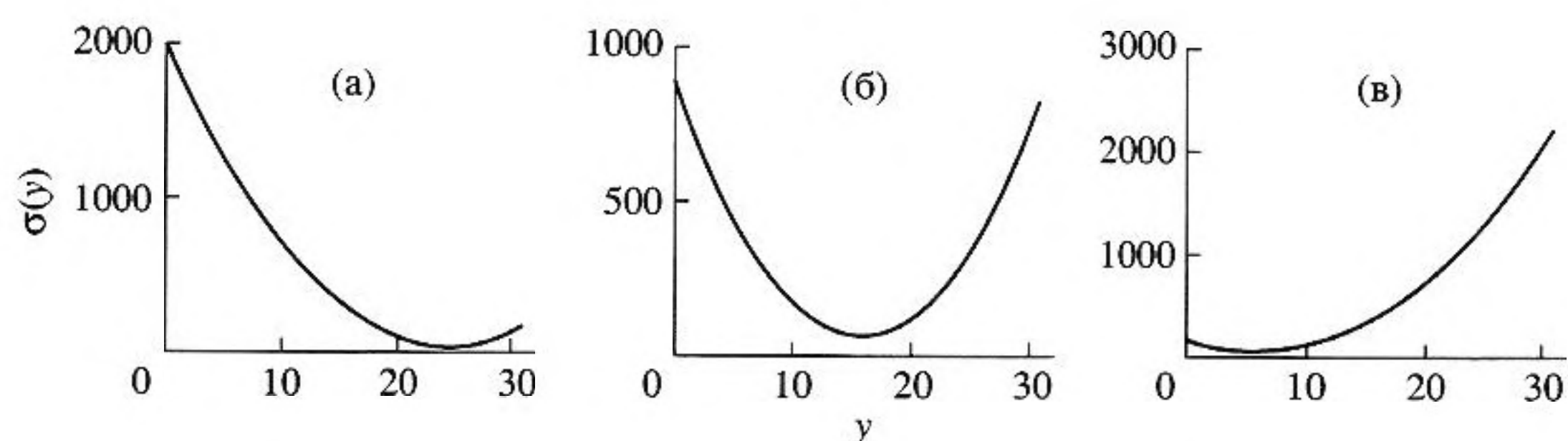


Рис. 5. Зависимость среднего квадрата функции (12) от значения параметра y . На рис. (а, б, в) помещены зависимости для сигналов с n , равным 1, 2, 3 соответственно.

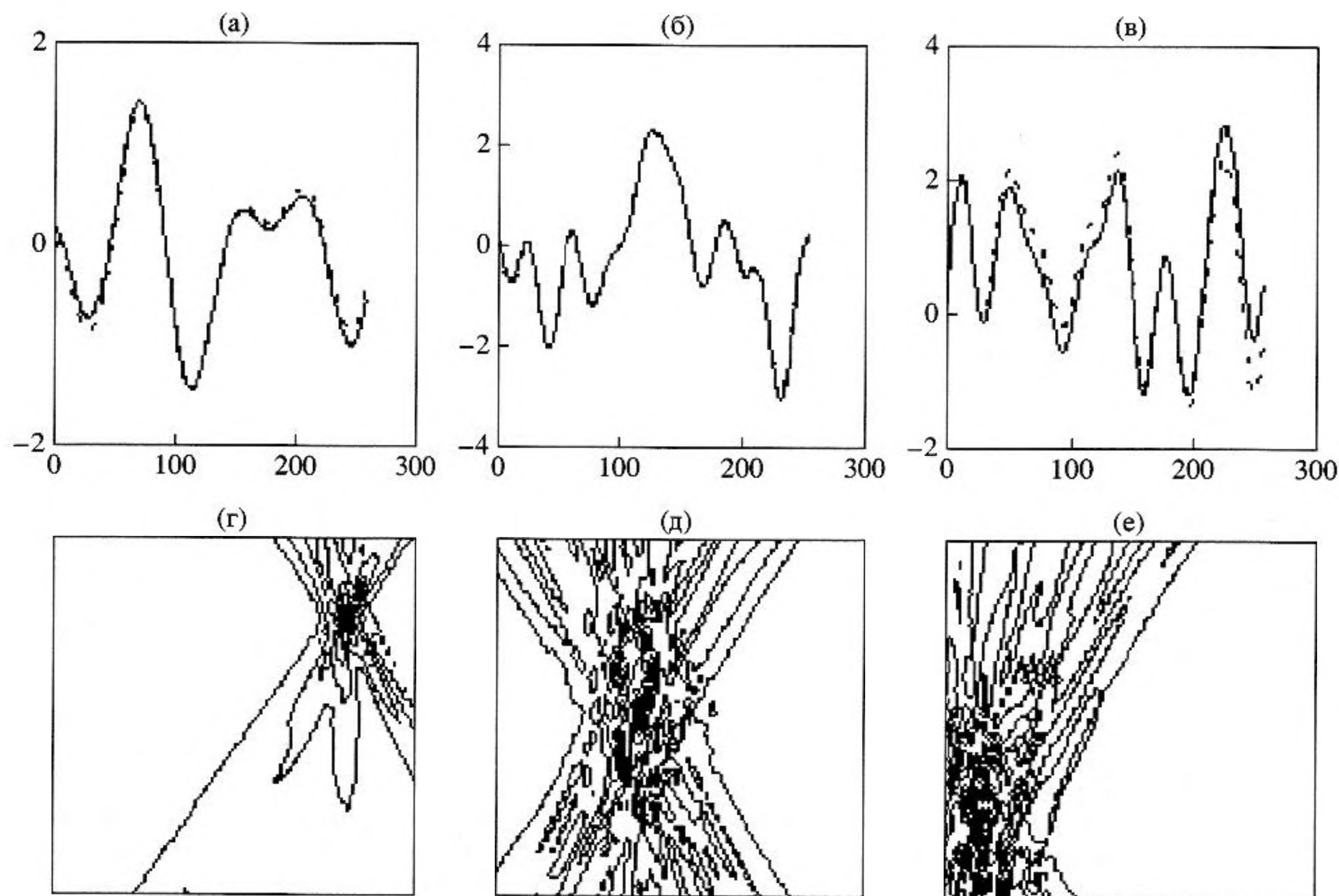


Рис. 6. Верхний ряд (а, б, в) аргумент помехи в масштабе 2π как функция номера приемника. Сплошная линия – результат выделения помехи из аргумента (10). Пунктирная линия – истинное значение помехи. Нижний ряд (г, д, е) – поле зрения фокусируемой антенны в координатах дальность (по вертикали) – угол (по горизонтали) в неоднородной среде после устранения помехи из (б). Первый сигнал (а, г), второй сигнал (б, д), третий сигнал (в, е).

на рис. 1. Это показывает, что в нашей обработке имеется какая-то неточность.

Источник неточности известен. Если делить (6) не на экспоненту от истинных значений аргумента, а на помеху заданную в виде экспоненциальной функции, то картина поля зрения фокусируемой антенны становится точно такой, какая изображена на рис. 1 для однородной среды. При этом исключается процедура определения значения аргумента без скачков фазы, которая и явля-

ется источником ошибок. Чтобы в результате обработки получались бы такие же картинки, как показанные на рис. 1 без неоднородностей, надо совершенствовать примененную нами процедуру извлечения аргумента функции без скачков через каждые π . Источник ошибок этого метода и пути увеличения точности рассмотрены в [10]. Для увеличения точности следует увеличить частоту квантования сигналов. В данном случае применительно к антенне эта рекомендация означает уве-

Таблица 2

n	1	2	3
W_n	6	2	0.5
U_n	12	38	57
R_n	6.15L	8.9L	20L
y_n	24	16	6

личение числа приемных элементов в антенне. Справедливость этой рекомендации видна по рис. 6. Лучше всего на этом рисунке выглядит самый низкочастотный сигнал (рис. 6г), а хуже всего высокочастотный (рис. 6е). Дело в том, что на точность операции влияет не абсолютная частота квантования, а ее отношение к полной ширине спектра сигнала [10]. Это отношение выше всего у низкочастотного сигнала.

Параметры объектов, определенные после выделения каждого из них с помощью ОВФ, приведены в табл. 2.

Несмотря на сильные неоднородности, искажающие случайным образом и независимо от объекта фазы сигналов, принимаемых антенной (величина искажений много больше π), значения в табл. 1 и 2 практически совпадают. Отличия наблюдаются в определении кривизны волнового фронта (дальности) самого дальнего (третьего) сигнала.

Рассмотренный метод позволяет определять параметры объектов локации в толстом слое сильно неоднородной крупномасштабной среды с высокой точностью. Проведенное рассмотрение показывает также значение приема комплексного логарифмирования мультипликативно связанных сигналов для оценки их параметров. Прием позволяет отделять мультипликативно связанные сигналы с перекрывающимися спектрами их логарифмов. Разделение сигналов может быть основано на структуре одного из них. Один из сигнала

лов должен определяться посредством некоторого параметра.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 00-15-96741 и № 02-02-17056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А. Получение изображения акустической антенной через слой неоднородностей // Акуст. журн. (принята к печати).
2. Зверев В.А. Получение изображения акустической антенной через толстый слой крупномасштабных неоднородностей // Акуст. журн. (направлена в печать).
3. Mathias Fink, Didier Cassereau, Arnaud Derode, Claire Prada, Philippe Roux, Mickael Tanter, Jean-Louis Thomas, François Wu. Time-reversed acoustics // Rep. Prog. Phys. 63 (2000) 1933–1995.
4. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. / Пер. с английского. М.: Мир, 1979. 349 с. (Bard Y., Nonlinear Parameter Estimation, New York: Academic, 1974.)
5. Зверев В.А. Формирование акустического изображения на основе его численной модели // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 796–803.
6. Зверев В.А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
7. Зверев В.А., Матвеев А.Л., Славинский М.М., Стромков А.А. Фокусируемая антенна темного поля // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 4. С. 429–434.
8. Зверев В.А., Павленко А.А. Формирование направленности гибкой акустической антенны // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 355–361.
9. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.
10. Зверев В.А., Павленко А.А. Об алгоритме логарифмирования комплексной функции с минимальной шириной спектра логарифма. Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 7. С. 652–656.
11. Oppenheim A.V., Schaffer R.W., Stockham T.G. Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals // IEEE Trans. Audio and Electroacoustics. 1968. V. AU-16. № 3.

Focused Antenna Array in a Strongly Inhomogeneous Medium

V. A. Zverev

A focused acoustic antenna array is considered in a strongly inhomogeneous stationary medium. An opportunity is indicated to determine the coordinates of a number of objects by active location. It is assumed that, in insonifying the objects by a wave with an arbitrary wave front, they scatter spherical waves and are sufficiently separated in distance and angle to be resolved by the same array in a homogeneous medium. The procedure of determining the coordinates of the objects involves a wave front inversion for distinguishing between the signals from different objects. The coordinates are determined by estimating the parameters for each individual object. The parameter estimation procedure is shown to provide a high efficiency of extracting the argument of a complex signal. The results of the numerical modeling and solution of the problem are presented.