

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.2

РАЗРЕШЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ  
НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ

© 2016 г. В. А. Зверев

Институт прикладной физики РАН, 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46

E-mail: zverev.24@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2014 г.

Предложен метод, позволяющий разрешить два близких по угловой координате источника некогерентных сигналов одной частоты и существенно различной интенсивности. Метод основан на синтезе апертуры приемной антенны сначала по сигналу более мощного источника и оценке его угловой координаты с последующим вычитанием его спектра из углового спектра принимаемого поля, что позволяет реализовать синтез апертуры и оценить угол прихода менее мощного сигнала. Тем самым метод представляет интерес не только для синтезируемых апертур, но и для антенн с заполненной апертурой, устраняя ограничения, связанные с наличием боковых лепестков отклика антенны. Приведены результаты математического моделирования, показывающие эффективность предложенного метода – возможность обнаружения и пеленгации слабых сигналов на фоне сильных источников помехи даже при условии их близкого взаимного углового положения.

*Ключевые слова:* некогерентный сигнал, синтез апертуры, помехоустойчивость, метод темного поля.

DOI: 10.7868/S0320791916030163

ВВЕДЕНИЕ

Синтез апертуры по источникам некогерентных сигналов [1–15] дает возможность увеличить пространственное разрешение антенны за счет ее движения. Методы [2–9] позволяют синтезировать апертуру только для сильных сигналов, намного превышающих уровень шума. В последнее время появились помехоустойчивые методы [1, 10–15], обладающие оптимальной помехоустойчивостью как при обнаружении слабых источников излучения, так и при оценке их положения.

Практически синтез апертуры требуется для решения двух задач: уточнения оценки положения источника излучения и разделения двух близких источников, не разрешимых перемещаемой (относительно короткой) антенной без использования процедуры синтеза апертуры. Однако все известные методы синтеза апертуры по источникам некогерентного излучения, включая вышеперечисленные, способны решить только первую часть задачи – уточнение положения одного-единственного источника излучения. Значительное увеличение пространственного разрешения, достигаемое синтезом апертуры, не дает возможности ни одному из известных методов синтеза разрешить два близких по углу некогерентных источника излучения.

Вместе с тем, когерентные варианты синтеза апертуры [1–9] способны разрешать близкие по углу источники, не разрешимые перемещаемой антенной, только в том случае, если эти источни-

ки когерентны с основным источником. Синтез апертуры способен с высокой точностью оценивать положение всего одного-единственного некогерентного источника в секторе углов, определяемых угловой шириной главного лепестка диаграммы направленности перемещаемой антенны.

Невозможность с помощью когерентного синтеза апертуры по некогерентным источникам излучения разрешать близко расположенные источники обусловлена принципиальной невозможностью обеспечить когерентность одновременно двум взаимно некогерентным сигналам. Каждый метод когерентного синтеза придает когерентность, обеспечивающую синтез апертуры и повышение разрешающей способности, только одному, наиболее интенсивному сигналу. Присутствие второго сигнала, некогерентного с первым и при этом более слабого, приводит к появлению добавочного шума, смещающего оценку положения источника. Некогерентный синтез апертуры тоже может лишь уточнять положение источника, пользуясь высокой помехоустойчивостью. Разрешить два источника этот метод тоже не может, так как не позволяет изменить величину углового разрешения перемещаемой антенны, что необходимо для разрешения двух источников.

Для разрешения двух и более близко расположенных по углу источников некогерентных сигналов с помощью апертурного синтеза существует, вероятно, единственная возможность, состоящая в том, чтобы после выполнения синтеза по

наиболее сильному источнику удалить или значительно ослабить его сигнал на антенне, оставив при этом нетронутым сигнал более слабого источника. После удаления сигнала первого источника может быть выполнен синтез по второму (относительно слабому) источнику с последующей оценкой его углового положения и, следовательно, реализовано высокое угловое разрешение этих двух источников.

Настоящая статья посвящена исследованию возможностей метода когерентного синтеза апертуры разрешать близкие по углу некогерентные сигналы путем поочередного удаления сигналов тех источников, которые уже были использованы для синтеза апертуры. На каждом шаге такой процедуры протяженная апертура синтезируется по одному (наиболее мощному) сигналу, выбираемому автоматически. При этом может быть применен любой метод синтеза, в том числе и некогерентный. Таким образом, речь идет о таком развитии метода синтеза апертуры, которое позволяет совместить его с операцией исключения сильного сигнала. Нами исследована и показана возможность такой доработки метода синтеза и его применения на примере помехоустойчивого когерентного синтеза апертуры [1].

Такой метод поочередного оценивания угловых координат источников при удалении на каждом шаге наиболее сильного сигнала имеет смысл не только при апертурном синтезе, но и при локации близко расположенных источников протяженной антенной с заполненной апертурой. Дело в том, что боковое поле мощного сигнала представляет собой препятствие для обнаружения и локации сигнала источника, обладающего слабым излучением и расположенного близко к мощному источнику. Для освобождения от этой помехи специально придуманы и широко используются специальные методы подавления боковых лепестков диаграммы направленности антенны, что достигается даже ценой значительного снижения разрешения антенны, обусловленного размером ее апертуры. На эту тему опубликовано множество статей. Применение предлагаемого последовательного определения оценок положения источников снимает проблему подавления бокового поля антенны при обнаружении слабых источников сигналов, близко расположенных к сильным.

Однако за всякое улучшение чего-либо часто приходится чем-то жертвовать. В данном случае "жертвы" заключаются в том, что при определении положения второго (слабого) источника, во-первых, апертура перемещаемой антенны искусственно сокращается на два приемника и, во-вторых, возникает дополнительная анизотропия аддитивного шума. В ситуации нескольких источников это приводит постепенно к значительному понижению помехоустойчивости приема и точ-

ности оценки их углового положения, что делает предложенную процедуру применимой только для достаточно сильных, сравнительно с уровнем шума, сигналов.

Исключать сигнал из поля, принимаемого антенной, возможно многими методами. Наиболее эффективным является адаптивный метод, основанный на обращении корреляционной матрицы принимаемых сигналов с последующим формированием нулей отклика антенны в соответствующих направлениях. Однако этот метод пока еще не приспособлен для синтеза апертуры. В настоящей статье исследованы два метода исключения сигналов, которые могут быть применены к помехоустойчивому методу синтеза апертуры [1]. Поскольку этот синтез осуществляется на каждом шаге по одному, наиболее сильному сигналу, то присутствие более слабых сигналов в пределах области разрешения перемещаемой антенны приводит к смещению оценки его углового положения. Это смещение, зависящее от многих параметров задачи, в ряде случаев оказывается пренебрежимо малым. Предлагаемый способ определения положения других источников некогерентного излучения применим именно в этих случаях, которые можно заранее определить с помощью математического моделирования, как это показано ниже.

Наиболее простым и вместе с тем эффективным способом исключения сигнала в процессе повторного синтеза апертуры является вычитание сильного сигнала из суммарного сигнала на входе антенны [17]. Эта операция применима к повторной процедуре апертурного синтеза при условии достаточно малой погрешности оценки положения сильного источника в присутствии более слабого. В этом случае амплитудно-фазовое распределение исключаемого сигнала на антенне становится известным в результате первоначального (на предыдущем шаге) синтеза апертуры по методу [1]. Однако в данном случае, когда источники имеют близкие угловые координаты, операция вычитания сигнала известной формы к успеху в синтезе не приводит. Дело не только в том, что амплитуда и фаза сигнала оцениваются с ошибками, но и в том, что пространственный спектр "оставшегося" сигнала деформируется столь сильно, что не дает возможности правильно определить его угловое положение, при этом оценка угла прихода становится практически не зависящей от его фактического значения. Поэтому такой метод вычитания не применим к решению поставленной задачи.

Остается второй, опробованный нами метод вычитания сигнала, описанный в [16] и более подробно в [17], который использован при проведении численного исследования эффективности предложенного метода высокого углового разрешения источников различной мощности с помощью последовательного синтеза апертуры. Ре-

зультаты моделирования приведены как для идеализированного случая разрешения источников в отсутствие аддитивных шумов, так и для случая предельно допустимого шума. Рассмотрен случай, когда разделяемые синтезом сигналы являются сигналами одной частоты, которые нельзя разделить методами, использованными нами в работе [2].

Подчеркнем, что данная статья ограничена описанием предложенного метода и численной демонстрацией возможности его использования для разрешения близко расположенных некогерентных источников. Очевидно, что исследование эффективности метода в применении к конкретным условиям приема сигналов позволит более точно оценить его практические возможности в тех или иных ситуациях.

### МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ СИЛЬНОГО СИГНАЛА

Метод исключения сильного сигнала, использованный в данной работе, принципиально отличается от метода вычитания сигнала. В этом методе собственно вычитания сигнала нет, а сигнал на антенне, сформированный точечным источником сигнала, просто полностью удаляется в пространственном спектре сигналов на перемещаемой антенне. Для устранения сильного сигнала ни фазы, ни амплитуды устраняемого сигнала знать не надо, а необходимо и достаточно знать координаты точки, в которой находится источник этого сигнала. Координаты расположения источника сильного сигнала, подлежащего устранению в процессе синтеза апертуры по более слабому сигналу, определяются с помощью помехоустойчивой операции синтеза [1]. После того как эта точка определена, пространственный спектр антенны для сигналов, излучаемых из этой точки, в каждой точке траектории перемещения антенны может быть преобразован в синус, период которого кратен интервалу спектрального разложения. В результате этого преобразования в спектре, полученном стандартным обратным быстрым преобразованием Фурье (БПФ), отличны от нуля всего две точки, которые к тому же располагаются в известных местах на апертуре перемещаемой антенны. Расположение этих точек не зависит от параметров устраняемого сигнала и полностью определяется координатами точки нахождения устраняемого сигнала [16, 17]. Сигнал из этих точек можно устранить, заменив сигналы в этих точках нулями. При этом исключаются две точки из апертуры перемещаемой антенны. После того как сигналы в этих точках заменены нулями, снова производится фурье-преобразование, которое восстанавливает пространственные спектры всех сигналов, принятых антенной, за исключением сигнала в этих двух точках. И, что особенно важно, — вышеописанная процедура не изменяет форму спектра оставшегося слабого сиг-

нала, позволяя выполнить апертурный синтез по этому сигналу с достаточно малым смещением оценки положения этого источника. Однако вышеописанная процедура придает значительную анизотропию спектру аддитивного шума.

Метод, описанный в [16, 17], оказался необычайно подходящим именно для когерентного синтеза апертуры по некогерентным источникам сигналов. После устранения сильного сигнала производится синтез по оставшемуся наиболее сильному сигналу. Уровень этого сигнала значительно уменьшен фильтром, который превратил пространственный спектр устраняемого сигнала в синус, но форма спектра и его положение остались при этом прежними. Поэтому синтез позволяет определить положение этого сигнала без помех со стороны устраненного сигнала. Уменьшение уровня второго слабого сигнала, вызванное фильтром, проще всего учесть путем выполнения повторного синтеза по тем же данным, но в этот раз с устранением слабого сигнала, положение которого определено в результате уже выполненной операции синтеза по этому сигналу. При этом мы получаем оценки как положения, так и амплитуды сигнала, устраняемого при синтезе апертуры по слабому сигналу. Если полученная при этом оценка положения этого источника сигнала с приемлемой точностью совпадает с оценкой положения этого же источника, полученной с помощью первоначального синтеза апертуры, то это означает, что использованная процедура действительно применима при данных условиях и полученные оценки положения двух источников соответствуют истинным с приемлемой точностью. При этом получается, что и отношение уровней сильного сигнала, полученного при устранении сильного, и слабого сигнала при устранении сильного, является тем же самым, какое было в исходных сигналах, так как оба сигнала в результате этих процедур прошли через один и тот же фильтр.

Спектр нужного нам сигнала сохраняется полностью и никакой коррекции не требует, а шум при этом искажается. Это искажение имеет известную форму, и его можно убрать. Однако это нельзя сделать, существенно не изменив при этом нужный нам второй сигнал. Получившаяся анизотропия шума в состоянии значительно уменьшить помехоустойчивость метода по второму сигналу.

Вышеописанная процедура устранения сильного сигнала в процессе синтеза апертуры описана в [16] и более подробно в [17]. Первое, что необходимо и достаточно для применения этой процедуры, — это определить координаты источника, сигнал которого надо убрать из сигнала антенны. Это надо сделать с помощью выполнения процедуры синтеза апертуры так, как это описано в [1], и определить обе координаты сильного сигнала — угол и дальность. Эти координаты будут

использованы для исключения этого сигнала из сигнала антенны.

Все сильные сигналы после определения оценок положения их источников путем синтеза должны удаляться последовательно один за другим. При этом нельзя убрать сигналы, которые различаются только своей дальностью, но имеют одинаковый угол относительно центра трассы синтеза. Для освобождения от таких сигналов есть только один путь – произвести тот же синтез еще раз в другом месте, смещенном вдоль трассы на значительное расстояние, чтобы сигналы не оказались на одной дальности относительно центра трассы. Можно для этой цели использовать те же сигналы, но произвести синтез с меньшей апертурой при смещении центра трассы.

### ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА С УДАЛЕНИЕМ СИГНАЛА

Процедура синтеза апертуры, приведенная в [1], не согласована с описанным выше методом удаления сигнала, по которому уже выполнен синтез апертуры. Поэтому сначала приведем измененную сравнительно с [1] методику получения помехоустойчивого синтеза апертуры по некогерентному источнику сигналов, согласованную с приведенной выше возможностью удаления сигнала, по которому синтез уже состоялся.

Особенностью метода устранения сигнала является то, что он требует предварительного формального увеличения апертуры перемещаемой антенны. Требование связано с тем, что этот метод требует значительно больше точек, в которых спектр вычисляется с помощью БПФ, сравнительно с числом действующих приемников антенны. Для этого апертура перемещаемой антенны дополняется многими приемниками с нулевыми сигналами. Это можно сделать для любых антенн. Такая процедура ничуть не повышает разрешение антенны по углу и дальности, оставляя их на прежнем уровне, и поэтому обычно не делается. Действующая апертура антенны при этом фактически не увеличивается, а увеличивается число точек углового спектра антенны.

Опишем модернизированный метод синтеза апертуры, приведя формулы, справедливые для любых дистанций, а не только в дальней зоне синтезируемой антенны, как это сделано в [1]. Кроме того, приведем обработку сигналов с учетом дополнения перемещаемой антенны приемниками с нулевыми сигналами.

Комплексную амплитуду сигнала точечного источника на антенне запишем в виде

$$S(n, m, r, \alpha) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} R(n, m, r, \alpha)\right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $R(n, m, r, \alpha)$  – расстояние от каждого приемника антенны номера  $m$  до точки

расположения источника сигналов, находящегося (в полярной системе координат с центром в середине трассы) на расстоянии  $r$  и под углом  $\alpha$  в точке номера  $n$  трассы перемещения антенны:

$$R(n, m, r, \alpha) = \sqrt{r^2 \cos^2(\alpha) + (r \sin(\alpha) - (n - 0.5N)\Delta s - m\Delta d)^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – общее число точек на трассе;  $\Delta s$  – расстояние между точками трассы, номера которых различаются на единицу;  $\Delta d$  – расстояние между приемниками антенны, номера которых различаются на единицу.

В (1), следуя [17], число приемников антенны увеличено до 512. При этом реальные приемники антенны (8 приемников) помещены в начале, а все последующие с нулевыми сигналами помещены после них с теми же интервалами между приемниками. В [17, с. 70] приведена полная программа таких вычислений.

Далее вычисляется угловой спектр сигнала на антенне с помощью стандартного БПФ. Для синтеза требуется вычислить БПФ в большом числе точек, которое должно быть много больше числа реальных приемников в антенне (стандартное БПФ вычисляет спектр в числе точек, равном числу приемников антенны). Чтобы вычислить БПФ в большом числе точек, следует увеличить число приемников антенны, что можно сделать, дополнив сигналы в дополнительных приемниках равными нулю. Итак, пусть антенна обладает  $M$  реальными приемниками, на которых есть сигналы, а точек в спектре вычисляемого БПФ  $K \gg M$ .

Функцию (1) с увеличенной апертурой запишем в виде  $S(n, k, r, \alpha)$ . Операцию, осуществляемую БПФ, запишем в виде функционала. Возможность применения метода темного поля требует, чтобы операция вычисления спектра начиналась не с прямого, а с обратного БПФ:

$$G(n, k, r, \alpha) = \Phi^{-1}[S(n, k, r, \alpha) \exp(i\pi m)], \quad (3)$$

где  $k$  – номер точки спектра. Почему это так, будет ясно из дальнейшего.

Экспоненциальный множитель служит для смещения максимума спектра в его центральную область. Без этого множителя непрерывный спектр преобразованием БПФ разрывается на две части, одна из которых находится в самом начале спектра, а другая – в самом его конце.

Затем на антенне выполняется некогерентное усреднение полученного углового спектра сигнала, обеспечивающее помехоустойчивость метода, по формуле:

$$U(l, k, r, \alpha) = \sum_j |G(j + J_l, k, r, \alpha)|, \quad (4)$$

где  $J$  – число реализаций, по которым производится накопление. При этой операции число точек трассы сокращается в  $J$  раз и вводится новый

номер точки на трассе, который обозначен буквой  $t$ .

Для синтеза требуется фаза, которая определяется после операции некогерентного усреднения, как это описано в [1]. Для получения фазы для каждого  $t$  определяется номер  $k = kj$ , в котором спектр достигает максимума. Для того чтобы точнее определить положение максимума, и понадобилось значительное увеличение точек в спектре функции (1). Математически определение номера  $kj$  запишем в виде следующего функционала:

$$kj(t, r, \alpha) = \Psi[U(k, t, r, \alpha)]. \quad (5)$$

Этот функционал определяет номер точки углового спектра, в которой наблюдается наибольшая величина модуля спектра, формируемого антенной в каждой точке трассы  $t$  для источника, находящегося на дистанции  $r$  под углом  $\alpha$ . Этот номер точки однозначно связан со средней разностью фаз между приемниками антенны [1]. Искомая разность фаз находится по формуле, связывающей положение максимума углового спектра антенны с разностью фаз между приемниками антенны, в виде

$$\Delta\varphi(kj(t, r, \alpha)) = \frac{2}{K}(kj(t, r, \alpha) - 0.5K)2\pi\frac{\Delta d}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\Delta d$  – расстояние между приемниками антенны. В (6) первый множитель представляет собой синус угла, под которым приходит сигнал к антенне.

Разность фаз, определяемая (6), как показано в [1], является пространственной частотой сигнала антенны с синтезированной апертурой. Фаза сигнала антенны с синтезированной апертурой найдется путем интегрирования (6) вдоль антенны [1]:

$$SF(t, r, \alpha) = \sum_0^t \Delta\varphi(kj(t, r, \alpha)) \frac{\Delta q}{\Delta d}. \quad (7)$$

Для оценки положения источника, справедливой для любых дистанций, а не только для достаточно больших расстояний  $r$ , как это сделано в [1], следует определить функцию  $SF(t, R, \Theta)$  с помощью этой же процедуры, но не по сигналу, полученному с антенны, а по сигналу источника, располагающегося в произвольной точке области поиска оценки его положения с координатами  $R$  и  $\Theta$ . Эти координаты включают все точки внутри области поиска.

Эта процедура, выполняемая для известных точек и в отсутствие шума, может быть существенно упрощена. Для этого не требуется некогерентное накопление и не надо вытаскивать фазу из модуля сигнала антенны. Не надо даже задействовать саму антенну, так как разность фаз между ее приемниками целиком определяется значением разности хода между ними, которая вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi(t, R, \Theta) = \frac{2\pi}{\lambda}(R(Jt - 0.5N, 1, R, \Theta) - R(Jt - 0.5N, 0, R, \Theta)), \quad (8)$$

где  $N$  – полное число точек на апертуре. Интегрирование (8) по формуле (7) позволяет получить функцию  $SF(t, R, \Theta)$ .

Оценка положения источника внутри области поиска совершается по формуле

$$SJ(R, \Theta) = \left| \sum_t \exp(iSF(t, r, \alpha)) \exp(-iSF(t, R, \Theta)) \right|. \quad (9)$$

Такой алгоритм справедлив для любых дистанций помехоустойчивого синтеза апертуры по некогерентному источнику сигнала [1].

**Процедура устранения сильного сигнала.** Эта процедура включает выполнение синтеза апертуры по сильному сигналу так, как это описано выше. При этом определяются оценки положения источника: дальность  $\rho$  и угол  $\theta$ . Эти значения подставляются в (8), где вместо произведения  $Jt$  нужно поставить  $n$  – номер точки на апертуре. При этом получается фаза  $\Delta\varphi(n, \rho, \theta)$  вдоль всей трассы перемещения антенны. Эта фаза подставляется в (6), из которой определяется номер точки углового спектра  $kn$  для каждого  $n$ , соответствующего максимуму отклика антенны на чистый первый сигнал, по которому уже выполнен синтез апертуры. Этот параметр  $kn$  необходим и достаточен для устранения первого сигнала с антенны.

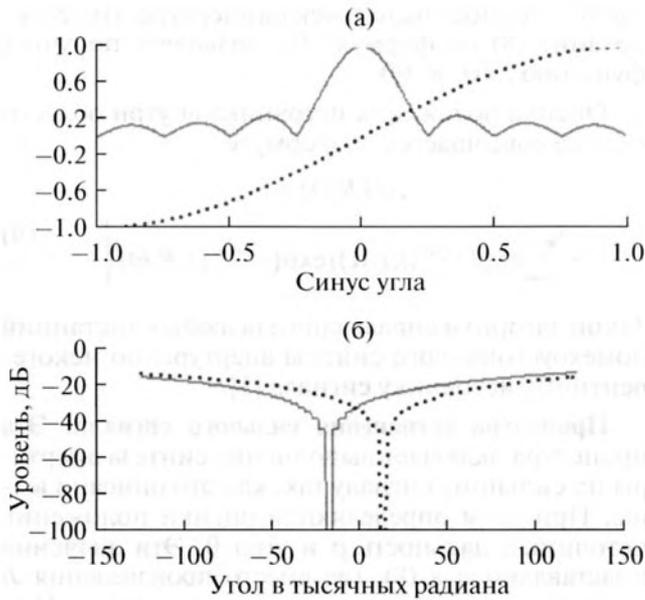
Далее формируется фильтр по формуле

$$FL(n, k) = \exp\left(i2\pi(M-1)\frac{k - kn(n)}{2K}\right) \times \sin\left(\pi\frac{k - kn(n)}{K}\right). \quad (10)$$

Этот фильтр приводит спектр устраняемого сигнала к виду синусоидального сигнала с точно целым числом периодов на интервале всего спектра.

Здесь есть одна математическая особенность. Для того чтобы приведенная процедура правильно работала, надо первое БПФ (3) по увеличенному числу приемников антенны выполнять в виде обратного БПФ. Полученный спектр обратного БПФ надо пропустить через фильтр (10). В результате этой фильтрации спектр первого сигнала на антенне примет вид синусоиды.

Для дискретных сигналов интеграл Фурье сводится к ряду Фурье. К такому ряду сводится преобразование Фурье стандартным БПФ. В этом случае отрезок синусоиды с целым числом периодов математически эквивалентен синусоиде бесконечной длины, так как ряд Фурье представляет сигналы в виде периодически повторяющихся функций. Периодическое повторение отрезка синусоиды, полученного в результате фильтрации фильтром (10) спектра с положением максимума в точке  $kn(n)$ , приводит к синусоиде бесконечной длины. Такой сигнал имеет спектр в виде всего



**Рис. 1.** (а) Спектр первого сигнала в точке начала движения антенны (сплошная линия) и частотная характеристика фильтра (10) (пунктир). (б) Частотная характеристика фильтра (10) для первого (сплошная линия) и второго (пунктир) сигналов.

двух точек, положение которых полностью определяется числом приемников антенны  $M$ .

Далее осуществляется прямое БПФ спектра, прошедшего фильтр (10). Полученный спектр от спектра имеет форму сигнала перемещаемой антенны с добавленными к ней приемниками с нулевыми сигналами. В полученном спектре исключаются две точки, в которых расположены приемники антенны не с нулевыми, а с реальными сигналами. Одна из точек соответствует  $k = 0.5M$ , а вторая —  $k = K - 0.5M$ . Для исключения сигнала, по которому уже выполнен синтез апертуры, следует положить равными нулю сигналы в этих точках. При этом обнуляются сигналы в двух реально существующих приемниках перемещаемой антенны. Это приводит к уменьшению реальной апертуры перемещаемой антенны при последующем синтезе апертуры по оставшемуся второму сигналу.

Уменьшение апертуры перемещаемой антенны на синтезе не сказывается, оно влияет только на помехоустойчивость процедуры, уменьшая выигрыш антенны по отношению сигнала к шуму.

После этого совершается обратное БПФ, восстанавливающее спектр сигнала на антенне, но уже при отсутствии сильного сигнала, синтез по которому состоялся.

Далее производится синтез по оставшемуся наиболее сильному сигналу, форма спектра которого сохранилась в результате действия фильтра (10) и двух взаимно исключающих БПФ. Амплитуда спектра при этом изменилась, получив мно-

житель, определяемый модулем (10) при значении  $k$ , равном номеру точки углового спектра, в которой получился максимум второго сигнала в результате синтеза апертуры. Учет этого множителя, который становится известен в результате синтеза апертуры по второму сигналу, позволяет получить оценку разности уровней первого и второго сигналов.

Однако практически получить правильное соотношение уровней первого и второго сигналов можно гораздо проще и точнее без каких-либо расчетов. Для этого достаточно повторить уже сделанный синтез апертуры с исключением не первого, а второго слабого сигнала. Получившийся в результате такого синтеза первый сигнал ослаблен тем же фильтром, и настолько же, насколько был ослаблен второй сигнал в результате синтеза после удаления первого. Это позволяет получить правильное соотношение уровней первого и второго сигнала без расчетов величины ослабления.

## РЕЗУЛЬТАТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для математического моделирования были выбраны следующие условия. Оба источника сигналов находятся на одной дальности 1000 м. Уровень сигнала второго источника, расположенного рядом с первым, меньше уровня сигнала первого источника на 20 дБ. Источники сигналов расположены по разные стороны от центра трассы на расстояниях  $-15.625$  и  $+15.625$  м от нормали к центру трассы или под углами  $-15.625$  и  $+15.625$  тысячных радиана. Сигналы источников случайно изменялись по фазе и амплитуде в каждой точке трассы. Общее число точек трассы 2048. Трасса разбита на 32 участка, в каждом из которых производится некогерентное накопление по 64 точкам или по 64 реализациям сигналов. Апертура синтезировалась длиной 50 м при длине волны 0.7 м. Перемещаемая антенна включает 8 приемников, расположенных через интервалы, равные половине длины волны. Число приемников антенны увеличено в 64 раза (до 512) путем добавления приемников с нулевыми сигналами. К сигналам на антенне добавлялся шум, уровень которого на антенне по отношению к уровню сигнала на антенне (без шума) был  $-34$  дБ.

На рис. 1 показан модуль пространственного спектра сигнала (1) и амплитуда частотной характеристики фильтра (10) в начальной точке трассы перемещения антенны. На том же рисунке показан вид модуля частотной характеристики фильтра (10) для первого и второго сигналов. Уровень каждого модуля в точках минимума другого модуля представляет собой то ослабление второго сигнала, которое следует учитывать при оценке разности уровней первого и второго сигналов.

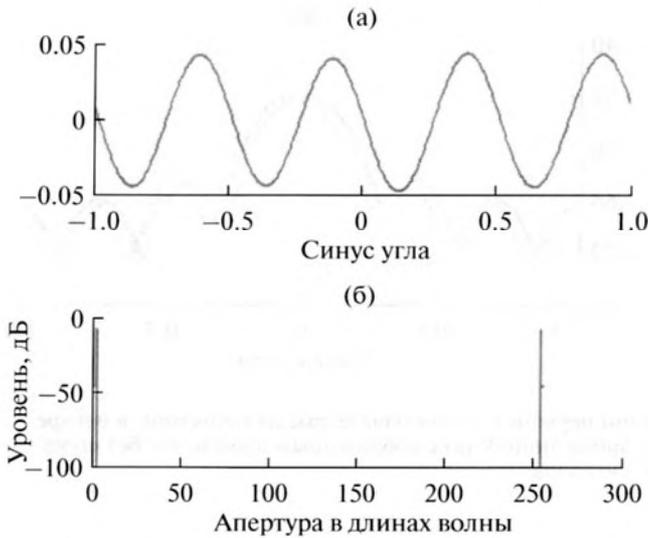


Рис. 2. (а) Спектр первого сигнала, прошедший фильтр (10). (б) Результат преобразования этого спектра БПФ вдоль антенны, апертура которой дополнена нулями.

Этот фильтр превращает комплексный спектр того сигнала, максимум спектра которого находится в точке минимума частотной характеристики фильтра, в синусоидальный сигнал, осциллограмма которого показана на рис. 2. Число полупериодов этой синусоиды равно числу действующих приемников антенны, так как форма спектра определяется числом действующих приемников, а добавленные приемники формируют дополнительные точки внутри этого спектра. При разложении этого сигнала в ряд Фурье с помощью БПФ спектр этой синусоиды весь целиком сосредотачивается в двух точках, что показано на том же рис. 2. БПФ от спектра синусоидального сигнала представляет собой сигнал на антенне с добавленными приемниками с нулевыми сигналами. То, что эти сигналы действительно получились нулевыми, есть свойство примененного БПФ. Спектр, вычисленный иначе в других промежуточных точках, приведет к иному результату, но в данном случае это не имеет никакого значения.

Эти две точки вырезаются, что исключает из дальнейшей обработки, какой бы они ни была, спектр сигнала первого источника. Это происходит и должно происходить в каждой отдельной точке трассы. Для этого при наличии шума точнее будет не определять точку максимума спектра сигнала (1) опытным путем по самому сигналу, а использовать описанную выше процедуру определения этой точки по результатам синтеза апертуры.

В данном случае различия данных опыта и результатов вычислений невелики, как это показано на рис. 3, как без шума, так и с добавленным шумом. Приведен только рисунок с добавленным

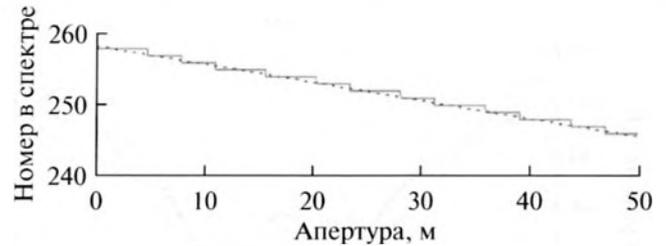


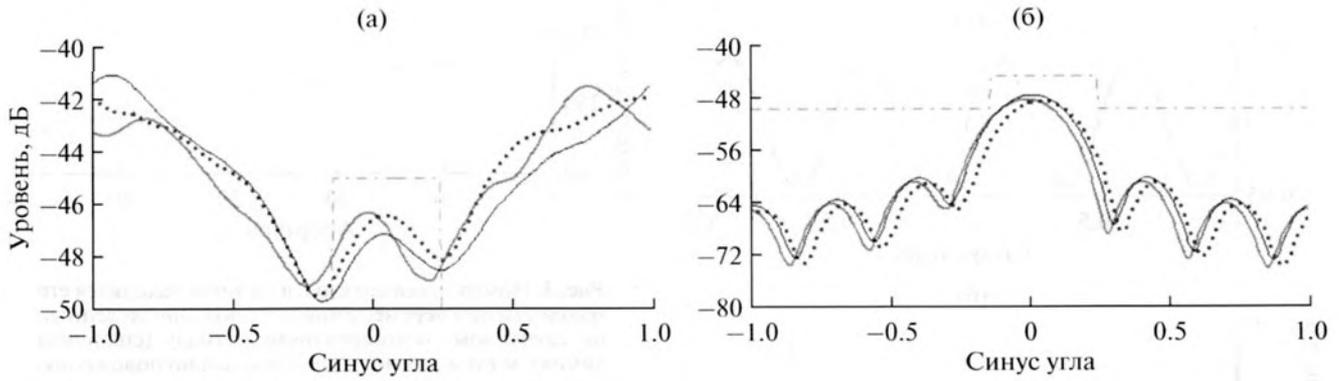
Рис. 3. Номер точки спектра, в которой находится его максимум при перемещении антенны, определенный по случайному некогерентному сигналу (сплошная линия), и тот же номер, вычисленный по положению сигнала, определенному полным синтезом апертуры (пунктир).

шумом, а рисунок без шума опущен, так как он ничем не отличается от приведенного рисунка в силу незначительного уровня добавленного шума. Показанный на рисунке результат опыта определялся не на основании измерений в каждой реализации, что приводит к большому разбросу результатов измерений в силу некогерентности сигналов, а путем линейной экстраполяции измерений, произведенных для синтеза апертуры после некогерентного накопления по 64 реализациям.

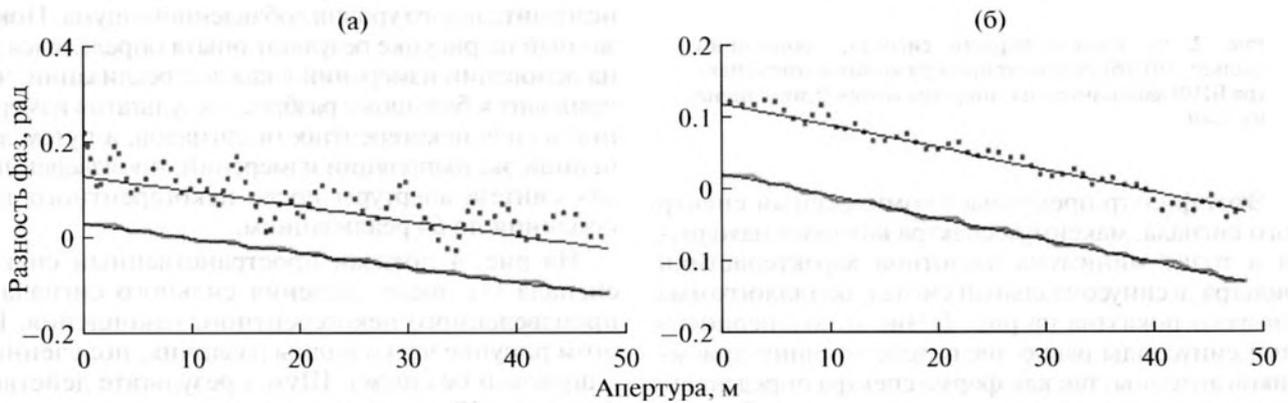
На рис. 4 показан пространственный спектр сигнала (1) после удаления сильного сигнала и произведенного некогерентного накопления. На этом рисунке четко видны различия, полученные с шумом и без шума. Шум в результате действия фильтра (10) получает сильную анизотропию. При этом синтез по второму сигналу становится невозможным, так как максимум шума намного превышает максимум сигнала, в результате чего синтез осуществляется по шуму, а не по сигналу. Если шум уменьшить еще на 10 дБ, то этого не происходит, и синтез получается. При добавленном шуму синтез происходит, если максимум определять не во всем спектре, а только в той его части, которая показана на рисунке. В этой части спектра шум еще не настолько усилен фильтром (10), чтобы полностью прекратить синтез, но оставшегося увеличения шума достаточно, чтобы существенно сместить оценку положения второго источника.

На рис. 5 показаны голограммы двух источников. Голограмма первого источника (как с шумом, так и без шума) очень тесно примыкает к теоретической прямой линии, так как уровень добавленного шума крайне мал сравнительно с уровнем первого сигнала. Голограмма второго сигнала искажается уже самой некогерентностью сигналов без добавляемого шума, а с добавленным шумом эта голограмма искажается весьма значительно благодаря усилению шума фильтром (10).

На рис. 6 показан результат оценки положения источников, полученной при завершении процесса синтеза. При этом каждый сигнал получен отдельно и поэтому не испытывает на себе влия-



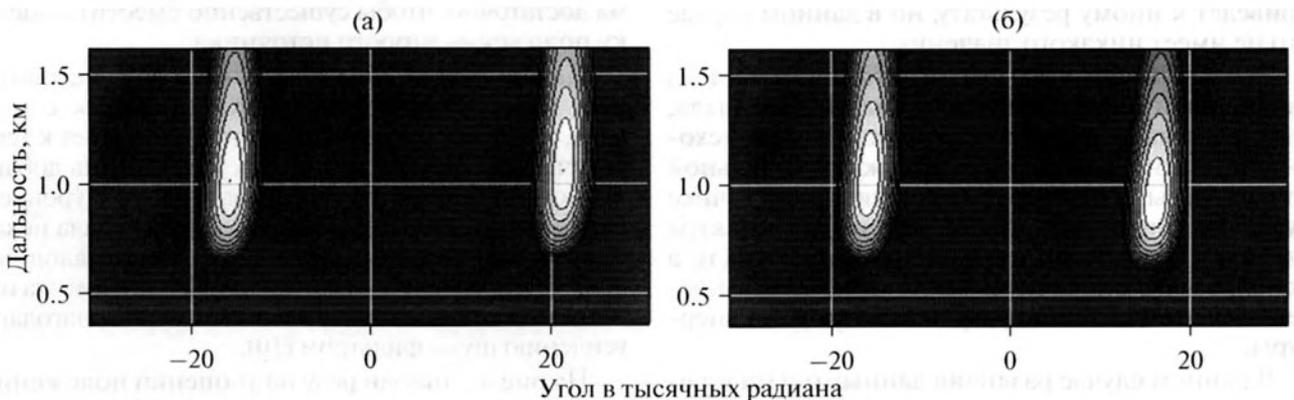
**Рис. 4.** Спектр второго сигнала, полученный после ликвидации первого в самом начале трассы (пунктир), в центре трассы (тонкая линия) и в самом конце трассы синтеза (сплошная линия): (а) с добавленным шумом, (б) без шума. Прямоугольником показана область определения максимума сигналов.



**Рис. 5.** Голограммы первого сигнала (сплошная линия) и второго сигнала (пунктир) (а) с добавленным шумом и (б) без шума. Тонкими линиями показаны теоретические голограммы первого и второго сигналов.

ния со стороны близкого соседа. Два сигнала показаны на одной картинке путем сведения в одно целое двух отдельных картинок. На этом рисунке приведены результаты обработки только фаз сигналов, что для оценки положения источников сигналов вполне достаточно.

На рис. 7 показан результат количественного анализа сигналов. Для этого в рассмотрение введена амплитуда сигналов, получаемая в результате некогерентного накопления. Амплитуда определяется по величинам максимумов сигналов, определяемых в точках, которые формируют сиг-



**Рис. 6.** Картина расположения источников, полученная в результате синтеза (а) с добавленным шумом и (б) без шума. Динамический диапазон – 1 дБ. Изолинии через 0.1 дБ. Амплитуды сигналов выровнены.

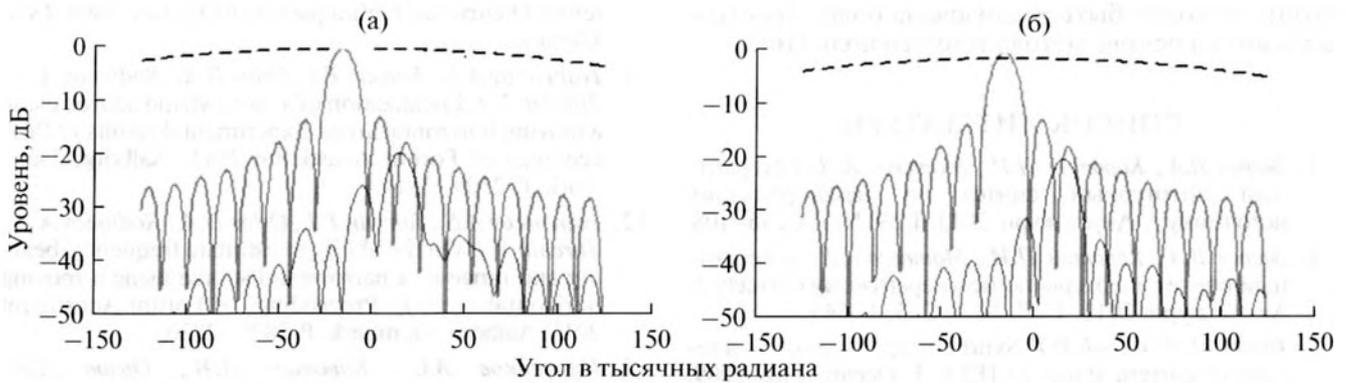


Рис. 7. Результат разрешения двух близких сигналов – первого (жирная линия) и второго (тонкая линия) (а) с шумом и (б) без шума. Пунктиром показан отклик перемещаемой антенны в начале трассы с некогерентным накоплением по 64 реализациям.

нал голограммы. На рис. 7 первый сигнал показан при исключении второго слабого сигнала фильтром (10), настроенным на координаты второго сигнала. При этом оба сигнала ослабляются фильтром (10) в точности одинаково, что позволяет определять разность уровней этих сигналов без дополнительных вычислений. Эти измерения выполнены при значительном усреднении данных, поэтому соотношение уровней первого и второго сигналов с шумом и без шума получилось практически одинаковым (разница менее 1 дБ). Истинное значение разностей уровней составляет 20 дБ. Так и получается в результате этой обработки как с шумом, так и без шума.

### ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА

Метод апертурного синтеза, описанный в [1], обладает оптимальной помехоустойчивостью при работе по одному-единственному сигналу. Это доказано относительно некогерентного синтеза апертуры в [4–10], а синтез, описанный в [1], обладает точно такой же помехоустойчивостью, как и некогерентный синтез. Это следует из того, что для накопления и тот, и другой синтез используют одинаковое число точек с одинаковой эффективностью. Синтез [1] использует некогерентное накопление по много меньшему числу реализаций, чем это делает некогерентный синтез апертуры [4–10]. Но не следует забывать, что некогерентный синтез апертуры – это не средство обнаружения сигнала, а средство оценки координат источника. Для этого некогерентному синтезу нужно иметь запас отношения сигнала к шуму, требуемая величина которого как раз и компенсирует сокращение числа накапливаемых некогерентно реализаций в методе [1] сравнительно с некогерентным синтезом апертуры. Методу когерентного синтеза [1] запаса отношения сигнала к шуму после некогерентного накопления не требуется, так как точно такой же запас помехоустойчивости при когерентном синтезе

апертуры получается в результате когерентного накопления.

В отношении второго слабого сигнала дело обстоит иначе, поскольку шум в результате фильтрации (10) приобретает сильную анизотропию и смещает оценку положения второго сигнала. Это мы видим по результатам моделирования. Применить компенсацию даже полностью известной анизотропии нельзя, так как шум неотделим от сигнала. Поэтому описываемый метод обладает низкой помехоустойчивостью сравнительно с оптимальной и применим только при значительном превышении уровня всех сигналов над уровнем шума.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любой метод синтеза апертуры по некогерентным источникам сигналов разной интенсивности, основанный на процедуре последовательного удаления более сильных сигналов, имеет возможность углового разрешения близко расположенных источников. Однако помехоустойчивость оценки углового положения менее мощных источников оказывается много ниже помехоустойчивости оценки положения более мощных, что требует относительно высокого (в сравнении с шумом) уровня всех разрешаемых источников. Это необходимо учитывать при практической реализации данного метода. В силу того, что при соблюдении данного условия метод дает принципиальную возможность высокого разрешения и снимает проблему “маскировки” относительно слабых источников сильными, он может быть актуальным не только при синтезе апертуры, но и для протяженных антенн с заполненной апертурой, для которых ограничение углового разрешения связано с возможным попаданием относительно слабого сигнала в “боковое поле” (в область первых боковых лепестков функции отклика антенны) сильного сигнала. При этом, однако, процедура подавления

его поля может быть реализована более простым образом на основе метода темного поля [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л.* Когерентный апертурный синтез по некогерентному источнику // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 96–108.
2. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л.* Когерентный синтез апертурного сигнала по некогерентному источнику // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 4. С. 534–545.
3. *Hayes M.P., Gough P.T.* Synthetic aperture sonar: a review of current status // IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34. № 3. P. 207–224.
4. *Autrey S.W.* Passive synthetic arrays // IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84. № 2. P. 592–598.
5. *Stergiopoulos S., Sullivan E.J.* Extended towed array processing by an overlap correlator // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. № 1. P. 158–171.
6. *Yen N.-C., Carey W.* Application of synthetic-aperture processing to towed-array data // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86. № 2. P. 754–765.
7. *Stergiopoulos S., Urban H.* A new passive synthetic aperture technique for towed arrays // IEEE J. Ocean. Eng. 1992. V. 17. № 1. P. 16–25.
8. *Stergiopoulos S.* Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87. № 5. P. 2128–2140.
9. *Edelson G.S., Tufts D.W.* On the ability to estimate narrow-band signal parameters using towed arrays // IEEE J. Ocean. Eng. 1992. V. 17. № 1. P. 48–61.
10. *Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И.* Оценка положения источника со сложным спектральным составом с использованием движущейся разреженной решетки // International Conference on Antenna Theory and Techniques, 6–9 October, 2009, Lviv, Ukraine.
11. *Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D.A., Rodionov A.A., Turchin V.I.* Localization of a narrowband source using a moving horizontal array: Experimental results // Proceedings of Forum Acusticum 2011. Aalborg, Denmark. P. 2509–2514.
12. *Ivanenkov A.S., Korotin P.I., Orlov D.A., Rodionov A.A., Turchin V.I.* On the ability to estimate frequency, bearing and range of a narrowband source using a moving horizontal array // Proceedings of Forum Acusticum 2011. Aalborg, Denmark. P. 2825–2830.
13. *Иваненков А.С., Коротин П.И., Орлов Д.А., Родионов А.А., Турчин В.И.* Использование пассивного апертурного синтеза для определения координат тональных источников // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: ГЕОС, 2011. С. 205–209.
14. *Артельный В.В., Артельный П.В., Коротин П.И., Родионов А.А., Турчин В.И.* Экспериментальное исследование локализации источника звука в случае движения приемной системы по произвольной замкнутой траектории // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: ГЕОС, 2011. С. 233–236.
15. *Орлов Д.А.* Определение положения неподвижного гидроакустического источника с помощью движущейся антенной решетки в реальном масштабе времени // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: ГЕОС, 2011. С. 229–233.
16. *Зверев В.А.* Антенна темного поля // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 3. С. 401–404.
17. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Выделение сигналов из помех численными методами. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.