

УДК 621.31.535.2

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ ЧЕРЕЗ ТОЛСТЫЙ СЛОЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

© 2004 г. В. А. Зверев

*Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*

E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 28.08.2002 г.

Рассмотрена задача об определении положений и уровней сигналов антенной, расположенной в толстом слое крупномасштабных неоднородностей. Задача решена в два этапа. На первом этапе использовано обращение волнового фронта. При этом удается выделить участки пространственных спектров сигналов, в каждом из которых преобладает один из них. На втором этапе в каждом выделенном участке производится обработка сигналов как по опубликованной методике (Акуст. журн. 2001, т. 47, № 3. С. 355–361) с использованием логарифмирования комплексных функций с последующей фильтрацией, так и с использованием метода оценки параметров. Приведены результаты численного моделирования рассматриваемой задачи.

Среды, в которых определение положения объектов локации в условиях однородной среды возможно акустическими методами, бывают столь неоднородны, что эти методы не удается реализовать с помощью классической акустической локации. Неоднородности в твердых телах, а иногда и в жидких (при отсутствии течений и за время распространения сигнала туда и обратно) настолько стационарны, что позволяют использовать для их преодоления обращение волнового фронта (ОВФ) сигналов [1]. В [2] было использовано ОВФ для исключения влияния сильных неоднородностей, расположенных в тонком слое. Метод, использованный в [2], обладает двумя серьезными ограничениями. Во-первых, он не позволяет лоцировать объекты через столь толстый слой неоднородностей, когда объекты локации, расположенные по отношению к антенне (и слою) под различными углами, имеют различные искажения. Во-вторых, метод [2] позволяет определять положения и уровни объектов локации только по отношению к самому сильному из них. Координата и уровень самого сильного объекта остаются неизвестными.

В результате дальнейшей работы удалось преодолеть оба вышеуказанных ограничения метода, описанного в [2]. Задачей настоящей работы является показать, что возможно определять положение и уровень всех объектов локации в условиях, когда слой неоднородностей достаточно толстый, так что у каждого из лоцируемых объектов возникают свои искажения. Это удалось сделать путем введения добавочного условия на характер неоднородностей, состоящего в том, что

неоднородности предполагаются крупномасштабными. Такое предположение в работе [2] не используется. Принятое допущение о крупномасштабности относится только к неоднородностям и не касается распределения изменений фаз вдоль антенны, вызванного влиянием неоднородностей. Последнее может обладать широким пространственным спектром, создавая сильную помеху.

Имеются ограничения на форму и расположение объектов локации, вытекающие из необходимости успешного применения ОВФ [1]. Их два. Объекты локации должны быть такими, чтобы при облучении их волной с произвольной формой волнового фронта ими переизлучалась сферическая волна. Во-вторых, объекты локации должны быть расположены таким образом, чтобы их можно было уверенно отделить один от другого с помощью используемой антенны в однородной среде.

Задача решена в два этапа. На первом этапе используется ОВФ. С его помощью разделяются сигналы от различных объектов. Сначала выделяется самый сильный сигнал. Такой сигнал выделяется с помощью многократного повторения ОВФ, как показано в [1]. Этот сигнал фиксируется. После этого на антенне формируется такой сигнал, который делает равным нулю или близким к нулю самый сильный рассеянный сигнал. Теперь путем повторений ОВФ выделяется опять самый сильный сигнал из оставшихся. Этот сигнал тоже фиксируется, после чего излучается сигнал, который делает почти равным нулю рассеянный сигнал и от этого объекта. Такая процедура продолжается до тех пор, пока не будут по от-

дельности зафиксированы все сигналы, представляющие интерес. На втором этапе каждый из зафиксированных сигналов обрабатывается отдельно с целью уточнения угла, под которым находится объект локации, и уровня рассеянного им сигнала. Это в данном случае может быть сделано двумя существенно различными способами: либо с помощью процедуры оценки параметров [3, 4], либо с помощью фильтрации. В настоящей работе эта процедура выполнена как с помощью фильтрации, так и путем оценки параметров.

Фильтрация осуществлена методом, примененным и описанным в [5]. Перед фильтрацией производится выделение фазы сигнала без скачков через каждые 2π . Это достигается с помощью логарифмирования комплексного сигнала [6]. В результате этой операции спектры сигнала и помехи удается разделить так, как это делается в кепстральном анализе [5, 7]. После этого помеха отфильтровывается и остается чистый сигнал, параметры которого (угловое положение и уровень) определяются.

Покажем, как осуществляется процедура определения параметров сигналов с помощью протяженной антенны, помещенной в толстый слой неоднородностей, на конкретном примере.

Пусть мы имеем линейную антенну, состоящую из L приемных (и излучающих) элементов через интервалы $\lambda/2$ (λ – длина волны), помещенную в стационарную неоднородную среду. Излучаются и принимаются сигналы в виде импульсов с монохроматическим заполнением, такой длительности, что для сигналов справедливо монохроматическое представление. Сигнал, принимаемый антенной, запишем в виде:

$$S(k) = \sum_n A_n(k) \exp(iF_n(k)). \quad (1)$$

Здесь $A_n(k)$ – сигналы, принимаемые антенной в среде без неоднородностей; $F_n(k)$ – изменения фазы, вносимые средой для каждого сигнала. Эти изменения предполагаются величиной много большей, чем π . Примем, что источники сигналов находятся в дальнем поле антенны, в котором сигналы в чистой среде на антенне представимы в виде плоских волн [8]:

$$A_n(k) = W_n \exp\left(i\frac{2\pi}{L} k U_n\right), \quad (2)$$

где W_n – амплитуда волны; U_n – пространственная частота. Угловое положение θ_n волны определяется как [8]

$$\arcsin(\theta_n) = \frac{\lambda}{L} U_n. \quad (3)$$

В нашем примере рассмотрен случай трех сигналов, параметры которых приведены в таблице.

Таблица

n	1	2	3
W_n	6	2	0.5
U_n	50	150	250

Уровни сигналов заранее взяты сильно различающимися по величине, чтобы не приходилось при численном моделировании многократно выполнять ОВФ. Антенна содержит 1024 приемных элемента, расположенных через интервалы 0.5λ .

Наблюдение сигналов начинается, как это принято делать при ОВФ [1], с излучения импульса одним из элементов антенны. Этот импульс, распространяясь в среде с неоднородностями, сильно искажается. Однако, несмотря на эти искажения, каждый объект переизлучает сферическую волну [1]. Эти волны, распространяясь опять через среду с неоднородностями, достигают антенны, формируя на ней поле вида (1). Искажения этого поля столь значительны, что обработка сигналов антенны, использующаяся в однородной среде (получение пространственного спектра Фурье сигнала антенны), приводит к результату, показанному на рис. 1а. Спектр Фурье сигнала на антенне можно представить в виде

$$P1(u) = W_1 u a(u) + W_2 u b(u) + W_3 u c(u), \quad (4)$$

где

$$u a(u) = \Phi \left[\frac{A_1(k)}{W_1} \exp(iF_1(k)) \right], \quad (5)$$

$$u b(u) = \Phi \left[\frac{A_2(k)}{W_2} \exp(iF_2(k)) \right], \quad (6)$$

$$u c(u) = \Phi \left[\frac{A_3(k)}{W_3} \exp(iF_3(k)) \right], \quad (7)$$

Φ означает преобразование Фурье от функции, помещенной в квадратные скобки.

На рис. 1а показан модуль пространственного спектра сигнала, принятого антенной, определяемый (5), (6), (7). Результат такой же обработки сигнала в однородной среде показан на рис. 2а. На этом рисунке видны уровни всех трех сигналов и их положение на оси пространственных спектров, определяющих величины U_n сигналов, связанных с углами θ_n , под которым видны объекты локации, соотношением (3). В однородной среде никакой дополнительной обработки не требуется.

Однако из рис. 1а, который только и имеется в нашем распоряжении, картина расположения объектов локации не видна. Ее следует добывать, прибегая к дополнительной обработке сигнала. На первом этапе эта обработка состоит в разделении сигналов от разных объектов локации.

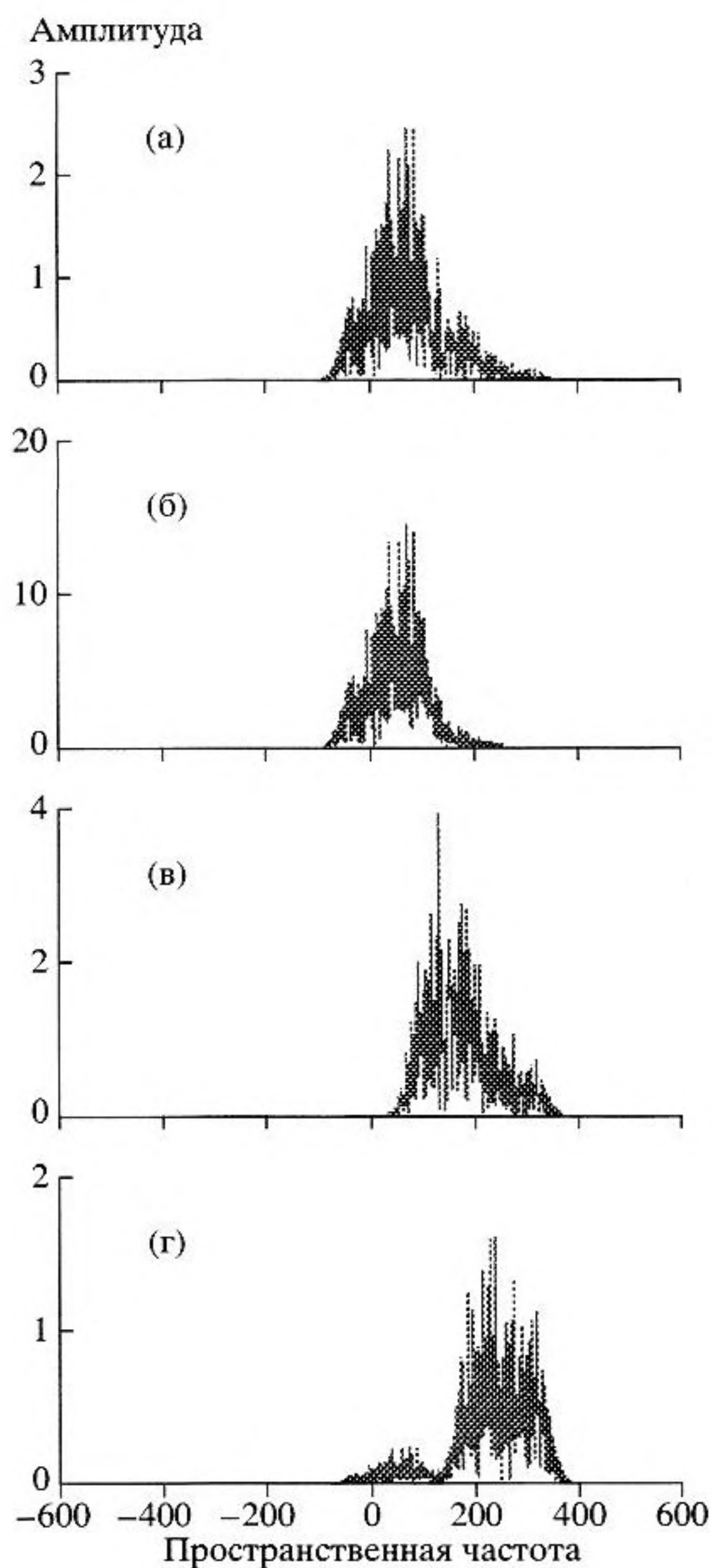


Рис. 1. Угловые спектры сигналов до их разделения с применением ОВФ (а) и после их разделения (б, в, г).

Прежде всего, отделим самый сильный сигнал от всех остальных. Для этого зафиксируем поле на антенне, а затем излучим той же антенной комплексно сопряженный сигнал с измененным знаком времени. В результате антенна будет излучать сигнал с ОВФ. Этот сигнал, пройдя через те же неоднородности, подойдя к объектам локации, приобретет опять форму сферической волны. Амплитуда этой волны будет соответствовать величине W_n каждого объекта. Рассеиваясь на объекте локации, волна приобретает дополнительный множитель W_n .

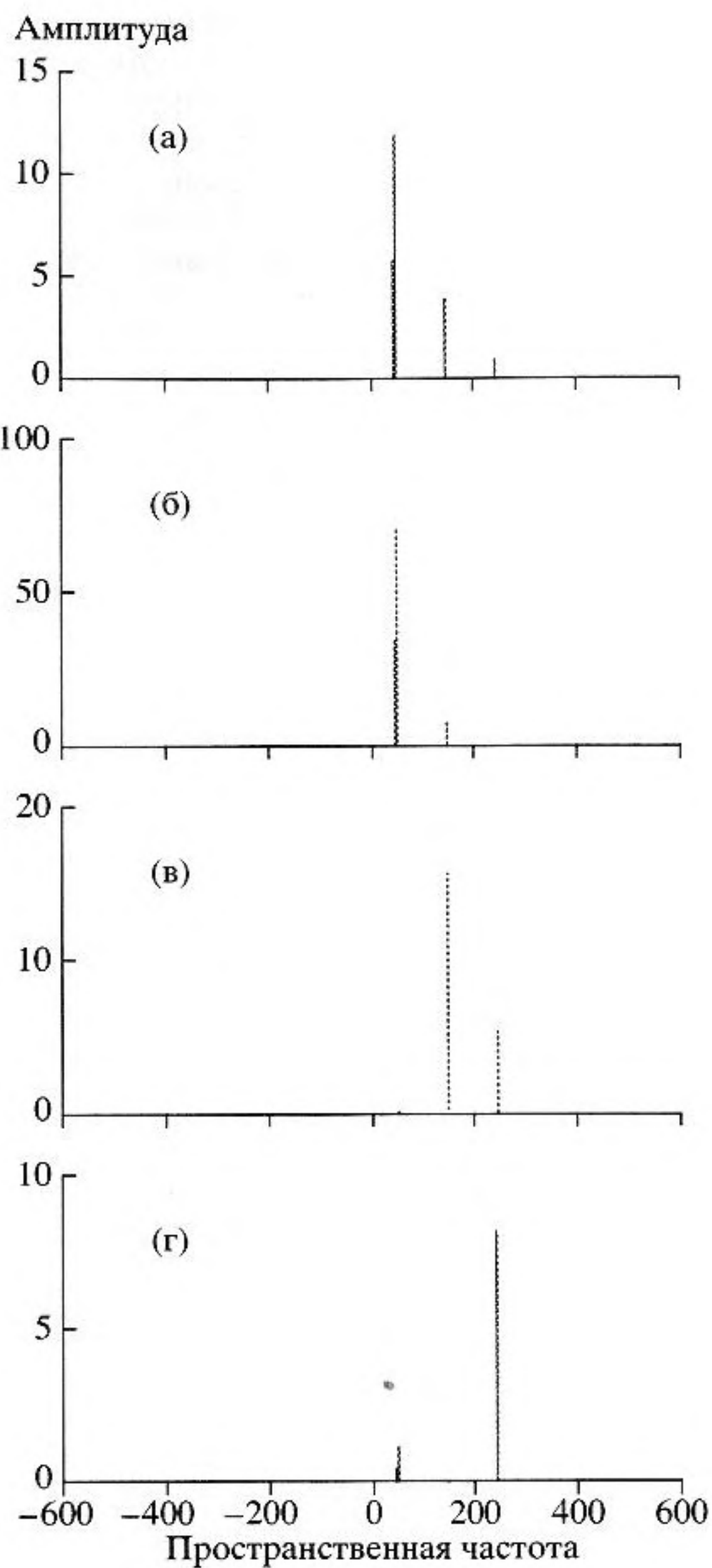


Рис. 2. Угловые спектры сигналов в свободном пространстве до их разделения с применением ОВФ (а) и после их разделения (б, в, г).

В результате приема волны, излученной с ОВФ, пространственный спектр сигнала на антенне примет вид

$$P2(u) = W_1^2 u a(u) + W_2^2 u b(u) + W_3^2 u c(u). \quad (8)$$

В результате этой операции первый сигнал станет намного больше остальных. Результат такого выделения первого сигнала показан на рис. 1б. Результат той же операции, но в свободном пространстве, показан на рис. 2б.

Теперь надо выделить сигнал, следующий по амплитуде. Для этого надо убрать первый сигнал. С этой целью с ОВФ излучается сигнал вида:

$$PA(k) = P1(k)NA - P2(k), \quad (9)$$

где NA – коэффициент, подобранный таким образом, чтобы сделать минимальным сигнал, рассеянный первым объектом локации. Для того, чтобы подобрать значение коэффициента NA , используются сигналы, принятые антенной после излучения сигналов вида (9) с различными значениями коэффициентов NA . Действительно, подставив в (9) выражения (4) и (8), получим:

$$P4(u) = (W_1NA - W_1^2)ua(u)W_1 + (W_2NA - W_2^2)ub(u)W_2 + (W_3NA - W_3^2)uc(u)W_3. \quad (10)$$

Из (10) следует, что сигнал, рассеянный первым наиболее сильным объектом, становится равным нулю при условии, что

$$NA = W_1. \quad (11)$$

Однако условием (11) непосредственно воспользоваться нельзя, так как уровень первого сигнала нам неизвестен. Тогда можно воспользоваться тем, что устраняемый сигнал самый сильный, и его отсутствие должно сильно сказаться на уровне доступного для наблюдения сигнала (10). В минимум должен обращаться сигнал на антенне, а не его спектр. Поэтому минимум следует искать по результату обратного преобразования Фурье (10). Величина $NA = 5.975$ обращает интеграл от квадрата обратного преобразования Фурье (10) в минимум. Сравнивая полученное значение с приведенным в таблице значением $W_1 = 6$, видим, что оценка получается смещенная. При дальнейшей обработке ее удастся уточнить. Сигнал (10) с подставленным в него значением $NA = 5.975$ будем считать выделенным вторым сигналом и запомним его. Вид модуля пространственного спектра этого сигнала показан на рис. 1в. Вид того же спектра в свободном пространстве показан на рис. 2в. Из рис. 2в следует, что действительно второй сигнал является в рассматриваемом случае максимальным сигналом.

Далее, действуя аналогично, убираем второй сигнал. Для этого в среду излучаем сигнал, построенный аналогично (9):

$$PB(k) = PA(k)NB - P4(k). \quad (12)$$

Здесь $PA(k)$ определяется (9) с подставленным в него найденным значением NA , а $P4(k)$ представляет собой обратное преобразование Фурье (10) с подставленным в него найденным значением NA . Не будем выписывать все длинное выражение для принятого сигнала. Ограничимся лишь тем, что упомянем, что коэффициент перед $ua(u)$

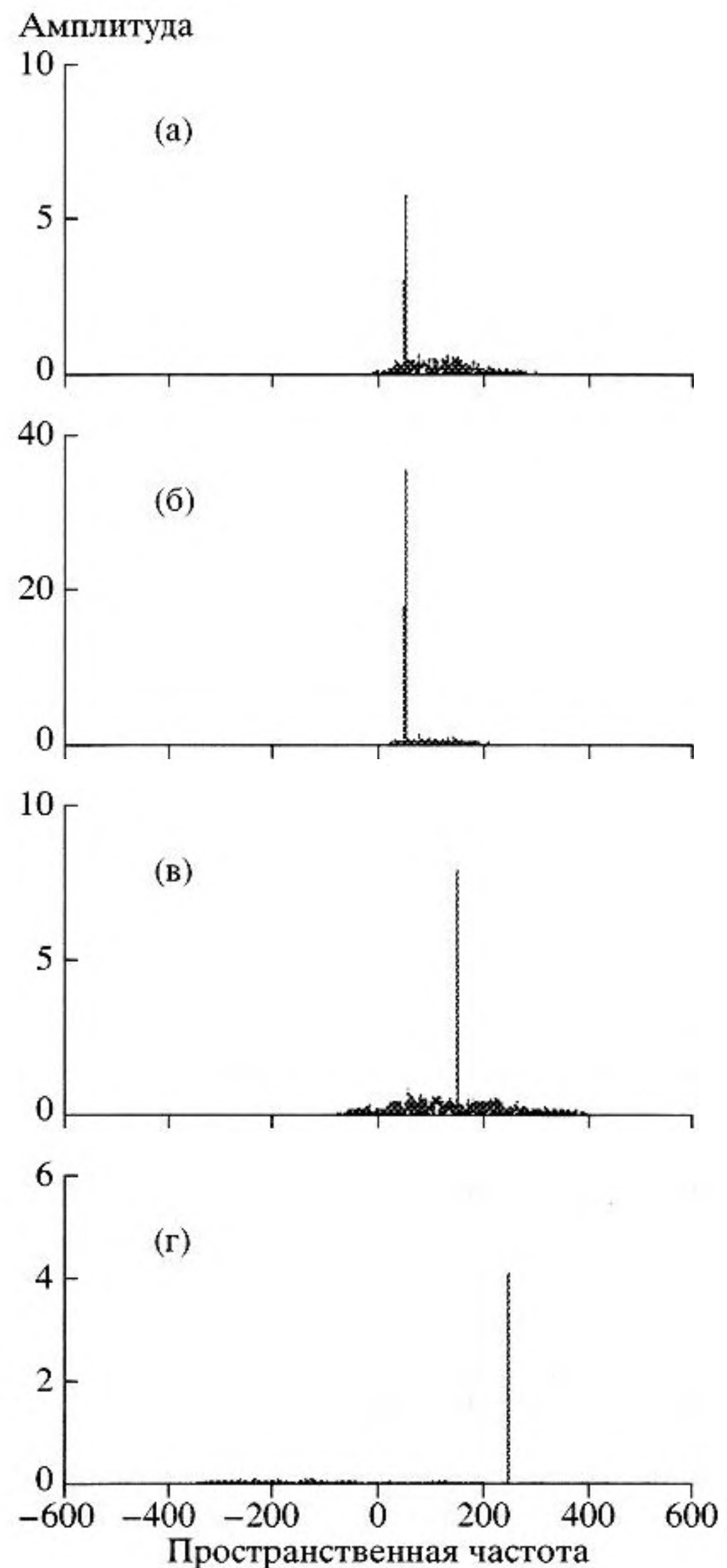


Рис. 3. Угловые спектры сигналов, отфильтрованные с помощью комплексного логарифмирования, до их разделения с применением ОВФ (а) и после их разделения (б, в, г).

содержит множитель $NA - W_1$, и приведем коэффициент перед вторым по интенсивности сигналом $ub(u)$. Этот коэффициент равен

$$Kb = (W_2NA - W_2^2)(NB - W_2). \quad (13)$$

Из (13) следует, что второй по интенсивности сигнал обращается в нуль при условии, что

$$NB = W_2. \quad (14)$$

Так как значение W_2 неизвестно, то соблюдение (14) определяется по минимуму результата

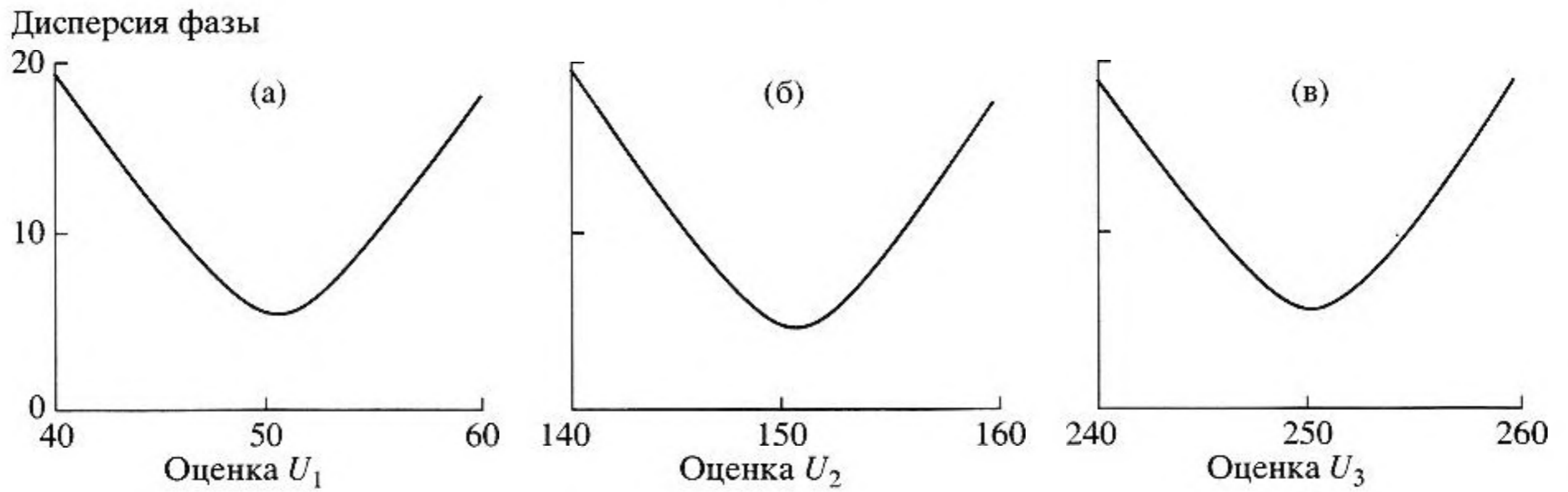


Рис. 4. Получение оценок пространственных частот (углов) объектов локации путем минимизации дисперсии фазы. Оценка для первого сигнала (а), для второго (б) и для третьего (в).

ОВФ по сигналу (12) при варьировании величины NB . Действуя таким путем, мы получили, что $NB = 1.993$. Модуль пространственного спектра этого сигнала показан на рис. 1г для случая неоднородной среды и на рис. 2г для случая среды однородной. На рис. 1г и 2г видны остатки первого сигнала. Это получается в результате того, что значение NA было определено с ошибкой. Эту ошибку можно существенно уменьшить путем варьирования величины NA , добиваясь минимума остатков первого сигнала на рис. 1г. Эта операция была нами проделана. В результате получилось, что $NA = 6$ с точностью до десятитысячных долей.

На втором этапе из сигналов, полученных при последовательном устранении самых сильных сигналов, выделяются из помех, обусловленных влиянием среды, чистые сигналы. Это в данном случае сделано на основе [5, 9] по описанной там методике. Методика выделения сигналов основана на том, что известно о присутствии всего одного монохроматического сигнала вида одного члена суммы (1). Логарифмируя это выражение без скачков фазы через каждые 2π , методом, изложенным в [6], получаем чистое выражение для фазы сигнала, обладающее минимальной шириной спектра. Для того, чтобы спектры сигнала и помехи разделялись, используется прием, подробно описанный в [5]. Перед извлечением фазы сигнала без скачков через каждые 2π сигнал умножается на множитель

$$M(k) = \exp\left(i\frac{2\pi}{L}kQ_n\right) + 0.5. \quad (15)$$

Величина Q_n подбирается, исходя из условия получения минимальной ширины спектра произведения множителя $M(k)$ на сигнал, выделенный посредством использования ОВФ.

Операция подбора величин U_n производится путем умножения выделенного с помощью ОВФ

сигнала на множитель (15) (без добавления к экспоненте слагаемого 0.5). Варьируя величину Q_n , можно добиться того, чтобы дисперсия выделенной фазы была бы минимальной. Полученные зависимости величин дисперсий фазы от значений Q_n показаны на рис. 4. При этом для выделения сигналов от отдельных объектов локации были использованы значения $NA = 5.975$ и $NB = 1.993$, полученные экспериментально. Значения минимумов дисперсий фазы на рис. 4а и 4в совпали с заданными значениями пространственных частот. Значения минимума на рис. 4б составляет 151 вместо заданного значения 150. Отличие наблюдается в один элемент разрешения антенны. Это отличие связано с наличием шума, который при этой операции не исключается.

Заметим, что полученных оценок для определения координат объектов локации вполне достаточно, и фильтрации с целью выделения сигналов можно было и не проводить. Такой способ обработки с определением параметров сигнала без фильтрации допускает более широкую полосу пространственных частот неоднородностей, нежели способ с фильтрацией.

Полученные результаты фильтрации сигналов приведены на рис. 3. На этом рисунке видны как положения сигналов на оси частот, так и их амплитуды. Воспользуемся этим для определения уровня оставшегося неопределенным третьего, самого слабого, сигнала. Согласно (12) амплитуда третьего сигнала Kc на рис. 3г должна быть следующей:

$$Kc = NBW_3(NA - W_3) - W_3(W_3NA - W_3^2). \quad (16)$$

Для получения оценок по соотношению (16) надо решить кубическое уравнение. Мы поступили иначе. Если подставить в (16) все правильные значения из таблицы, то мы получим $Kc = 4.087$, а значение амплитуды сигнала на рис. 3г составляет 4.086. Близость этих значений свидетельствует о

том, что полученная оценка уровня сигнала по рис. 3г близка к истине.

Метод разделения сигналов с помощью ОВФ применим и к фокусируемой антенне, но метод фильтрации не применим, а получение оценок имеет особенности. Об этом подробнее в следующей статье.

Работа поддержана РФФИ (проект № 02-02-17036) и Минпромнаука (проект № НШ-1644.2003.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fink M., Cassereau D., Derode A. et al.* Time-reversed acoustics // *Rep. Prog. Phys.* 2000. V. 63. P. 1933–1995. Printed in the UK.
2. *Зверев В.А.* Получение изображения акустической антенной через слой неоднородностей // *Акуст. журн.* 2004. № 1.
3. *Бард Й.* Нелинейное оценивание параметров / Пер. с англ. М. Мир, 1979. 349 с. (*Bard Y.* Nonlinear Parameter Estimation. New York: Academic, 1974).
4. *Зверев В.А.* Формирование акустического изображения на основе его численной модели // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 6. С. 796–803.
5. *Зверев В.А., Павленко А.А.* Формирование направленности гибкой акустической антенны // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 3. С. 355–361.
6. *Зверев В.А., Павленко А.А.* Об алгоритме логарифмирования комплексной функции с минимальной шириной спектра логарифма. // *Известия ВУЗ. Радиофизика.* 2000. Т. 43. № 7. С. 652–656.
7. *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.
8. *Зверев В.А.* Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
9. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.

Imaging with Acoustic Antenna Array through a Thick Layer of Large-Scale Inhomogeneities

V. A. Zverev

A problem of determining the positions and levels of signals by an array in a thick layer of large-scale inhomogeneities is considered. The problem is solved in two steps. At the first step, the method of wave front inversion is used to find the fractions of the spatial spectra, at which one of the signals predominates. At the second step, within each spectral fraction, the signal is processed by using both the method [5] of taking logarithms of complex functions with a subsequent filtering and the method of parameter estimation. The results of numerical modeling are presented.