

УДК 551.463

ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

© 2000 г. В. А. Зверев

Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
e-mail: zverev@hydro.appl.gli-nnov.ru

Поступила в редакцию 19.03.98 г.

Предлагается способ формирования акустического изображения на основе его численной модели. Способ применим в условиях, когда в силу малой волновой апертуры, флуктуаций, нестационарности сформировать изображение традиционными методами не удастся. Существо метода и его особенности поясняются на конкретных примерах. Предлагаемым методом образовано изображение углового распределения рассеянных сигналов и углового спектра сигналов на выходе антенной решетки в натурном акустическом эксперименте.

Акустические изображения могут быть сформированы точно так же, как формируются оптические и радиоизображения, образованные волновыми полями. Эти способы известны и широко применяются. В акустике существуют условия, в которых применение традиционных путей формирования изображений встречает принципиальные трудности, ввиду малой волновой апертуры приемных устройств, малого времени усреднения данных, сложного строения и нестационарности среды. Здесь мы рассмотрим иной способ формирования изображений, приспособленный к условиям проведения натурального акустического эксперимента.

Предлагаемый метод формирования изображения поясняет рис. 1. Изображенная на нем схема занимает два ряда. Разделение ее на два ряда является принципиальным. Верхний ряд почти повторяет традиционную схему получения изображений. При этом он не включает финальной операции – формирования изображения. Традиционно эта финальная операция совершается либо путем преобразования поля, принятого на некоторой апертуре [1], либо преобразованием комплексной функции корреляции (функции когерентности) [2]. Вместо всего этого ряд заканчивается получением параметров, которые еще не могут считаться изображением входного распределения. На основе этих параметров нельзя сформировать изображение, пользуясь традиционными методами. Соответствующая обратная задача решения не имеет, так как апертура может быть для этого недостаточной, а поля могут быть необратимо усреднены. Назовем этот ряд натурным рядом (НР). Формированию изображений служит второй ряд, который назовем компьютерным рядом

(КР). КР начинается с того, что компьютер формирует некоторое начальное изображение, которое включает ряд параметров или функций, изменяющих его вид. Далее это изображение преобразуется так же, как и входное изображение верхнего ряда. После этого совершается обработка сигнала, повторяющая обработку, сделанную в верхнем ряду и приводящую к получению тех же параметров, которые могут иметь в КР иные значения и иной вид (если это функции), нежели в НР.

Искомое изображение формируется в КР путем такого изменения начального входного изображения, которое приводит к получению в конце КР таких параметров или функций, которые

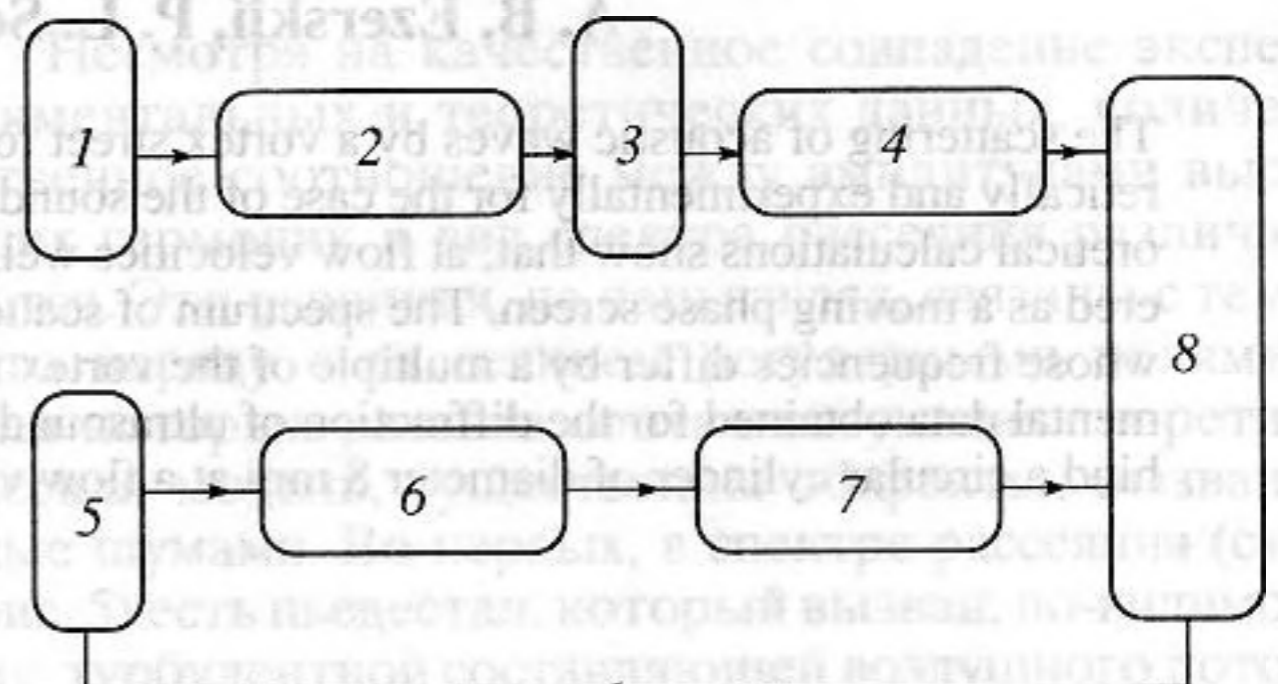


Рис. 1. Схема получения изображения на основе его численной модели: 1 – исходное поле (изображение); 2 – изменения поля в результате его распространения в среде; 3 – прием поля на апертуре, антенны; 4 – определение ряда параметров принятого сигнала; 5 – численная модель изображения; 6 – математическая модель блока 2; 7 – математическая модель блока 4; 8 – сравнение результатов блоков 4 и 6.

близки содержащимся в НР. Процедура подбора включает изменение параметров входного изображения, формируемого компьютером, с последующим сравнением результатов обработки сигналов в КР с теми же параметрами, полученными в НР.

Такова общая схема формирования изображений, рассматриваемая здесь. Весьма существенно, что в предлагаемой схеме операция формирования изображения ни на каком этапе не включает решение обратной волновой задачи. Это позволяет получать хотя и весьма скудные, но вполне устойчивые и надежные данные об изображении и его параметрах.

Приведенную общую схему мы наполним содержанием на примере конкретных задач. К настоящему моменту автором решены три задачи, укладываемые в приведенную схему. Одна из них опубликована в [3]. В этом примере не было получено совпадения параметров рядов НР и КР. Здесь учтены и исправлены недостатки той модели.

Натурный эксперимент, использованный нами в качестве примера, опубликован в [4]. Опишем постановку опыта. Его задачей являлось определение того, что могут дать современные методы обработки сигналов антенных решеток, подавляя сильный сигнал с целью приема слабого, в условиях проведенного опыта. Речь шла о распространении акустических сигналов в мелком море, глубина которого была около 80 м, с колебаниями в пределах 20 м на расстоянии около 10 км. Сигнал излучения на фиксированной частоте 237.5 Гц принимался линейной антенной, имеющей 64 приемных элемента, расположенные через интервалы в половину длины волны. Сигнал был достаточно мощным, чтобы можно было пренебречь влиянием аддитивных шумов. Чтобы определить, какое излучение можно принять на фоне сигнала высокой мощности, в опыте использовали второй излучатель, который буксировался специальным судном. Сигнал этого излучателя имел частоту 235.0 Гц. Разница излучаемых частот позволяла отфильтровывать, смещать частоту и подмешивать сигнал второго излучателя к сигналу мощного излучателя в любой пропорции. Сигналы, принятые гидрофонами антенны, перед их обработкой фильтровали в полосе 0.2 Гц около частоты мощного излучения.

Чтобы объективно характеризовать условия, в которых производился опыт, используем результаты предварительной обработки сигнала мощного излучателя, принятого антенной. Эти результаты для нас будут служить выходным сигналом НР. Мы используем все результаты, приведенные в [4]. Это мгновенные значения отклика антенны и ряд частных корреляционных зависи-

мостей. Полной корреляционной функции в [4] нет. Поэтому мы не можем ею воспользоваться. Основной корреляционной зависимостью, приведенной в [4], является следующая:

$$A(j) = 1 - |k(j, 31)|, \quad (1)$$

где $k(j, 31)$ – комплексный коэффициент корреляции между сигналами, принимаемыми приемными гидрофонами с номерами j , и сигналом, принимаемым гидрофоном с номером 31 (все гидрофоны антенны нумеруются по порядку их расположения). Эта картинка усреднена по 240 временным реализациям. В [4] приведена также зависимость

$$B(j) = 1 - |k(j, j+1)| \quad (2)$$

и отношение

$$C(j) = \frac{1 - |k(j, j+1)|}{1 - |k(j, j+2)|}. \quad (3)$$

Функция (2) уточняет поведение зависимости (1) в окрестности ее минимума. Отношение (3) построено так, что должно быть в среднем равно 0.25 в том случае, если интервал корреляции волнового поля больше размера антенны. В этом случае интервал корреляции волнового поля много больше расстояния между отдельными гидрофонами антенны. Следовательно, и числитель и знаменатель (3) должны разлагаться в степенные ряды по приращению числа элементов антенны, а эти ряды должны начинаться с квадратичных членов, откуда и следует наше утверждение. Если же этот интервал меньше расстояния между отдельными гидрофонами антенны, то модули коэффициентов корреляции в числителе и знаменателе (3) становятся малы, в силу чего отношение (3) становится порядка единицы. Таким образом, отношение (3) характеризует интервал когерентности поля вдоль антенны. На приведенном в [4] рисунке это отношение в среднем по антенне составляет 0.496, что свидетельствует о том, что интервал когерентности поля меньше длины антенны (200 м), но больше расстояния между приемниками антенны (3 м).

Опыт состоял в определении отношения сигналов двух излучателей, при котором сигнал более слабого удастся наблюдать на фоне сигнала более сильного источника. Это отношение получено методами выделения сигналов в антенных решетках [4]. В результате этого опыта было установлено, что такое отношение не превышает 30 дБ. Приему более слабого сигнала препятствует шум, вызываемый присутствием сильного сигнала. Этот шум является следствием флуктуаций сильного сигнала, т.е. тех самых флуктуаций, которые определяют приведенные корреляционные зависимости. Физический механизм возник-

новения флюктуационного шума в [4] не обсуждается. Его физическая природа рассмотрена в [5]. Здесь мы покажем, как с помощью компьютерного метода формирования изображений можно увидеть, откуда идет этот шум. Опубликованные в [4] корреляционные зависимости (1)–(3) будут для нас служить конечным этапом операции НР (рис. 1).

Согласно нашей схеме нужно сформировать компьютерное изображение. Для этого уточним, что мы хотим увидеть. Мы хотим увидеть, с каких направлений и какой интенсивности идет тот шум, который маскирует слабый сигнал. Для формирования соответствующего компьютерного изображения воспользуемся физической моделью явления [5]. Причиной флюктуационных явлений в данном случае является рассеяние акустических волн взволнованной поверхностью моря. Мелкое море представляет собою акустический волновод с неровной границей, рассеивающей падающие на нее волны. Это явление применительно к данному опыту рассмотрено в [6]. В результате ряда упрощений в работе [6] показано, как можно получить гладкую кривую для интенсивности рассеянных сигналов, приходящих по разным направлениям. Ее примем за исходное компьютерное изображение.

Основной особенностью реального волнового поля является присутствие в нем неусредненной интерференции. Такое поле можно, в принципе, сформировать численно, пользуясь результатами [7, 8]. Однако для этого следует точки на поверхности задавать с интервалами не более чем в $\lambda/2$. Учитывая, что площадь рассеяния весьма велика, такой расчет потребует гигантского объема вычислений. Поэтому мы поступим так, как это сделано в [9], и учтем результат интерференции на конечном этапе расчета, выполненного без учета интерференции (что достигается при существенно меньшем числе точек).

Следуя [9], сформируем комплексные случайные числа:

$$Q_{\vartheta, n} = A_{\vartheta+Ln} + iB_{\vartheta+Ln}. \quad (4)$$

Здесь A и B – последовательности случайных чисел, генерируемых компьютером. Последовательности взяты достаточно протяженными, чтобы из них, как показано в формуле (4), можно было сформировать последовательности комплексных случайных чисел для n реализаций, каждая из которых обладает размером 360 значений ϑ , которые можно сопоставить с угловыми градусами. Компьютерное изображение представлено значениями, взятыми через один градус.

Образуем случайные спектральные составляющие

$$q(\vartheta, n) = \sqrt{S(\vartheta)}Q(\vartheta, n) + ZO\delta(\vartheta). \quad (5)$$

Здесь ZO – постоянное число, подлежащее определению путем согласования параметров математической модели с результатами эксперимента. Функция $\delta(\vartheta)$ обращается в нуль при всех значениях ϑ , отличных от нуля, а при $\vartheta = 0$ она равна единице.

Каждому значению ϑ , выраженному в градусах, сопоставим плоскую волну. Получим

$$W(x, \vartheta) = \exp[iu(\vartheta)x], \quad (6)$$

где волновой вектор $u(\vartheta)$ имеет вид

$$u(\vartheta) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{360}\vartheta\right), \quad (7)$$

x – координата точки пространства в прямоугольной системе координат x, y . В ее центре находится край приемной антенны, ориентированной вдоль оси x . Ось y направлена в сторону излучателя, находящегося на этой оси.

Для образования волнового поля следует сложить плоские волны (6), придав им случайные амплитуды (5). В результате получим следующее волновое поле:

$$P(x, n) = \sum_{\vartheta} W(x, \vartheta)q(\vartheta, n). \quad (8)$$

Введя случайные амплитуды и фазы плоских волн в виде (5), мы получаем поле как бы с результатом интерференции плоских волн. Поместив в это поле антенну, апертура которой линейна и ориентирована вдоль оси x , получим набор мгновенных откликов антенны, как Фурье-спектр поля по координате x в пределах апертуры для каждого значения n . Эти отклики можно сопоставлять с экспериментом.

Статистические характеристики волнового поля, полученные в эксперименте, определяются следующими соотношениями:

$$R(x) = 1 - \left| \frac{C(x)}{\sqrt{CE(x)CE(31)}} \right|, \quad (9)$$

где $C(x) = \frac{1}{N} \sum_n P(x, n)\overline{P(31, n)}$, $CE(x) = \frac{1}{N} \sum_n [|P(x, n)|]^2$;

$$R1(x) = 1 - \left| \frac{C1(x)}{\sqrt{CE(x)CE(x+1)}} \right|, \quad (10)$$

где $C1(x) = \frac{1}{N} \sum_n P(x, n) \overline{P(x+1, n)}$,

$$K(x) = \frac{R2(x)}{R1(x)}, \quad (11)$$

где $R2(x) = 1 - \left| \frac{C2(x)}{\sqrt{CE(x)CE(x+2)}} \right|$, $C2(x) = \frac{1}{N} \sum_n P(x, n) \overline{P(x+2, n)}$.

Статистические характеристики поля, определяемые выражениями (9), (10) и (11), находили экспериментально.

Таким образом, мы имеем возможность сравнивать эти характеристики с полученными экспериментально и по их сходству или различию судить о сходствах или различиях изображений, полученных в опыте и на компьютере.

В качестве первого шага формирования изображения рассеивающей области было взято изображение, приведенное в [6]. С помощью приведенных формул были получены необходимые статистические характеристики и мгновенный отклик антенны, которые были сопоставлены с результатами, полученными экспериментально. Результаты существенно разошлись, что говорило о несоответствии компьютерного изображения с искомым. Корреляция между значениями функции $R(x)$ была явно меньше корреляции между значениями функции $A(j)$ ряда НР. Это связано с тем, что в компьютерном изображении угловой спектр сигналов был очень широким, охватывающим весь сектор углов, по которым сигналы приходят на антенну. Изменение параметров среды, принятых в расчетах компьютерного изображения (поглощение, глубина волновода, расстояние между излучателем и приемником, характеристики степени убывания рассеянных волн), не приводили к изменению функции $R(x)$ в сторону ее большего соответствия $A(j)$. Поэтому деформацию компьютерного изображения мы осуществляли с помощью внешнего параметра, не рассмотренного в [6].

Как уже отмечалось, сигнал НР перед обработкой подвергали узкополосной фильтрации. Это могло привести к исключению или существенному ослаблению рассеяния из тех областей, в которых частоты рассеянных сигналов имели доплеровское смещение частоты, превышающее полосу пропускания фильтра. Относительное распределение доплеровских смещений частот в плоскости рассеивающей поверхности показано на рис. 2. Применение частотной фильтрации приводит к ограничению размера и изменению формы области, откуда могут приходиться рассеянные сигналы. Соответствующие изменения в связи

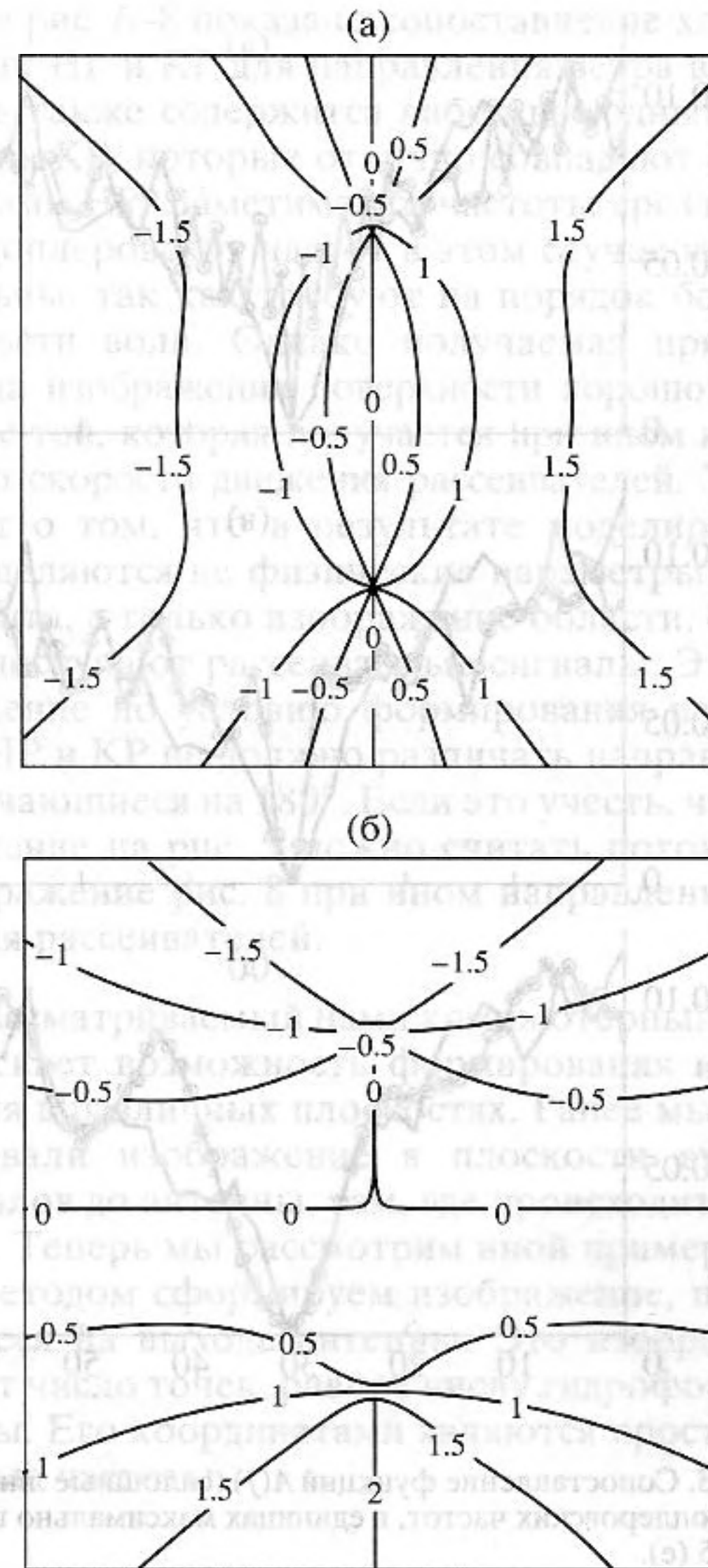


Рис. 2. Вид сверху на поверхность с проведенными на ней изолиниями доплеровского смещения частоты при движении рассеивателя поперек трассы (вдоль x) (а) и вдоль трассы (б).

с фильтрацией доплеровских частот вносились в исходное компьютерное изображение. В результате форма области, из которой могут приходиться рассеянные сигналы, деформировалась. При этом было учтено, что фильтр не полностью убирает сигналы, находящиеся вне его полосы пропускания. Часть сигнала, не подверженного фильтрации (ослабленная на 25 дБ), прибавлялась к отфильтрованному сигналу. Степень ослабления подбирали исходя из соответствия формы мгновенных откликов антенны в рядах НР и КР.

Результаты сопоставления параметров НР и КР представлены отдельно для разных направлений скорости движения рассеивателей вдоль осей x и y соответственно. На рис. 3 представлены корреляционные функции для фильтра, срезающего

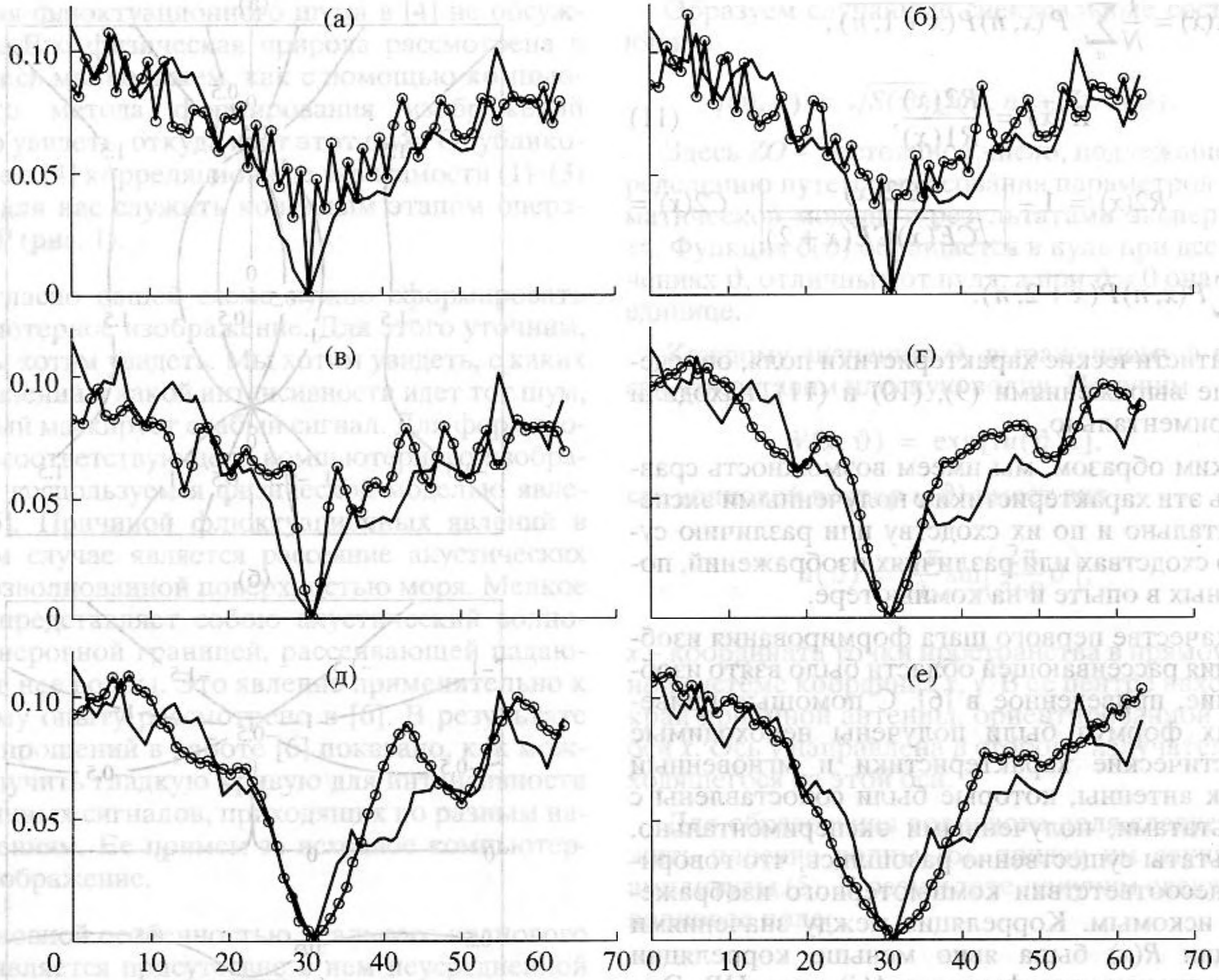


Рис. 3. Сопоставление функций $A(j)$ (сплошные линии) и $R(j)$ (линии с кружочками) для граничных частот среза фильтра доплеровских частот, в единицах максимально возможного смещения частоты; 1 (а), 0.5 (б), 0.15 (в), 0.1 (г), 0.075 (д) и 0.05 (е).

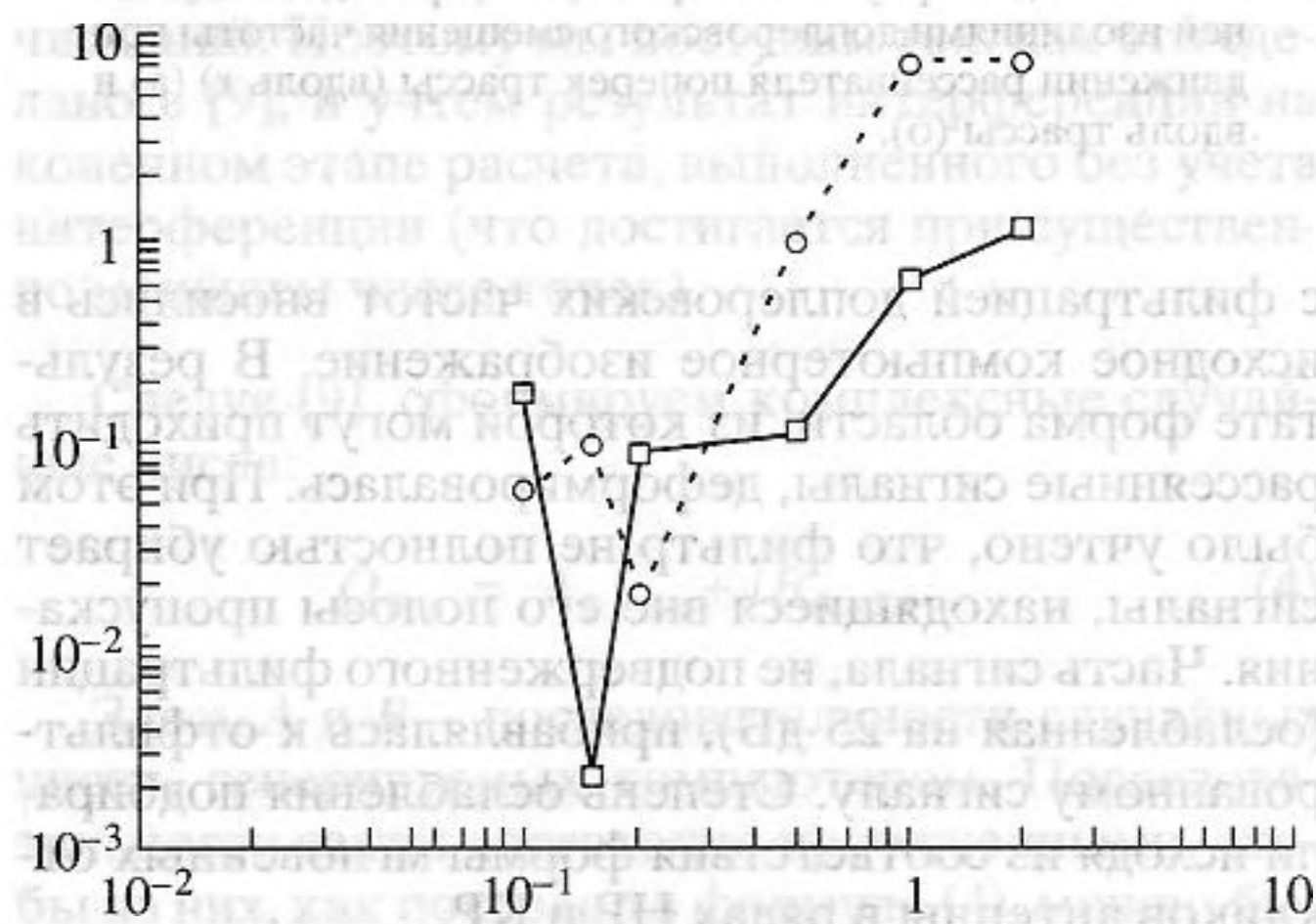


Рис. 4. Изменение параметров NR и KR в зависимости от граничной частоты среза фильтра доплеровских частот. Квадраты разностей средних значений вдоль антенны $B(j)$, $R1(j)$ (кружочки) и $C(j)$, $K(j)$ (квадратики), деленные на их произведения.

доплеровские частоты на различном уровне от максимального доплеровского смещения. Другие параметры усредняли для их сопоставления вдоль антенны, и поэтому они представлены на рис. 4 в виде графика. На рис. 5 показаны компьютерные изображения, соответствующие тем полосам пропускания фильтра, при которых производилось сопоставление.

Как видно из рис. 3 и 4, согласие параметров NR и KR получается при срезе фильтра 0.075 от максимального доплеровского смещения частоты. Соответствующее этому значению частоты среза фильтра компьютерное изображение на рис. 5 дано жирной сплошной линией. Изображения, соответствующие иным значениям частоты среза фильтра, даны пунктиром, линия которого тем тоньше, чем шире соответствующий доплеровский фильтр. Эти изображения показывают разрешающую способность метода. Для того чтобы частота среза доплеровского фильтра, рав-

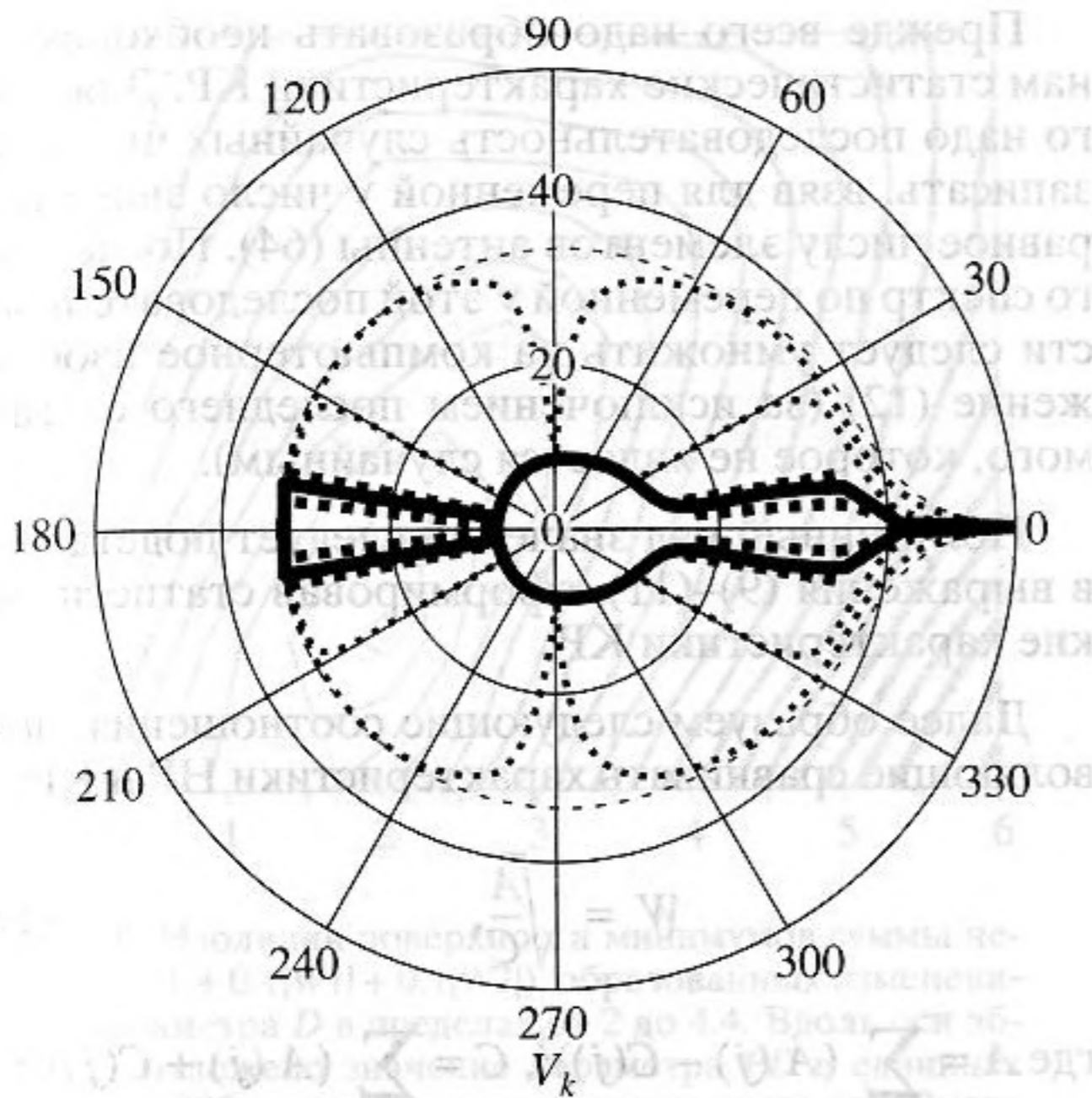


Рис. 5. Угловое распределение интенсивности рассеянного поля при полосах фильтра доплеровских частот, перечисленных в подписи к рис. 3. К значениям уровня (в дБ) по отношению к максимальному уровню каждого распределения добавлено число +55, чтобы сделать его всюду положительным.

ная 0.1 максимального доплеровского смещения совпадала с фактической частотой среза фильтра 0.2 Гц, указанной в [4], надо, чтобы скорость волн на поверхности была бы ≈ 5 м/с, что является реальным.

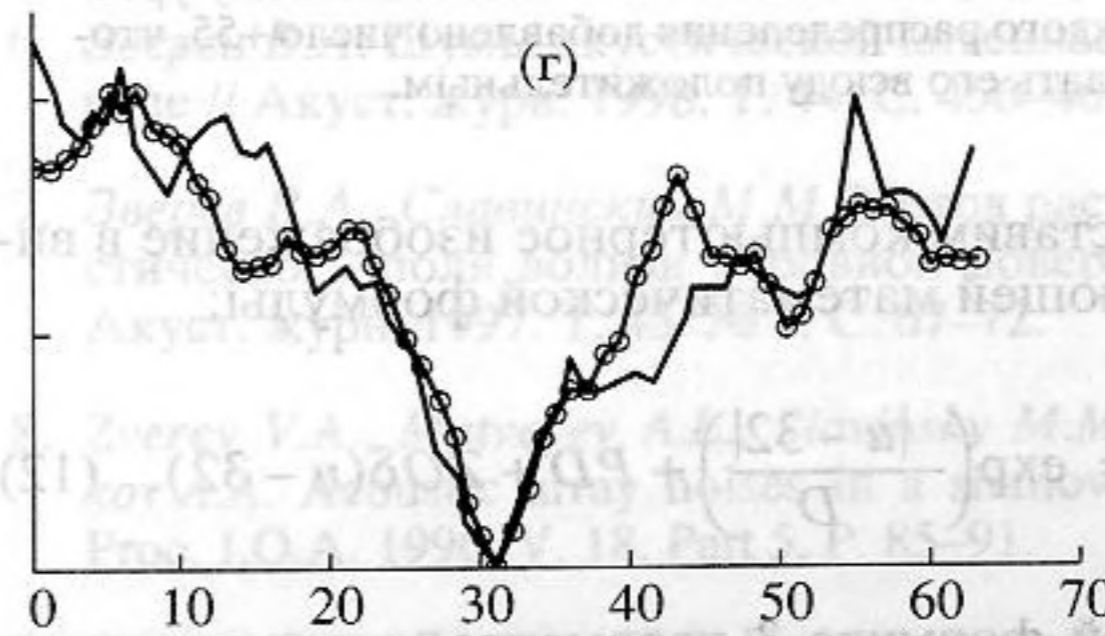
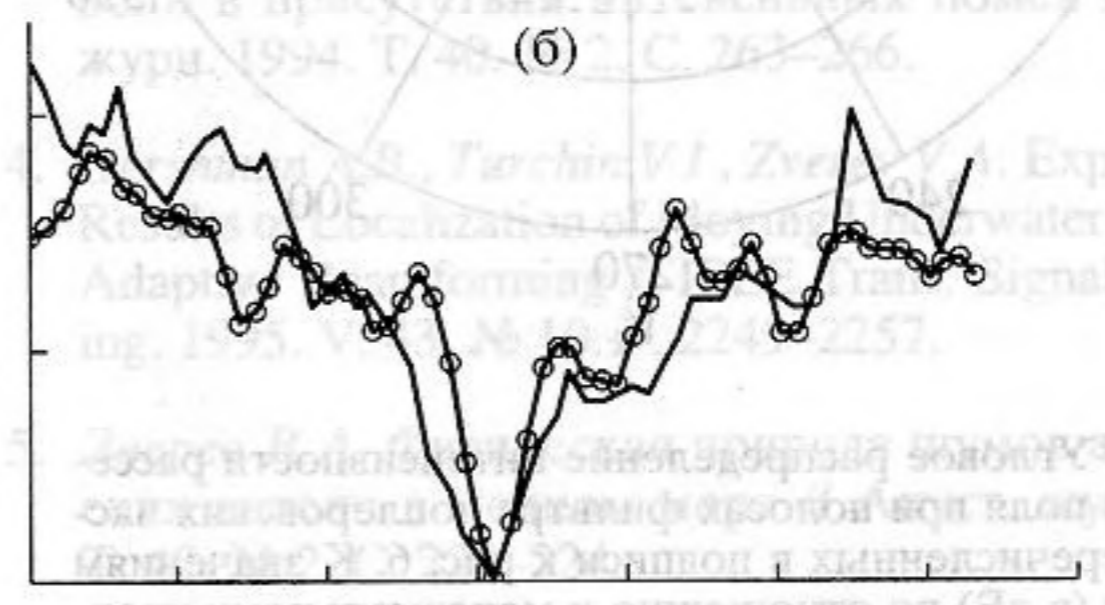
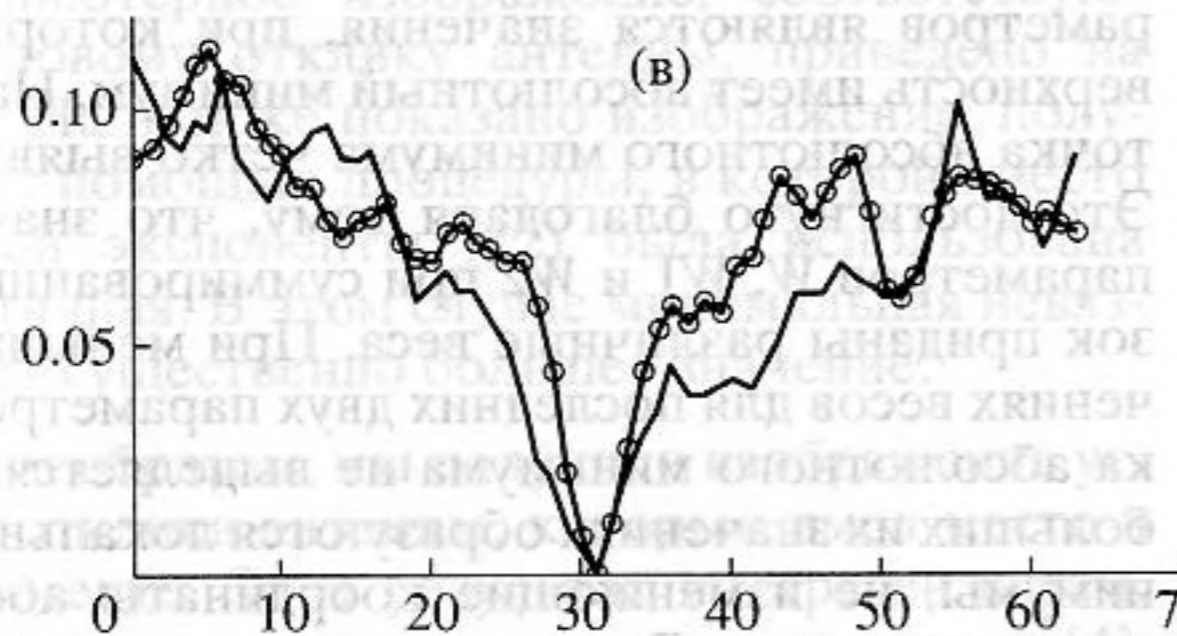
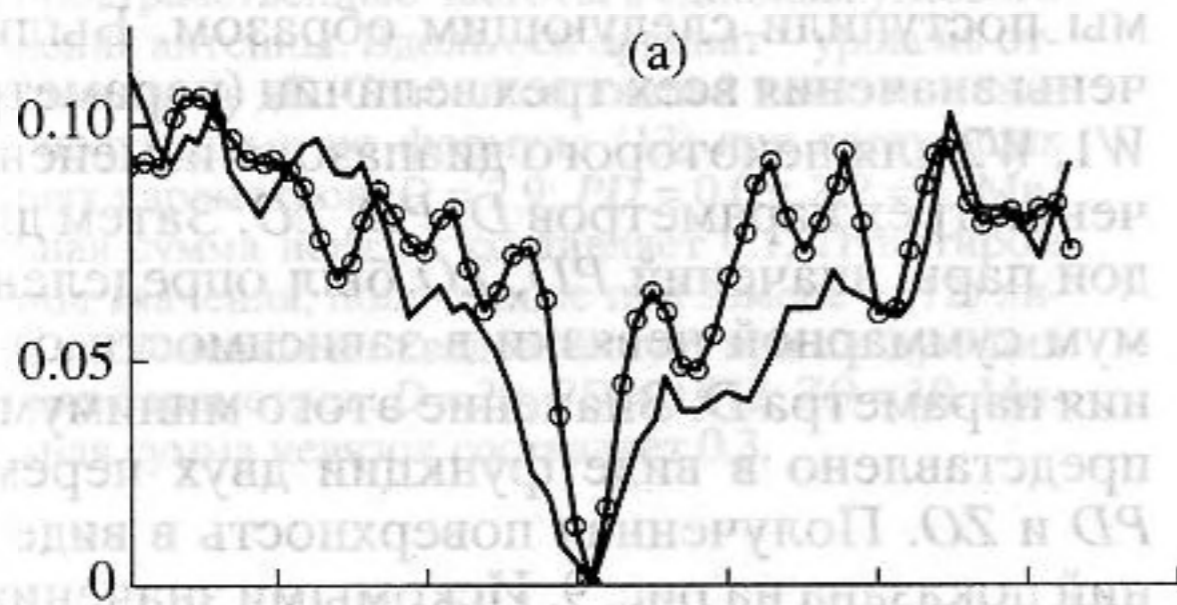


Рис. 6. Сопоставление функций $A(j)$ (сплошные линии) и $R(j)$ (линии с кружочками) для граничных частот среза фильтра доплеровских частот, в единицах максимально возможного смещения частоты: 1 (а), 0.1 (б), 0.05 (в) и 0.01 (г).

На рис. 6–8 показано сопоставление характеристик НР и КР для направления ветра вдоль y . Здесь также содержится набор выходных параметров КР, которые отлично совпадают с параметрами НР. Заметим, что частоты среза фильтра доплеровских частот в этом случае явно нереальны, так как требуют на порядок большей скорости волн. Однако получаемая при этом форма изображения поверхности хорошо совпадает с той, которая получается при ином направлении скорости движения рассеивателей. Это говорит о том, что в результате моделирования определяются не физические параметры эксперимента, а только изображение области, с которой поступают рассеиваемые сигналы. Это изображение по условию формирования параметров НР и КР не должно различать направления, отличающиеся на 180° . Если это учесть, что изображение на рис. 5 можно считать похожим на изображение рис. 8 при ином направлении движения рассеивателей.

Рассматриваемый нами компьютерный метод допускает возможность формирования изображения в различных плоскостях. Ранее мы сформировали изображение в плоскости входных сигналов до антенны, там, где происходит рассеяние. Теперь мы рассмотрим иной пример и тем же методом сформируем изображение, получающееся на выходе антенны. Это изображение имеет число точек, равное числу гидрофонов антенны. Его координатами являются пространственные частоты.

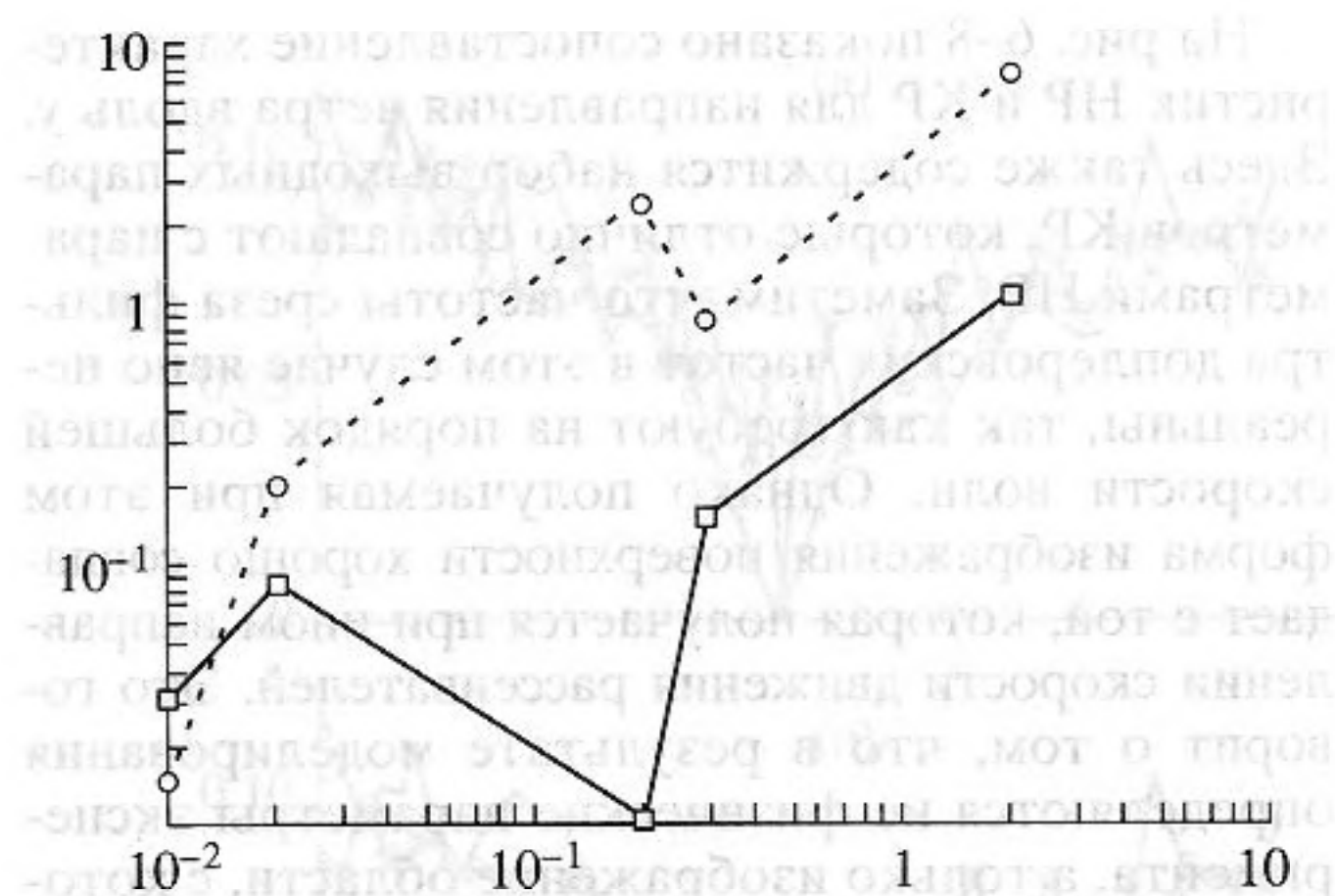


Рис. 7. Изменение параметров НР и КР в зависимости от граничной частоты среза фильтра доплеровских частот. Квадраты разностей средних значений вдоль антенны $B(j)$, $R1(j)$ (кружочки) и $C(j)$, $K(j)$ (квадратики), деленные на их произведения.

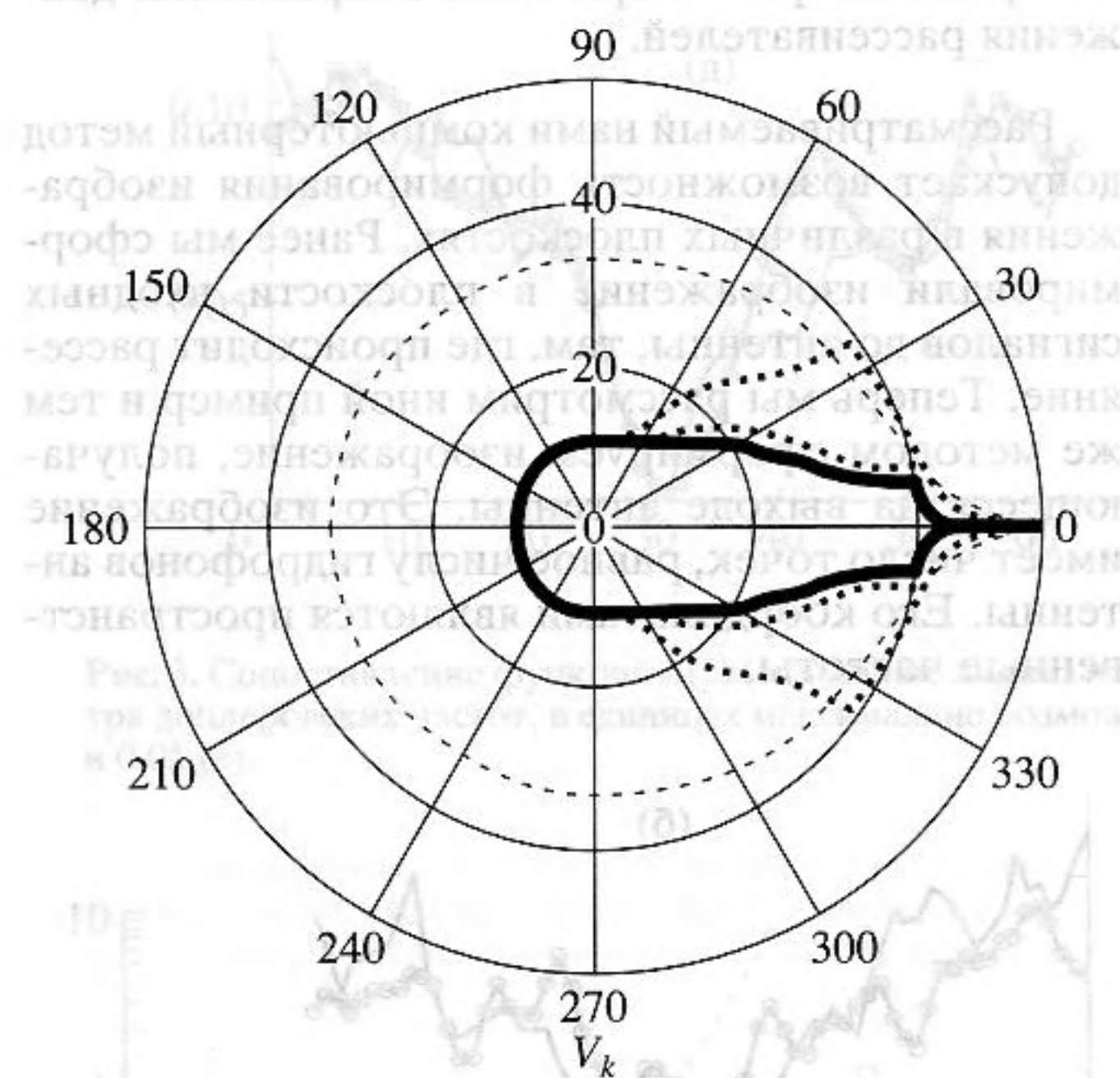


Рис. 8. Угловое распределение интенсивности рассеянного поля при полосах фильтра доплеровских частот, перечисленных в подписи к рис. 6. К значениям уровня (в дБ) по отношению к максимальному уровню каждого распределения добавлено число +55, чтобы сделать его всюду положительным.

Представим компьютерное изображение в виде следующей математической формулы:

$$F(u) = \exp\left(-\frac{|u-32|}{D}\right) + PD + ZO\delta(u-32). \quad (12)$$

В этой формуле 3 параметра, значения которых надо подобрать так, чтобы максимально сблизить статистические характеристики НР и КР.

Прежде всего надо образовать необходимые нам статистические характеристики КР. Для этого надо последовательность случайных чисел (4) записать, взяв для переменной v число значений, равное числу элементов антенны (64). После этого спектр по переменной v этой последовательности следует умножить на компьютерное изображение (12) (за исключением последнего слагаемого, которое не является случайным).

Полученный ряд значений следует подставить в выражения (9)–(11), сформировав статистические характеристики КР.

Далее образуем следующие соотношения, позволяющие сравнивать характеристики НР и КР:

$$W = \sqrt{\frac{A}{C}}, \quad (13)$$

$$\text{где } A = \sum_j (A(j) - C(j))^2, \quad C = \sum_j (A(j) + C(j))^2;$$

$$W1 = \frac{\langle B(j) \rangle - \langle R1(j) \rangle}{\langle B(j) \rangle + \langle R1(j) \rangle}, \quad (14)$$

$$W2 = \frac{\langle C(j) \rangle - \langle K(j) \rangle}{\langle C(j) \rangle + \langle K(j) \rangle}. \quad (15)$$

Значения W , $W1$, $W2$ рассматриваются как невязки между характеристиками КР и НР. Параметры компьютерного изображения подбираются так, чтобы минимизировать сумму этих невязок по абсолютному числу.

Для этой цели может быть применена соответствующая математическая процедура. Например, мы поступили следующим образом. Были получены значения всех трех величин (параметров) W , $W1$, $W2$ для некоторого диапазона изменения значений трех параметров D , PD , ZO . Затем для каждой пары значений PD , ZO был определен минимум суммарной невязки в зависимости от значения параметра D . Значение этого минимума было представлено в виде функции двух переменных PD и ZO . Полученная поверхность в виде изолиний показана на рис. 9. Искомыми значениями параметров являются значения, при которых поверхность имеет абсолютный минимум. На рис. 9 точка абсолютного минимума четко выявляется. Это достигнуто благодаря тому, что значениям параметров W , $W1$ и $W2$ при суммировании невязок приданы различные веса. При меньших значениях весов для последних двух параметров точка абсолютного минимума не выделяется, а при больших их значениях образуются локальные минимумы, не изменяющие координаты абсолютного минимума. Локальные минимумы лишают картину наглядности, если на ней не указывать значения проведенных линий уровня.

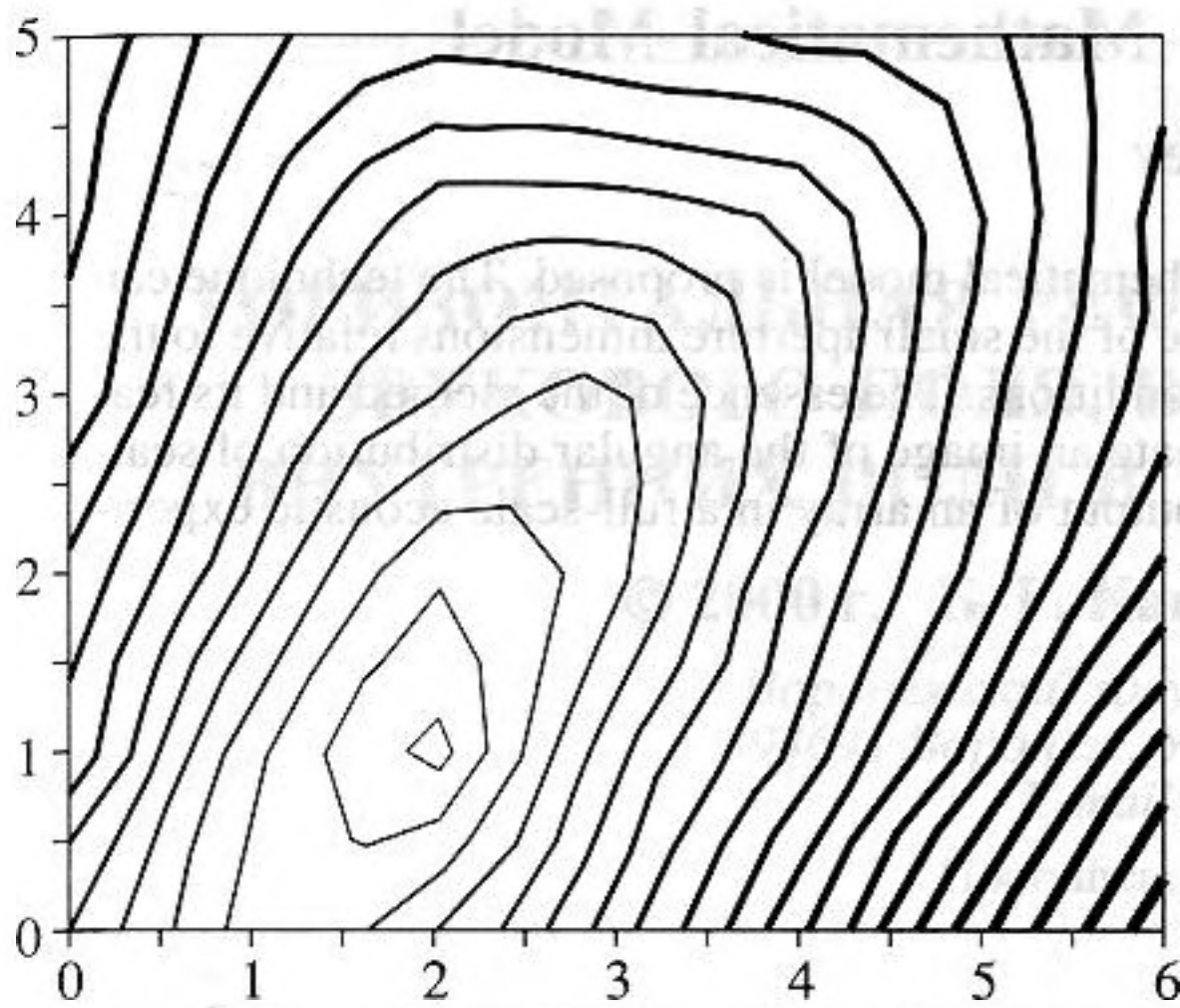


Рис. 9. Изолинии поверхности минимумов суммы невязок $(W + 0.1|W1| + 0.1|W2|)$, образованных изменением параметра D в пределах от 2 до 4.4. Вдоль оси абсцисс отложено значение параметра PD в единицах $0.04 + 0.005x$, где значения x указаны вдоль оси. Вдоль оси y отложено значение параметра ZO в единицах $7 + 0.5y$, где значения y указаны на оси.

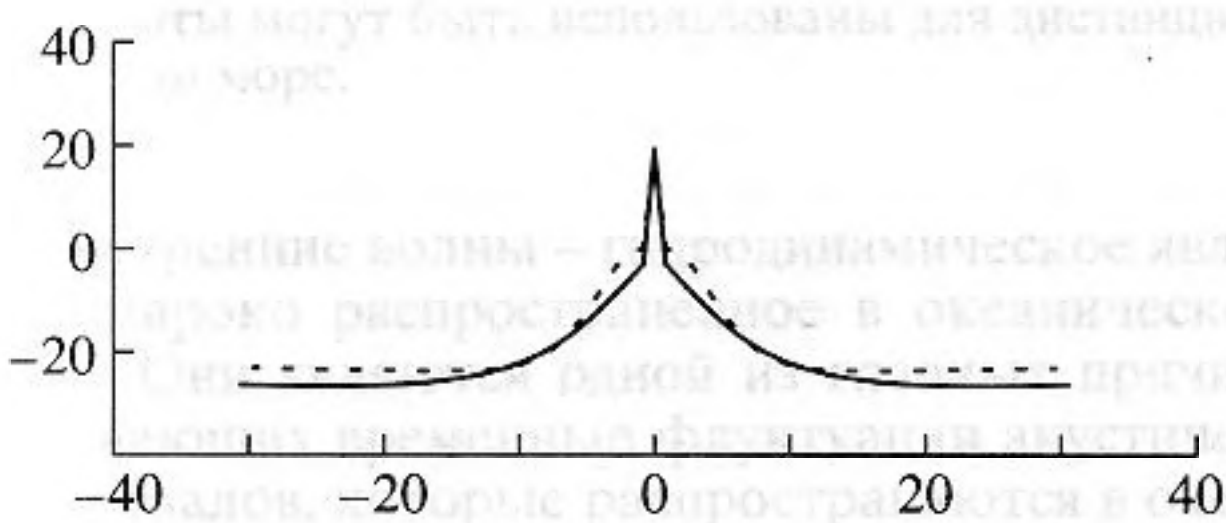


Рис. 10. Форма отклика антенны на сигнал, прошедший через исследуемую среду. Вдоль оси абсцисс отложены пространственные частоты в единицах углового разрешения антенны. Вдоль оси ординат – уровень отклика антенны в дБ. Сплошной линией показаны значения, полученные по формуле (12) при следующих значениях параметров: $D = 2.9$; $PD = 0.05$; $ZO = 8$. Минимальная сумма невязок составляет 0.1. Пунктиром показаны значения, полученные при замене в (12) линейной экспоненты на квадратичную при следующих значениях параметров: $D = 20$, $PD = 0.072$; $ZO = 10$. Минимальная сумма невязок составляет 0.3.

Компьютерное изображение, соответствующее угловому отклику антенны, приведено на рис. 10. На нем же показано изображение, полученное с помощью процедуры, в которой вместо линейной экспоненты (12) была использована квадратичная. В этом случае минимальная невязка имеет существенно большее значение.

Таким образом, мы получили изображение углового отклика антенны, который имел место в эксперименте. Этот результат интересен и тем, что позволяет получить все выводы статьи [4], используя для этого сигнал одного излучателя без использования второго и всей примененной в

экспериментальной работе хитроумной техники выделения слабого сигнала. Действительно, спектральный уровень изображения закрывает весь акустический горизонт, показывая уровень шума, который несет с собой мощный сигнал. Уровень минимального сигнала, который может быть выделен на фоне сильного сигнала, определяется по компьютерному изображению, полученному на антенне, с помощью обычных статистических оценок. Такой расчет может быть сделан для всех значений углов, а не только для тех, на которых в данный момент находится слабый излучатель.

Таким образом, построение компьютерных изображений дает возможность чуточку глубже проникнуть в физику явлений благодаря тому, что видна форма углового распределения рассеянных сигналов. Практическое значение метода заключается в возможности наглядно увидеть распределение помех, создаваемых сильным сигналом в волноводе с неровными и движущимися границами.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 96-15-96603, № 96-02-18621 и № 97-02-17555).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А. Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975.
2. Зверев В.А. Апертурный синтез в акустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 5. С. 790–794.
3. Зверев В.А. Исследование рассеяния акустических волн в присутствии интенсивных помех // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 263–266.
4. Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A. Experimental Results of Localization of Moving Underwater Signal by Adaptive Beamforming // IEEE Trans. Signal Processing. 1995. V. 43. № 10. P. 2249–2257.
5. Зверев В.А. Физическая природа шумов акустических антенн в мелком море // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 220–224.
6. Зверев В.А. Шумы акустической антенны в волноводе // Акуст. журн. 1998. Т. 44. С. 456–461.
7. Зверев В.А., Славинский М.М. Метод расчета акустического поля вблизи неровной поверхности // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 1. С. 67–72.
8. Zverev V.A., Matveyev A.L., Slavinsky M.M., Stromkov A.A. Acoustic array noises in a shallow water // Proc. I.O.A. 1996. V. 18. Part 5. P. 85–91.
9. Зверев В.А., Литвак Н.В. Численное моделирование случайных акустических полей // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6. С. 807–815.

Acoustic Imaging Based on a Mathematical Model

V. A. Zverev

A technique for creating an acoustic image based on its mathematical model is proposed. The technique can be used when conventional methods are inapplicable because of the small aperture dimensions relative to the wavelength, the presence of fluctuations, or nonstationary conditions. The essence of the method and its features are illustrated by examples. The method is used to create an image of the angular distribution of scattered signals and of the angular spectrum of signals at the output of an array in a full-scale acoustic experiment.

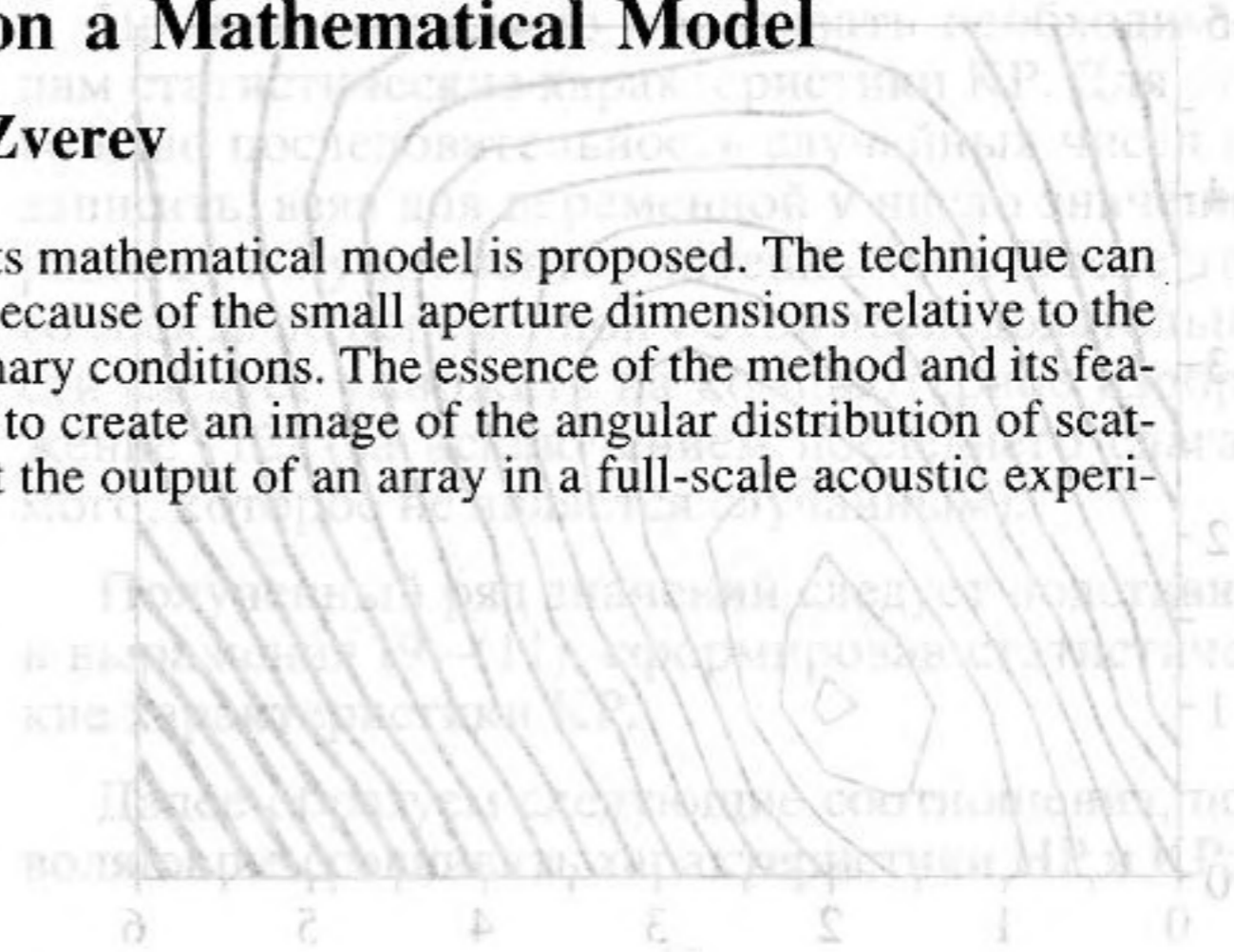


Рис. 9. Наглядное изображение минимальных изменений $(W + 0.1|W| + 0.1|W|)$ образованных изменением W в пределах от 2 до 4.4. Вдоль оси δ (горизонтальная) и γ (вертикальная) указаны значения δ и γ в градусах. Вдоль оси δ отложено значение параметра δ в градусах $(\delta + 0.2)$, где значение δ отложено на ось δ .

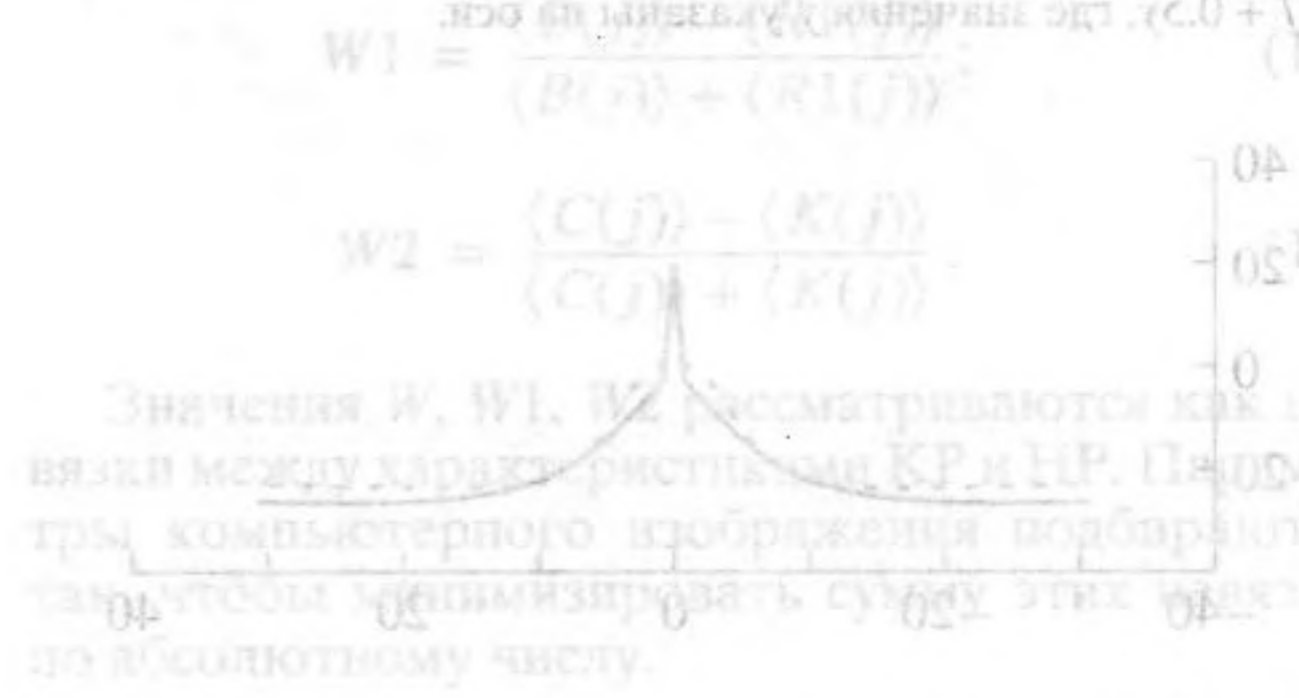


Рис. 10. Форма кривой W в зависимости от δ . Вдоль оси δ отложено значение δ в градусах $(\delta + 0.2)$, где значение δ отложено на ось δ . Вдоль оси W отложено значение W в градусах $(W + 0.2)$, где значение W отложено на ось W .

В работе описана методика формирования акустического образа на основе математической модели. Методика может быть использована в тех случаях, когда традиционные методы не применимы из-за малых размеров апертуры относительно длины волны, наличия флуктуаций или нестационарных условий. Суть метода и его особенности иллюстрируются примерами. Метод используется для формирования изображения углового распределения рассеянных сигналов и углового спектра сигналов на выходе массива в полномасштабном акустическом эксперименте.

Такая методика формирования акустического образа может быть использована в тех случаях, когда традиционные методы не применимы из-за малых размеров апертуры относительно длины волны, наличия флуктуаций или нестационарных условий. Суть метода и его особенности иллюстрируются примерами. Метод используется для формирования изображения углового распределения рассеянных сигналов и углового спектра сигналов на выходе массива в полномасштабном акустическом эксперименте.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 96-12-96603, № 96-02-18621 и № 97-02-12225).



1. Зверев В.А. Радиотехника. М.: Сов. радио, 1972.

2. Зверев В.А. Алгоритмы обработки сигналов в акустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 8. С. 290-294.

3. Зверев В.А. Исследование рассеяния акустических волн в присутствии вращающихся помех // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 263-266.

4. Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A. Experimental Results of Localization of Moving Underwater Signal by Adaptive Beamforming // IEEE Trans. Signal Process. 1995. V. 43. № 10. P. 2249-2257.

5. Зверев В.А. Физическая теория звуковых волн в среде с вращением // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 6. С. 220-224.

6. Зверев В.А. Шумовая акустика вращающихся объектов // Акуст. журн. 1998. Т. 44. С. 456-461.

7. Зверев В.А., Славинский М.М. Метод расчета акустического поля вращающейся поверхности // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 1. С. 67-72.

8. Zverev V.A., Malozemov A.D., Slavinitsky M.M. Stromkov A.A. Acoustic array noise in a shallow water // Proc. I.O.A. 1996. V. 18. Part 2. P. 82-91.

9. Зверев В.А., Славинский М.М. Расчет акустического поля вращающейся поверхности // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 6. С. 807-812.