АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2011, том 57, № 4, с. 534–544

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.3/535.2

КОГЕРЕНТНЫЙ СИНТЕЗ АПЕРТУРЫ ПО НЕКОГЕРЕНТНОМУ СИГНАЛУ

© 2011 г. В. А. Зверев, П. И. Коротин, А. Л. Матвеев

Институт прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru, matveyev@hydro.appl.sci-nnov.ru

Статья поступила 23.09.2010 г.

Рассмотрена процедура синтеза апертуры по некогерентному источнику при перемещении приемной системы в пространстве. Преимуществами метода являются возможность синтеза апертуры при помощи антенн, состоящих из двух приемников и применимость как к источнику квазимонохроматического сигнала, так и обладающему сплошным спектром. Метод применим при тех же ограничениях, что и известные методы, использующие процедуры фазирования сигналов. Приведены результаты математического моделирования синтеза при пеленгации двух источников на различных дистанциях с близкими частотами и в присутствии шума, а также результаты натурного опыта с реверберационной помехой. Предложен и апробирован на натурном опыте алгоритм сокращения времени синтеза апертуры без потери разрешающей способности.

Ключевые слова: синтез апертуры, протяженная антенна, акустический источник.

ВВЕДЕНИЕ

Синтезом апертуры или апертурным синтезом (АС) мы называем процедуру, позволяющую увеличивать эквивалентные геометрические размеры приемной системы за счет совместной обработки сигналов в различных положениях при ее движении.

Хорошо известны способы осуществления синтеза апертуры в радиодиапазоне в радиоастрономии [1] и в радиолокации [2]. В радиолокации АС широко применяется в активном режиме к полностью известным сигналам. Этот способ, в принципе, может быть использован для активной локации и в акустике, однако низкая скорость звука сравнительно со скоростью света и особенности условий распространения существенно ограничивают результативность его использования. АС, используемый в радиоастрономии и известный как АС Райла, применим для пассивного режима шумопеленгации с условием, что его использование предполагает изменение расстояния между приемниками антенны или изменение ориентации антенны в пространстве.

В гидроакустике получили распространение гибкие протяженные буксируемые антенны. Движение такой антенны вдоль своей оси весьма заманчиво использовать для увеличения приемной апертуры с помощью АС [3, 4]. При криволинейном движении носителя бортовые антенны могут формировать планарную двумерную апертуру, предоставляя новые возможности для шумопеленгации. Однако использовать, например, алгоритм Райла при движении антенн без модернизации невозможно.

В акустике в первую очередь интересна процедура, позволяющая синтезировать апертуру в течение времени, существенно превышающего время когерентности источника. В частности, высокую направленность на низких частотах можно обеспечить только с помощью АС за счет движения антенны или источника [5]. При этом синтезированная апертура может перекрыть значительное количество зон Френеля, что решает задачу определения дальности до цели в низкочастотной области. Кроме того, АС для акустики обладает рядом особенностей, в частности, позволяет расширить частотный диапазон формирования диаграммы направленности по сравнению с физической апертурой буксируемой антенны [6,7].

Протяженная антенна в пределах своей апертуры пеленгует источники независимо от степени когерентности их излучения. Одновременный прием сигнала на всей апертуре антенны приводит к тому, что случайные изменения фазы источника приводят к синхронному изменению фаз колебаний на всей физической апертуре. Такое изменение фазы не сказывается на результатах лоцирования источника. Буксировка антенны и ее перемещение даже на величину ее собственной апертуры требуют такого времени, за которое фаза колебания источника существенно изменяется. Это изменение фазы препятствует когерентной обработке сигналов с антенны и простому на-

ращиванию величины апертуры антенны при ее движении. В акустике известен способ осуществления АС в пассивном режиме по квазимонохроматическому сигналу, не обладающему нужной когерентностью для достижения необходимого размера апертуры. Этот способ использует движение акустической антенны с достаточно большой физической апертурой. Изменение фазы колебания источника для буксируемых антенн можно компенсировать путем применения процедуры ETAM (Extended Towed Array Measurements) [3]. Процедура включает измерение разностей фаз сигналов антенн, принятых в разные моменты времени, но занимающих одно и то же положение в пространстве. Синтез осуществляется пошагово, величина шага меньше длины антенны, что создает общие участки в апертурах в разные моменты времени [3, 4]. Разность фаз, измеренную на общем участке, используют для коррекции фазы на участке добавленной апертуры.

Фактически по тем ограничениям, которые существуют в ETAM, она эквивалентна последетекторной обработке сигнала со всеми вытекающими из этого отрицательными факторами: возможностью обработки только одного предварительно выделенного сигнала с достаточно большим уровнем по отношению к шуму. Хотя сигнал не подвергается процедуре детектирования, но алгоритм требует определения фазы сигнала, т.е. сигнал должен превышать случайный шум. Кроме того, другой сигнал, принимаемый антенной в той же полосе частот с другого направления, исказит распределение фазы на всей физической апертуре антенны, что не может быть учтено при обработке в априори неизвестной ситуации.

Учет изменения фазы источника на отдельном приемнике может быть с успехом при тех же ограничениях заменен процедурой обработки сигнала с аргументом, пропорциональным разности фаз сигналов приемников антенны. Продетектируем принятый и предварительно выделенный узкополосный сигнал с помощью фазового детектора, выделив его фазу. После этого продифференцируем сигнал фазы вдоль антенны в пределах ее апертуры. Производная фазы по времени является частотой сигнала, а производная фазы по координате вдоль антенны пропорциональна пространственной частоте. Разность фаз между приемниками или производная фазы по пространству (пространственная частота) не зависит от фазы сигнала источника, а зависит только лишь от его частоты (длины волны) и положения источника относительно апертуры антенны, вдоль которой производится дифференцирование. В силу этого разность фаз двух приемников даже при некогерентном по времени источнике сохраняется при их движении, и по этому сигналу может быть осуществлен когерентный синтез апертуры без предварительного фазирования и выравнивания амплитуд сигналов. Возможность синтеза апертуры по сигналу, сформированному с использованием разности фаз или задержек (для широкополосных сигналов) для движущихся приемников, является предметом рассмотрения в настоящей статье как теоретически, так и с помощью математических моделей и натурного опыта в условиях сильной реверберационной помехи, характерной для акустики.

Обработка сигнала после фазового детектора известна и успешно применялась в радиофизике [8, 9]. Один из авторов этой статьи В.А. Зверев принимал непосредственное участие в этих работах в далеком 1948 г., будучи в это время дипломником у автора метода обработки И.Л. Берштейна, экспериментально подтвердившего практическую осуществимость в радиофизике [8–12] описанного далее алгоритма апертурного синтеза, имеющего много общего с механизмом бинаурального слуха [13].

Синтез апертуры на низких частотах требует значительного времени и поэтому актуальна задача снижения времени синтеза с сохранением разрешающей способности. Эта задача решена здесь в ходе натурного опыта, сильно осложненного исключительно сильной реверберационной помехой.

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПО КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

Сначала рассмотрим простейший вариант АС, на котором удобно показать некоторые его общие свойства.

Пусть в свободном пространстве имеется точечный источник квазимонохроматического сигнала с неизвестной частотой ω, модулированный шумом со сплошным спектром в пределах полосы частот $\Delta\omega$. Ширина его спектра, несмотря на изменение его частоты и модуляцию шумом, остается много меньшей его частоты. Антенна, обладающая N приемниками, расположенными на прямой линии через интервалы Δd движется со скоростью v вдоль направления линии, по которой расположены приемники. Пусть дистанция до излучателя по нормали к траектории движения будет R. Пусть длина антенны $(N - 1)\Delta d \ll c/\Delta\omega$, т.е. длина антенны много меньше длины цуга пространственной когерентности излучаемого сигнала с учетом его модуляции шумовым сигналом. В этом случае сигнал, принимаемый антенной в любой фиксированный момент времени, можно считать монохроматическим, не учитывая наличие в нем шумовой модуляции. Сигнал, при-

нимаемый антенной, можно записать [14, 15] в виде:

$$A(\omega, n, t) = P(\omega, t)\exp\left(i\frac{\omega}{c}r(n, t)\right), \quad (1)$$

где t – время; c – скорость звука; $P(\omega, t)$ – комплексное число, определяемое источником сигнала; $r(n, t)$ – расстояние от приемника антенны с номером $n = 0, \ldots, N-1$ до источника в момент времени t:

$$r(n,t) = \sqrt{R^2 + (L - vt + n\Delta d)^2}, \quad (2)$$

где L – расстояние до точки траверза в начальный момент; v – скорость перемещения антенны вдоль трассы синтезирования. В зависимости от направления движения и начального положения антенны по отношению к траверзу источника скорость v и расстояние L в формуле (2) могут иметь положительные или отрицательные значения. В каждый фиксированный момент времени t комплексная амплитуда (1) определяет сигнал на физической апертуре антенны, равной $(N-1)\Delta d$.

Рассмотрим (1) в два фиксированных момента $t = t_1$ и $t = t_2$, соответствующих перемещению антенны на величину ее апертуры. Что будет, если объединить эти сигналы и обработать их совместно так, будто бы это сигнал, зафиксированный антенной единовременно? Удвоение апертуры будет получено при соблюдении условия:

$$P(\omega,t_1) = P(\omega,t_2). \quad (3)$$

Условие (3) необходимо и достаточно для осуществления когерентного синтеза апертуры. Оно выполняется для сигналов, интервал временной когерентности которых превосходит

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (4)$$

Такой синтез является линейной операцией, не имеющей ограничений на число источников и обладающей оптимальной помехоустойчивостью. Однако на практике движение антенны не является столь быстрым, а интервал временной когерентности столь большим, чтобы условие (3) выполнялось. Диаграмма направленности (ДН) антенны, составленной из двух антенн, не будет эквивалентом антенны с удвоенной апертурой, так как обе ее половины, имея разные фазы и амплитуды, сложатся некогерентно.

Алгоритм ETAM измеряет разности фаз сигналов антенн, принятых в моменты t_1 и t_2 на разных приемниках антенны, занимающих одни и те же позиции в пространстве [3, 4], и "подправляет" фазы на соответствующую величину для приемников на добавленной движением апертуре. Сформулируем альтернативный подход к апертурному синтезу на основе голографической обработки информации [13]. Его, как и голографию, целесообразно разбить на два этапа – это запись информации (создание голограммы) и ее воспроизведение (восстановление источников).

Запись информации. Детектирование фаз сигналов, принятых приемниками антенны, и дифференцирование их по апертуре антенны, осуществим на основе процедуры [13]:

$$AM(\omega,n,t) = A^*(\omega,n,t)\,A(\omega,n+1,t). \quad (5)$$

Подставив принятый сигнал (1) в (5), получим:

$$AM(\omega,n,t) = |A(\omega,n,t)| \times \times |A(\omega,n+1,t)|\exp\left(i\frac{\omega}{c}\Delta r(n,t)\right), \quad (6)$$

где

$$\Delta r(n,t) = r(n+1,t) - r(n,t). \quad (7)$$

Полученные после такой обработки сигналы содержат разности фаз между приемниками антенны и при любых нестабильностях фаз и амплитуд источника когерентны. Эти сигналы можно когерентно накапливать на произвольном интервале времени, что и необходимо для апертурного синтеза. Здесь не учтено в явном виде влияние среды, но операции останутся такими же и при воздействии условий распространения. Естественно предположить, что влияние среды на ближние приемники отличается мало и флуктуации разности их фаз в любом случае меньше, чем флуктуации фазы [16].

Для упрощения последующей обработки полученного сигнала целесообразно использовать аргумент сигнала (6), так как именно он содержит информацию о разности фаз пришедших на разные приемники сигналов:

$$AA(\omega,n,t) = \arg(AM(\omega,n,t)). \quad (8)$$

Синтез апертуры осуществляется объединением сигналов (8), полученных в разных положениях приемной системы: непрерывная апертура получается добавлением сигналов (8) через периоды времени, соответствующие сдвигу антенны на величину физической апертуры. Когерентность объединяемых сигналов обеспечивается за счет устранения при пространственном дифференцировании случайной фазы излучателя, постоянной вдоль антенны. В результате объединения апертур мы получаем распределение разностей фаз между соседними приемниками антенны вдоль всей трассы перемещения антенны, которая может превосходить физическую апертуру антенны во много раз.

Полученный сигнал (6) представляет собой эквивалент оптической или радио голограммы. Сигнал можно записывать с произвольного момента времени. Таким путем получается ряд голограмм, каждая из которых относится к своему начальному моменту. Оказывается, что суммирование голограмм в состоянии защитить запись от характерных для акустики помех. В оптической голографии тоже используется этот прием. Там он обеспечивается наличием в оптической схеме матового стекла. Ниже показывается, что такой

прием (акустическое матовое стекло) эффективен для уменьшения реверберационной помехи.

Восстановление информации. Прежде всего, надо решить, в каком виде мы хотим восстановить информацию, записанную на голограмме. Если необходимы координаты источника в виде пеленга и дальности, то это можно сделать непосредственно по записи голограммы. Действительно, допустим, что мы записали голограмму, используя минимальное число приемников антенны – два. Запись фазы на голограмме или вид голограммы в этом случае описываются как

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}\frac{L - t\Delta m}{R_0}, \qquad (9)$$

где λ – длина волны; L – расстояние от начала движения по трассе до точки траверза; Δm – смещение антенны за время одного отсчета времени; t – число временных отсчетов, являющихся абсциссой голограммы; R_0 – дистанция до излучателя. При отсутствии помех (9) представляет собой прямую линию, положение и наклон которой определяют положение источника относительно трассы движения приемной системы. Для совокупности приемников, прямолинейного движения и удаленного источника это будет совокупность прямых линий. При наличии помех, аддитивных в фазе (мультипликативных помех), нужную информацию можно выделить путем усреднения с целью определения параметров трассы движения по выражению (9).

Для получения диаграммы направленности антенны полученную голограмму следует преобразовать, чтобы получить фазу сигнала вдоль трассы движения антенны. Для этого при прямолинейном движении антенны достаточно (9) проинтегрировать по времени и умножить на $\frac{\Delta m}{\Delta d}$:

$$\Phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\Delta m\frac{L}{R_0}t - \frac{(t\Delta m)^2}{2R_0}\right). \qquad (10)$$

Диаграмма направленности антенны получается из $\Phi(t)$ следующим образом:

$$DG(\alpha, R) = \left|\sum_t \exp\left(i\Phi(t)g\right)\times\right. \qquad (11)$$
$$\left.\times\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}g\left(t\Delta m\sin(\alpha) - \frac{t^2\Delta m^2}{2R}\right)\right]\right|.$$

Множитель g позволяет, как это практикуется в голографии, изменять величину длины волны при воспроизведении. При $g = 1$ мы получаем синтез апертуры на прежней длине волны с соответствующим разрешением по азимуту и дальности. При $g > 1$ при воспроизведении разрешающая способность больше при том же размере синтезируемой апертуры. Такой прием может быть полезен при локации движущихся источников, которые нужно отследить за небольшое время, не позволяющее получить большую апертуру.

Следует заметить, что восстановление голограммы на другой частоте принципиально отличается от используемого в голографии. Отличие заключается в том, что перед воспроизведением изменяется сама голограмма, чего в голографии сделать невозможно. Если поступить так, как это делается в голографии, т.е. только считывать голограмму на иной λ, то изменение масштаба при считывании нивелирует изменение в разрешении, получаемое за счет изменения величины λ.

При восстановлении голограммы на уменьшенной λ, как это сделано в (11), возможно получение неоднозначности пеленга. Чтобы избежать неоднозначности, необходимо и достаточно либо уменьшить сектор обзора по азимуту, а, если это нежелательно, то уменьшить величину Δm в (11) с одновременным увеличением во столько же раз верхнего предела изменения t.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АС С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ В ПРИСУТСТВИИ ШУМА

Основной целью моделирования являлось исследование возможности использования предлагаемого нелинейного метода апертурного синтеза с несколькими источниками равной интенсивности на близких частотах в присутствии аддитивных шумов. В математической модели были взяты источники в дальней зоне синтезированной апертуры. Для АС использовались два приемника на расстоянии 0.19 м. Скорость движения – 0.304 м/с с направлением вдоль линии, соединяющей приемники. Излучатели “А” и “Б” располагались на дистанциях 5 км (А) и 7 км (Б) от траектории движения. Их расстояния вдоль трассы от точки траверза до точки начала синтеза были 1100 м (А) и 30 м (Б); частоты 2404 Гц (А) 2201 Гц (Б). Уровни сигналов, создаваемые А и Б, одинаковы.

Обработка сигналов производилась следующим образом. Принятые сигналы подвергались тонкому спектральному анализу за все время наблюдения. Целью этого анализа являлся не синтез апертуры, а простое выделение сигналов из шума с целью точного измерения частоты сигналов. Эта операция необходима для последующего разделения их по разным каналам обработки, так как синтез апертуры в каждом канале возможен только по одному сигналу. Выделение сигнала производится известным методом (см., например, [17, 18]), который в данном случае сводится к вычислениям по следующей формуле:

$$Q(s, \omega) = \sum_k A(t_k + s)\exp(i\omega t_k). \qquad (12)$$

Здесь k – целое число, принимающее значения через единицу от нуля до M, где M определяется

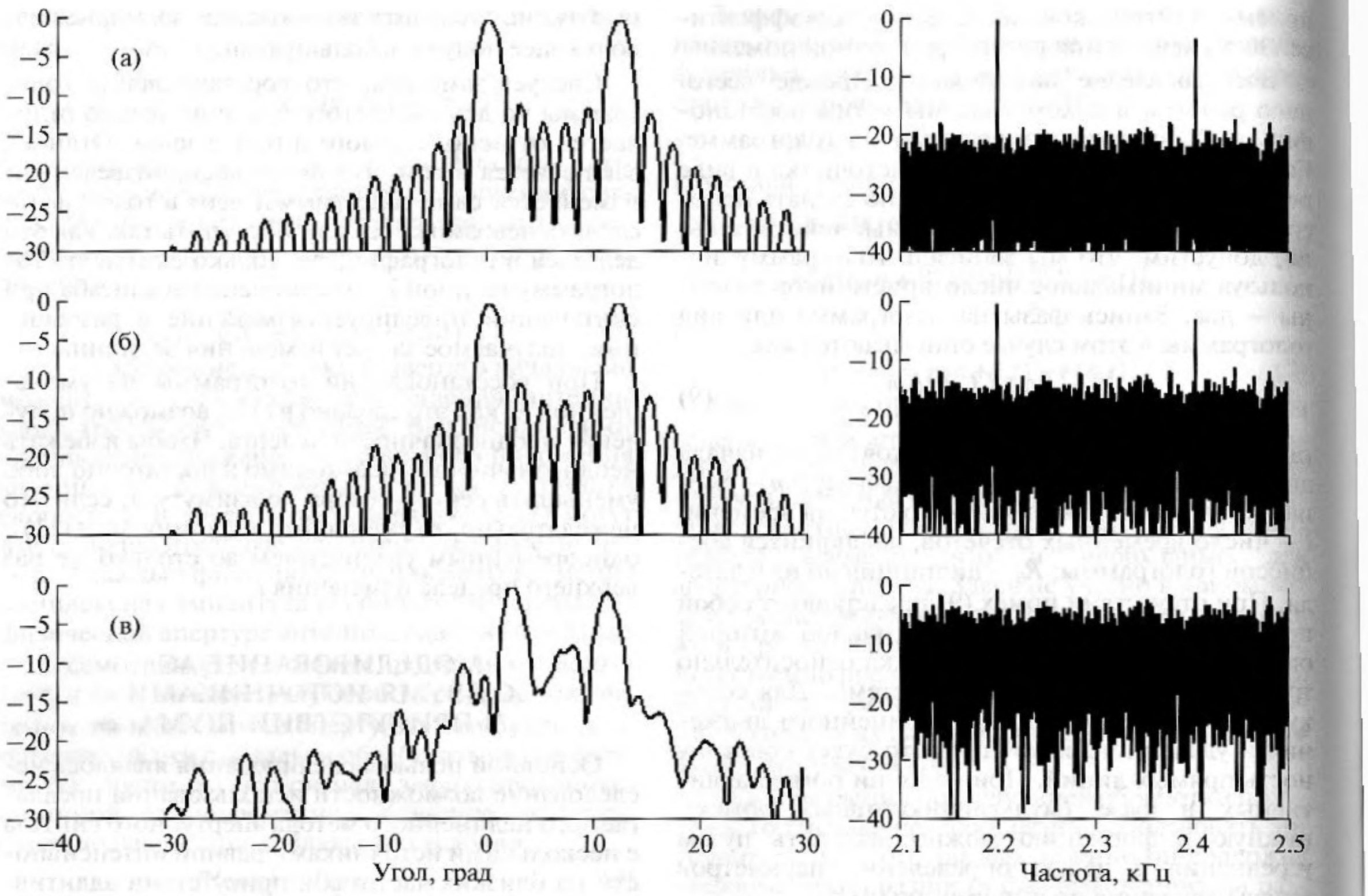

Рис. 1. Отклик синтезированной антенны на сигнал, создаваемый двумя источниками при различном уровне шума, показанном справа в спектре с разрешением 0.1 Гц.

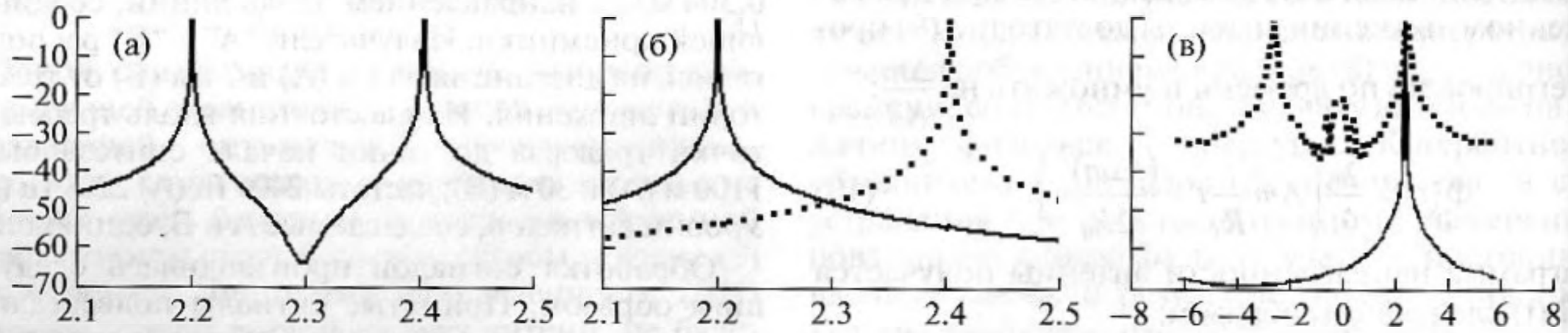

Рис. 2. Спектр входного сигнала за время перемещения антенны на расстояние между ее двумя приемниками 0.19 м в математической модели (а) и в опыте (в – пунктир). Результат разделения сигналов за тоже время (б – модель, в – опыт).

из условия, что $t_M = T$, где T – время перемещения на величину расстояния между двумя приемниками; $t_k = \dfrac{k}{F_s}$, F_s – частота квантования; ω – значение частоты выделяемого сигнала.

В результате вычислений по (12) мы получаем комплексную амплитуду выделенного сигнала, введенного формулой (1). Далее для каждого выделенного на своей частоте сигнала выполняется процедура синтеза апертуры, как это описано выше. В математической модели выбрано время синтеза 60 секунд, что соответствует величине синтезированной апертуры 18.24 м или 96 расстояниям между приемниками. Отклик синтезированной антенны на сигнал двух источников при различном уровне шума показан на рис. 1. На рис. 2 показан спектр входного сигнала (без шумов) за время перемещения на 0.19 м и результат разделения сигналов, выполненный по формуле (12) за

тоже время. Разделение сигналов производится в условиях помех с уровнем, равным уровню сигналов. Усреднение шума происходит при разделении сигналов и в процессе синтеза апертуры. На том же рисунке показан результат выделения полезного сигнала в натурном опыте, описанном ниже.

Отметим, что длина волны составляет 0.6 м, а расстояние между приемниками 0.19 м. В этих условиях определить пеленг источников можно только путем синтеза апертуры. При этом ширина максимумов на рис. 1 соответствует физической апертуре 18 м.

НАТУРНЫЙ ОПЫТ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА ПО НЕКОГЕРЕНТНОМУ ИСТОЧНИКУ

Натурный опыт выполнен на озере, имеющем оборудование для буксировки антенны на несущей конструкции. Излучатель был установлен на дне на расстоянии 170 м от трассы, вдоль которой протягивалась приемная антенна, состоящая из 25 приемников, установленных эквидистантно через 0.19 м, в линию, ориентированную вдоль трассы движения. Частота излучения была около 2.5 кГц, с модуляцией шумом с полосой 10 Гц. Антенна была смонтирована на несущей конструкции в виде цилиндра. Несущая упругая конструкция имела собственные резонансы. Это крепление дополнительно увеличивало реверберационную помеху, связанную с условиями распространения в озере (глубина порядка 20 м). Уровень излучателя превышал уровень фона на величину порядка 30 дБ (см. рис. 2в).

Синтез осуществлялся с помощью двух приемных элементов антенны. Измерялась разность фаз между этими приемниками, таким образом выполнялась операция дифференцирования фазы вдоль трассы движения, по которой перемещалась антенна. Антенна использовалась для контрольной пеленгации излучателя физической апертурой.

Результаты опыта показаны на рисунках. На рис. 3а показана производная фазы вдоль всей трассы движения антенны. На рис. 3а представлена также разность фаз в свободном пространстве согласно (9): $\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}\sin(\alpha)$, где α – угол, под которым виден источник сигнала. Показана разность фаз между двумя приемниками антенны с номерами 8 и 9. Наблюдаются чрезвычайно сильные флуктуации, для которых на первый взгляд дальнейшая обработка сигнала представляется невозможной. Как видно из рисунка, пеленг на источник в условиях реверберационной помехи по двум приемникам определить без дополнительной обработки невозможно. Физической основой ослабления реверберационной помехи при

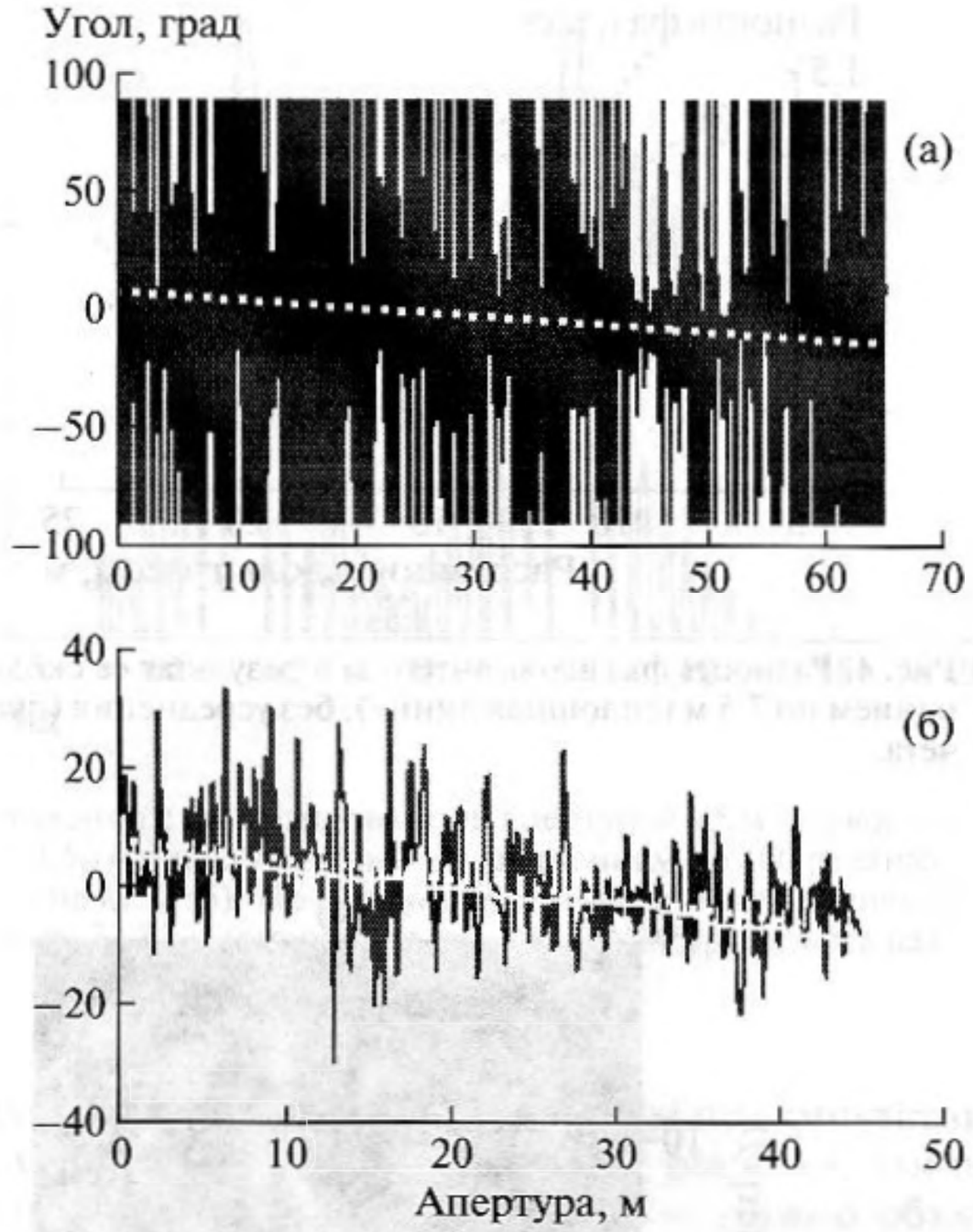

Рис. 3. Результаты натурного опыта. Разность фаз между 8 и 9 приемниками антенны, выраженная через направление на источник сигнала, в один момент времени (а) и усредненная за 100 моментов времени, в течение которых антенна смещается на 0.184 м (б). Пунктиром показан результат расчета. Сплошной белой линией показан результат скользящего усреднения по 7.5 м.

обработке служит различие радиусов пространственной корреляции у сигнала и помехи. Сигнал излучателя имеет радиус пространственной корреляции много больший, чем реверберационная помеха. Эта разница в радиусах корреляции сигнала и помехи была использована: просуммированы реализации, полученные в разные начальные моменты времени. Диапазон усреднения занимает время, за которое антенна успевает переместиться на расстояние, меньшее расстояния между приемниками. Пеленг при этом практически не изменяется, так что и сигнал не изменяется, а помеха при этом изменяется существенно. В результате получено существенное снижение уровня помехи, о чем свидетельствует рис. 3б, где показан результат сложения 100 реализаций разностей фаз (0.18 м смещение антенны). Полученные зависимости фаз сигналов от расстояния вдоль трассы или изменения пространственной частоты вдоль трассы уже могут быть использованы для синтеза апертуры на любом участке трассы. На тех же рисунках пунктиром показана разность фаз (9), которая теоретически должна наблюдаться при движении антен-

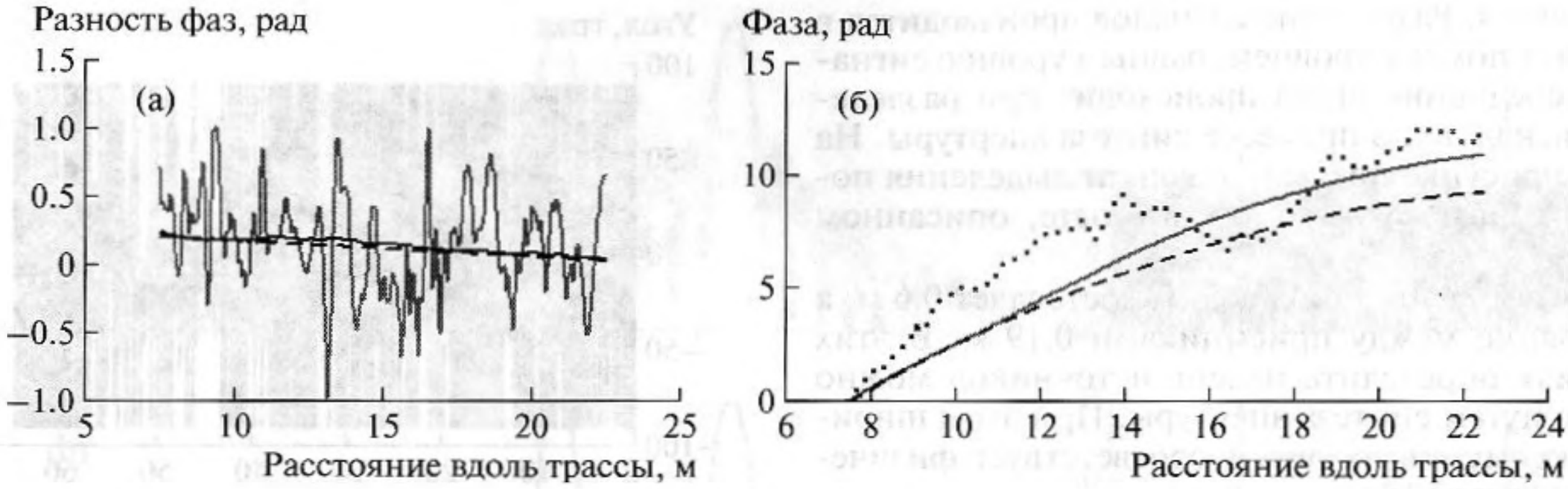

Рис. 4. Разность фаз вдоль антенны и результат ее скользящего усреднения по 7.5 м (а). Фаза вдоль трассы (б) с усреднением по 7.5 м (сплошная линия); без усреднения (пунктир). Крупным пунктиром на (а) и (б) показан результат расчета.

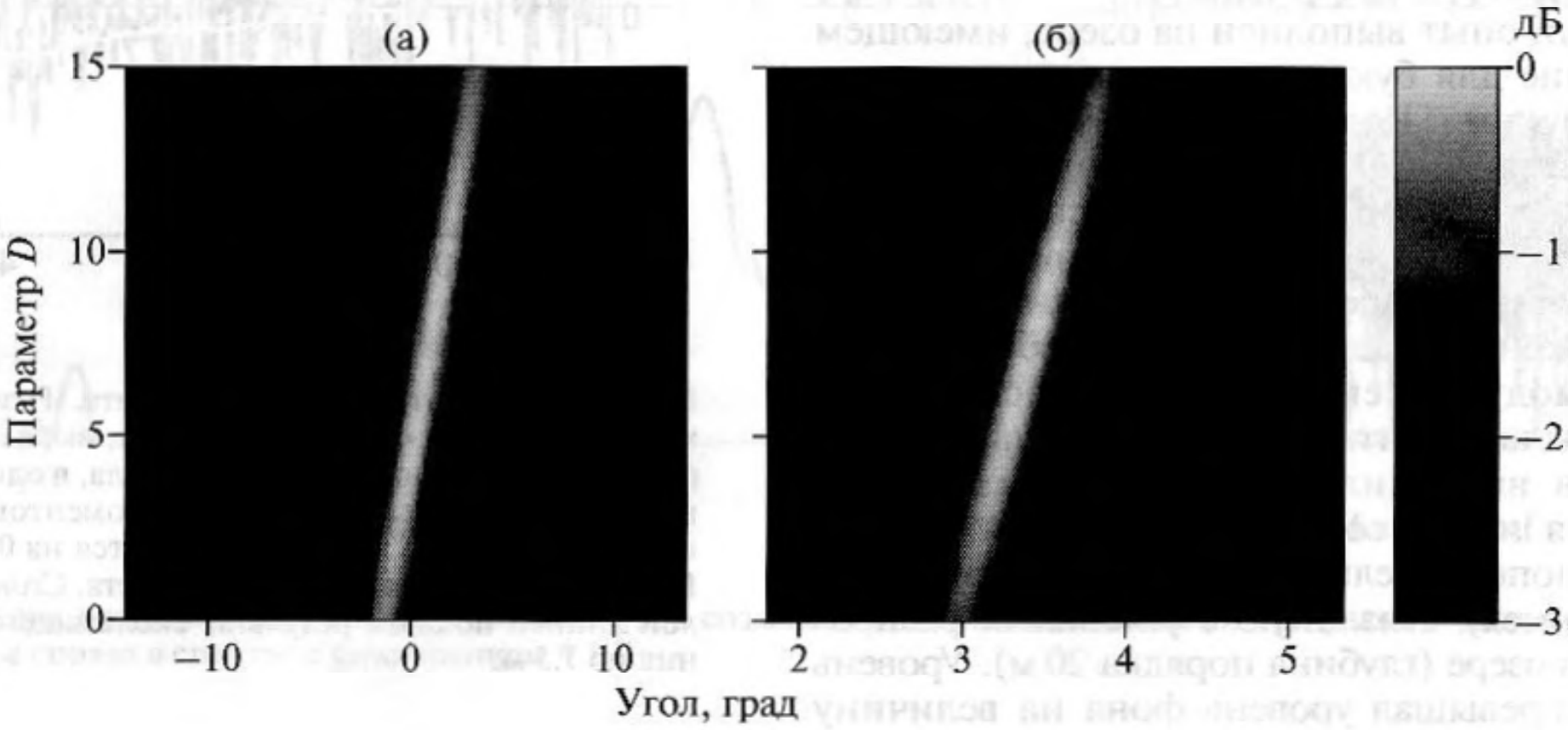

Рис. 5. Направленность синтезированной антенны с исходной апертурой 0.19 м с двумя приемниками с апертурой 15 м на своей λ (а) и с апертурой 3 м на $\lambda/32$ (б).

ны вдоль трассы в отсутствие помех. Показан и результат скользящего усреднения разности фаз за время, в течение которого антенна проходит путь длиной в 7.5 м.

Рис. 4 иллюстрирует эффективность примененной процедуры скользящего усреднения, как для самой разности фаз (пространственной частоты), так и при последующем ее интегрировании. Процедура интегрирования сама по себе тоже способствует уменьшению уровня помехи тем, что подавляет высокие частоты, относящиеся целиком к помехе. Из рис. 4 видно, что после интегрирования сигнал с помехой значительно меньше отличается как от своего среднего, так и от математической модели.

На рис. 5 показаны результаты восстановления диаграммы направленности синтезированной антенны по формуле (11). Показаны результаты как для апертуры в 15 м, так и для меньшей апертуры 3 м. Сигнал с последней восстанавливался на длине волны, уменьшенной в 32 раза. Восстановление на значительно уменьшенной λ, несмотря на наличие помехи, прошло удачно. Это иллюстрирует реальную возможность значительного уменьшения времени синтезирования апертуры без потери разрешения. На рис. 5 вдоль вертикали отложена не величина дальности R до источника в (11), а параметр D, позволяющий однозначно определять эту дальность и связанный с ней формулой $R = 8R_0/D$. Параметр D представляет квадратичный член в (11) обратно пропорциональный удалению источника. При значении $D = 0$ источник находится далеко в дальней зоне антенны. При значении $D = 8$ источник находится на расстоянии 170 м. На опыте максимум сигнала на рис. 5 получился при $D \sim 7$, что соответствует расстоянию до источника порядка 190 м. Эта ошибка связана с отклонением траектории движения от прямой линии и реверберационной помехой.

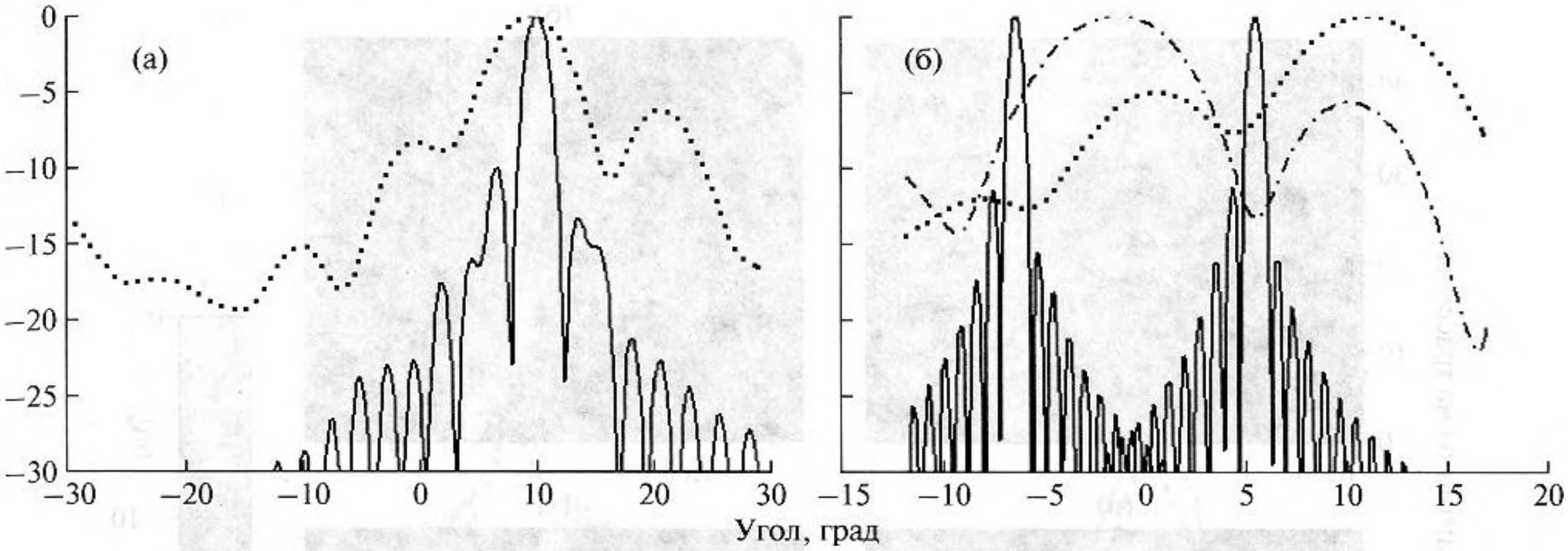

Рис. 6. Диаграммы направленности антенн в натурном опыте. Антенна с синтезированной апертурой 15 м на своей λ (а) (сплошная линия) и антенна с заполненной апертурой (АЗА) 4.56 м с некогерентным усреднением по 100 реализациям (а) (пунктир). Антенна с синтезированной апертурой 1.35м на λ/32 (б). Показаны обостренные уменьшением λ диаграммы направленности при разнесении апертур на расстояние 33.83 м (сплошные линии) и АЗА при том же разнесении (пунктир и штрих-пунктир соответственно).

На рис. 6 показаны диаграммы направленности синтезированных антенн и антенны с физической заполненной 4.56-метровой апертурой. Антенна с синтезированной апертурой 1.35 м, взятой как вблизи траверза, так и через расстояние 17.62 м, восстановлена на λ/32, что эквивалентно апертуре, увеличенной тоже в 32 раза. Как видно из рисунка, данная операция получается и в натурном опыте, осложненном сильнейшей реверберационной помехой. Диаграммы направленности синтезированных апертур вычислены по (11) при компенсации квадратичного члена в этой формуле. Показателем этой компенсации является получаемый при этом максимум модуля и глубокие провалы уровня сигнала в области первых нулей диаграммы.

В качестве контрольного опыта произведено определение текущей ДН при смещении начальной точки синтезирования. Результаты контрольного опыта показаны на рис. 7. Показана текущая ДН антенны с заполненной апертурой, состоящей из 25 приемников. Эта ДН под влиянием мощной реверберации сильно флуктуирует. Поэтому показаны ее усредненные значения по тем же 100 реализациям, по которым усреднялись значения разностей фаз, показанных на рис. 3. Изменения пеленга на источник обусловлены не рысканием платформы, на которой установлена антенна, а влиянием реверберационной помехи (горизонтальной аберрацией звука). Такой вывод сделан на основании того, что наблюдаемые изменения азимута различны для разных пар приемников, установленных на общей для всех платформе. Это иллюстрирует рис. 7. На нем показаны результаты синтеза на двух парах приемников, расположенных так близко друг от друга, что результаты синтезирования должны при отсутствии помехи совпадать. Как видно из рисунка, эти результаты не всегда совпадают, что можно объяснить влиянием помехи. В случае рыскания платформы наблюдаемые изменения азимута для всех пар приемников должны были бы непременно совпадать.

В условиях этого опыта когерентный синтез апертуры возможен только за время перемещения антенны на расстояние, много меньшее длины цуга временной когерентности сигнала излучателя. При модуляции сигнала шумом с полосой 10 Гц это время составляет около 0.1 с. При скорости движения антенны в опыте, которая была 0.3 м/с апертура когерентного синтеза будет всего 3.5 см. При длине волны почти 60 см это еще не антенна. С помощью рассмотренной здесь методики удается реально при сильной реверберационной помехе произвести апертурный синтез, получив размер апертуры в десятки метров для двух приемников, разнесенных на 0.19 м.

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПО СИГНАЛАМ СПЛОШНОГО СПЕКТРА

Осуществление такого синтеза требует предварительного выделения одного единственного источника, что аналогично раздельному анализу узкополосных источников. Для источника, излучающего сигнал сплошного спектра в широком диапазоне частот, это непростая задача и она не всегда может быть успешно решена.

Тем не менее, эта задача в гидроакустике необычайно актуальна, в частности для подавления мощных помех, мешающих проведению измерений. В настоящее время антенная техника распо-

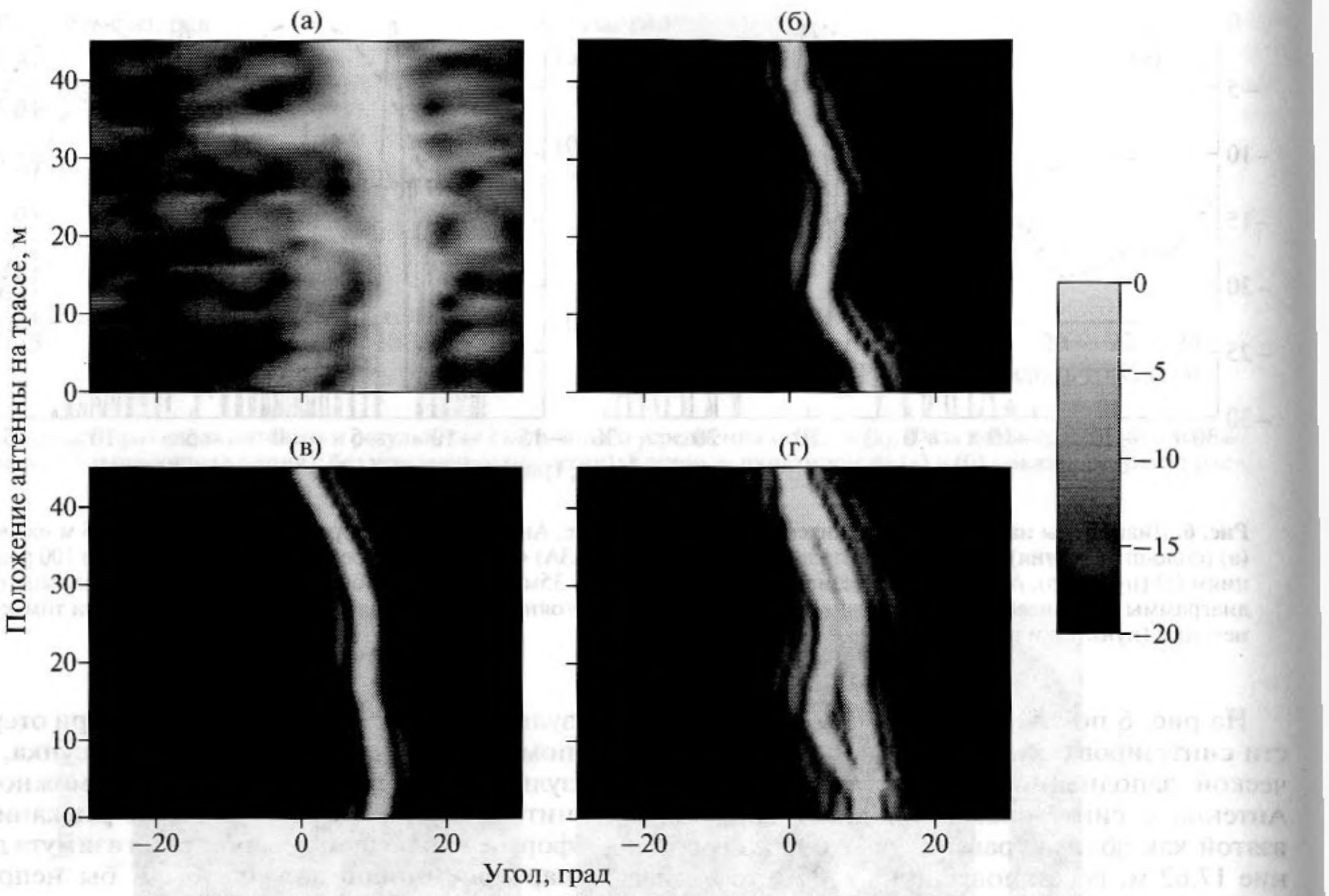

Рис. 7. Текущие диаграммы направленности при протяжке вдоль трассы обычной антенны (а) и синезированной 15-метровой антенны на своей длине волны по приемникам 5 и 6 (б); 8 и 9 (в) и некогерентная нормированная сумма сигналов синтезированных с обеих пар приемников (г).

лагает возможностями для адаптивного и достаточно глубокого подавления таких помех, но для этого используется информация о координатах источника помех и чем эта информация точнее, тем источник может быть подавлен глубже.

Для уточнения положения мешающего сильного источника вполне применим изложенный ниже принцип апертурного синтеза, позволяющий определять положение источника с большой точностью. Изложенный выше алгоритм апертурного синтеза для узкополосных сигналов использует накопление сигналов в виде (6). Для сигналов сплошного спектра аналогичное (6) соотношение имеет вид:

$$\acute{A}G(\omega, n) = |G(\omega, n)||G(\omega, n+1)|\exp(i\omega\Delta\tau_n), \quad (13)$$

где $G(\omega, n)$ – спектр Фурье сигнала, принятого приемником номер n; ω – частота; $\Delta\tau_n$ – время задержки сигналов, зависящее от направления прихода сигнала и формы антенны.

Аналогичный вид формул (6) и (13) диктует одинаковые действия с ними для получения результата. Использование задержек – известный прием, широко применяемый в антенной технике: если для узкополосных сигналов диаграмма направленности антенны определяется фазами, то для алгоритмов, работающих с сигналами сплошного спектра, направленность антенны формируется введением задержек τ_n. Алгоритм синтеза апертуры реализуется путем измерения величин $\Delta\tau_n$ при перемещении антенны. Сигнал, сформированный из аргумента (13), когерентен вдоль физический апертуры антенны и остается таковым при ее перемещении.

Остановимся на результатах исследования помехоустойчивости используемой процедуры АС, выполненного с помощью математического моделирования. Для этого использованы четыре независимые реализации шумовых сигналов. Каждая реализация была задержана по времени на величины $n\tau_1$, а τ_1 – время задержки сигнала между соседними приемными элементами, зависящие от расстояния между приемными элементами и направления прихода сигнала. Так были сформированы независимые и некоррелированные сигналы для различных положений в пространстве. Сигналы принимаются от одного общего шумового источника в разное время. По этим сигналам выполнен АС, полученные в отсутствие шума результаты показаны на рис. 8 (слева вверху). Как

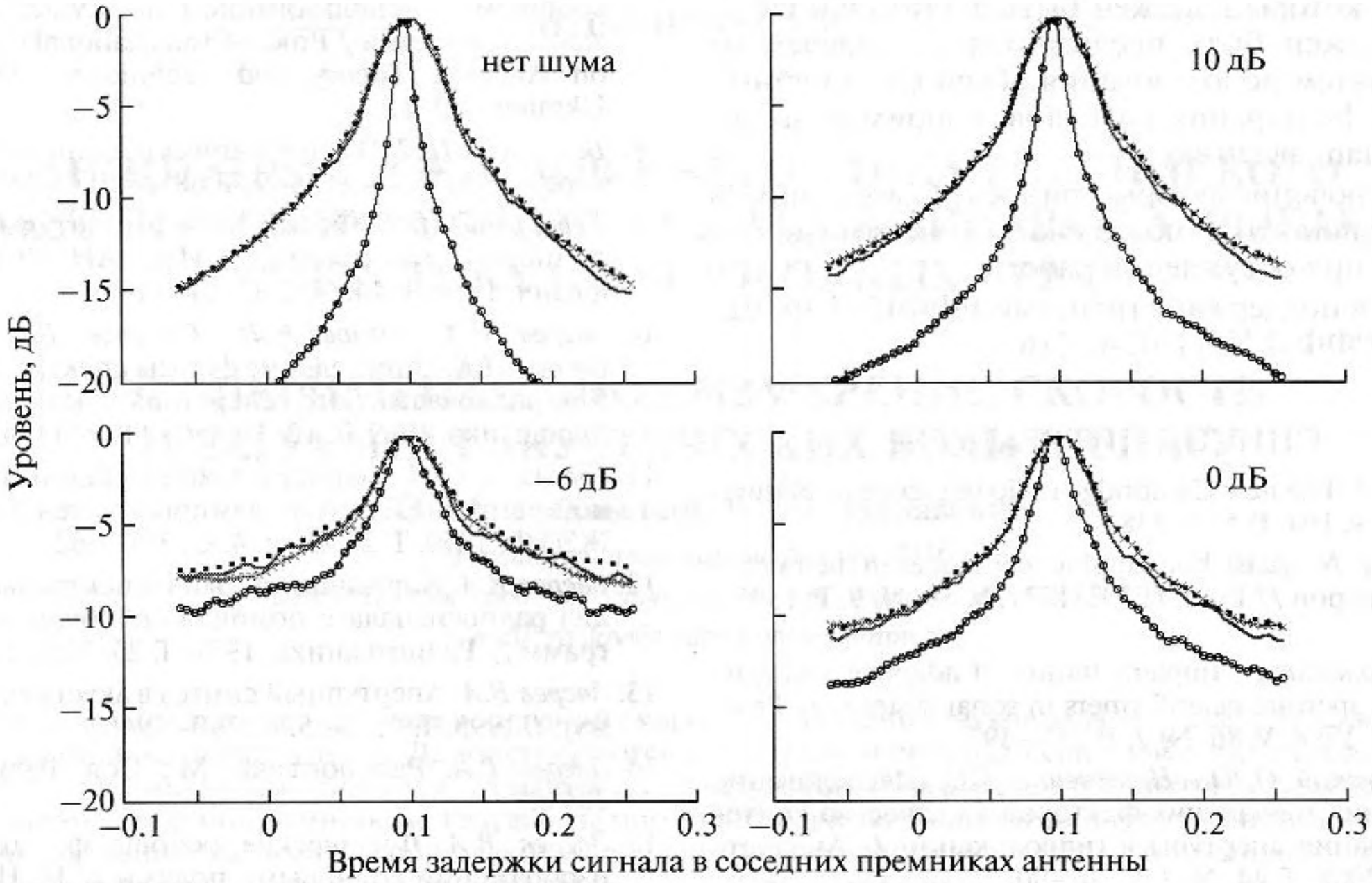

Рис. 8. ДН одной антенны (пунктир). ДН четырех антенн по линейной процедуре (сплошная линия). Синтез по пространственным частотам для одной антенны (линия с крестиками), для четырех антенн (линия с кружками). В верхнем правом углу – отношение сигнала к шуму.

видно из рисунка, три ДН совпадают между собой так хорошо, что не имеет особого смысла пояснять, как обозначена на графике та или иная зависимость (они пояснены в подписи к рисунку). Выделяется только один график, в котором выполнен синтез по пространственным частотам. Этот график в полном соответствии с увеличенной в 4 раза апертурой антенны получился острее по углу и с меньшим уровнем боковых лепестков.

Целью этого математического моделирования являлось определение численным путем помехоустойчивости процедуры АС. Применение нелинейных операций сильно затрудняет определение помехоустойчивости аналитически, и мы сочли возможным ограничиться для этой цели результатами численного моделирования изотропного шума. Для этого в сформированные сигналы антенн добавлялись шумы, независимые для каждого приемника антенны. Результаты показаны на том же рис. 8. Уровень добавленного шума относительно уровня сигнала показан на графиках рис. 8. Как видно из рис. 8, операция синтеза апертуры для своего совершения при заданных значениях параметров требует отношения сигнала к шуму не менее 0 дБ, а при 10 дБ превышения совершается почти также, как и без шумов. Под влиянием шума синтезируемая ДН антенны уширяется больше, чем исходная, а шум становится виден на хвостах ДН. Так происходит потому, что шум оказывает влияние на когерентность сигналов синтезируемых антенн. Сигналы синтезируемых антенн когерентны только при использовании для дальнейшей обработки разностей аргументов комплексных сигналов, принятых элементами антенн. Шум оказывает влияние на эти сигналы, делая их менее когерентными. Это получается потому, что к сигналу каждого приемного элемента антенны добавляется свой шум, независимый от шума соседнего элемента, нарушающий когерентность разностей аргументов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная процедура синтеза апертуры по априори неизвестному источнику сигнала с широким спектром продемонстрировала ожидаемую эффективность относительно сужения диаграммы направленности как на математической модели, так и в реальном эксперименте. Процедура, несмотря на то, что она использует нелинейные преобразования сигналов, оказалась весьма помехоустойчивой. Как показывают численные расчеты и натурный опыт, для успешного использования этой процедуры достаточно иметь превышение сигнала над шумом порядка 10 дБ, что во многих случаях является реальным. Другое ограничение метода – наличие одного единственного сигнала – более жесткое.

Сигнал, который должен быть достаточно сильным, должен быть предварительно отделен от других путем использования обычных линейных методов фильтрации сигналов, например по частоте и направлению.

В заключение авторы приносят благодарность А.А. Родионову за полезную и конструктивную критику при обсуждении работы.

Работа поддержана грантами РФФИ № 08-02-00818 и РФФИ № 11-02-01216.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ryle M.* The new Cambridge radio telescope // Nature. 1962. V. 194. P. 517–518.
2. *Leith E.N.* Quasi-holographic techniques in the microwave region // Proc. IEEE. 1971. V. 59. № 9. P. 1305–1318.
3. *Stergiopoulus S.* Implenentation of adaptive and synthetic aperture beamformers in sonar systems // Proc. IEEE. 1998. V. 86. № 2. P. 358–397.
4. *Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С.* Исследование влияния мешающих факторов на качество синтезирования апертуры в гидролокации // Автометрия. 2008. Т. 44. № 2. С. 76–90.
5. *Зуйкова Н.В., Свет В.Д., Шацков Ю.А.* Об измерении траектории источника звука, движущегося в неоднородной среде. // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 655–664.
6. *Зверев В.А., Иваненков А.С., Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И.* Особенности апертурного синтеза для гидроакустических антенных решеток / Сб. трудов "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" (ГА-2010), Санкт-Петербург: Наука, 2010. С. 408–410.
7. *Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И.* Оценка положения источника со сложным спектральным составом с использованием движущейся разреженной решетки / Proc. of International Conference on Antenna Theory and Techniques. 2009. Lviv, Ukraine. P. 211.
8. *Берштейн И.Л.* О флуктуациях в ламповом генераторе // ДАН СССР. 1949. Т. 68. № 3. С. 469–472.
9. *Берштейн И.Л.* Флуктуации амплитуды и фазы лампового генератора // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1950. Т. 14. № 2. С. 145–173.
10. *Зверев В.А., Орлов Е.Ф., Семенов В.В., Спиридонова И.К.* Определение формы спектральной линии радиочастотного генератора // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 8. С. 1169–1174.
11. *Горелик Г.С.* К вопросу о технической и естественной ширине линии лампового генератора // ЖЭТФ. 1950. Т. 20. Вып. 4. С. 351–362.
12. *Зверев В.А.* Корреляционный и спектральный анализ радиосигнала с помощью обобщенных голограмм // Радиотехника. 1971. Т. 26. № 6. С. 2–6.
13. *Зверев В.А.* Апертурный синтез в акустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 5. С. 790–794.
14. *Зверев В.А.* Радиооптика. М.: Сов. Радио, 1975. 304 с.
15. *Зверев В.А.* Физические основы формирования изображений волновыми полями // Н. Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
16. *Gershman A.B., Turchin V.I., Zverev V.A.* Experimental results of localization of moving underwater signal by adaptive beamforming // IEEE Trans. on Signal Processing, 1995. V. 43. № 10. P. 2249–2257.
17. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Выделение сигналов из помех численными методами / Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.
18. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Стромков А.А.* Измерение параметров моды реального волновода // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 230–244.