

УДК 534.231

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ 4-го ПОРЯДКА

© 1999 г. В. В. Герасимов, Ю. В. Гуляев, А. В. Миргородский, В. И. Миргородский, С. В. Пешин

Институт радиотехники и электроники РАН
141120 г. Фрязино Московской области, пл. Акад. Введенского, 1
E-mail: vim288@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 26.12.97 г.

Рассмотрены механизмы формирования и особенности пространственного разрешения при пассивной корреляционной локации. На основе геометрических соображений интерпретированы различия в продольном и поперечном разрешениях при расположении приемников излучения в одной плоскости. Проведены экспериментальные исследования пространственного разрешения корреляционного локатора. В результате обнаружено количественное согласование со сделанными теоретическими предсказаниями. Экспериментально полученный вид аппаратной функции близок к предсказанному на основе математического моделирования.

Принцип пассивной локации на основе корреляционной обработки 4-го порядка был впервые предложен в работах [1, 2]. С его помощью показана возможность получения пространственных распределений интенсивности источников некогерентного излучения. Это проиллюстрировано экспериментом с локацией искусственного источника некогерентного излучения.

Основным отличием предложенного метода [1, 2] от большинства известных методов осуществления пассивной корреляционной локации [3–7] является использование для образования томографического изображения корреляционной обработки 4-го, а не 2-го порядка. Это, как показано в [1, 2], позволяет упростить процедуру восстановления томографических изображений, однако, сопровождается особенностями, некоторым из которых и посвящена данная работа.

Теория [1, 2] была развита для случая δ -коррелированного излучения по пространству и времени. Поскольку в реальных условиях такое приближение справедливо не всегда, необходимо развитие принципов корреляционной локации 4-го порядка для сигналов с конечной длительностью и ограниченным частотным спектром. Этому, в частности, посвящены работы [7, 8], в которых проанализированы эффекты, связанные с конечностью времени измерения и числом источников излучения. Данная работа является продолжением работы [8] и посвящена особенностям пространственного разрешения метода пассивной локации [1, 2] на основе корреляционной обработки 4-го порядка.

Как было показано в [1, 2], распределение интенсивности $I(r)$ некогерентного δ -коррелирован-

ного излучения может быть получено из сигналов, принятых четырьмя разнесенными в пространстве приемниками, при помощи корреляционной обработки 4-го порядка, с использованием следующего выражения:

$$\langle I^2(r) \rangle = k_0 k_1 k_2 k_3 |r - r_0| |r - r_1| |r - r_2| |r - r_3| \times \\ \times C_{1234}(\tau_{01}, \tau_{02}, \tau_{03}) \times \\ \times \exp(\alpha(|r - r_0| + |r - r_1| + |r - r_2| + |r - r_3|)),$$

где k_0, k_1, k_2 и k_3 – коэффициенты чувствительности приемников излучения, r_0, r_1, r_2 и r_3 – координаты приемников излучения, $C_{1234}(\tau_{01}, \tau_{02}, \tau_{03})$ – корреляционная функция 4-го порядка, α – коэффициент затухания излучения в среде. Точка анализа определяется заданием значений задержек τ_{01}, τ_{02} и τ_{03} сигналов 1-го, 2-го и 3-го каналов относительно “опорного”, в данном случае, нулевого. В качестве “опорного” может использоваться любой из 4-х каналов.

Для того чтобы сделать рассмотрение более наглядным, представим корреляционную функцию 4-го порядка по “теореме моментов” в виде комбинации корреляционных функций 2-го порядка, что справедливо для достаточно распространенного случая сигналов с гауссовым типом распределения:

$$C_{0123}(\tau_{01}, \tau_{02}, \tau_{03}) = C_{01}(\tau_{01})C_{23}(\tau_{03} - \tau_{02}) + \\ + C_{02}(\tau_{02})C_{13}(\tau_{03} - \tau_{01}) + C_{03}(\tau_{03})C_{12}(\tau_{02} - \tau_{01}), \quad (1)$$

где $C_{0123}(\tau_{01}, \tau_{02}, \tau_{03})$ – корреляционная функция 4-го порядка, а $C_{01}(\tau_{01}), C_{23}(\tau_{03} - \tau_{02}), C_{02}(\tau_{02}),$

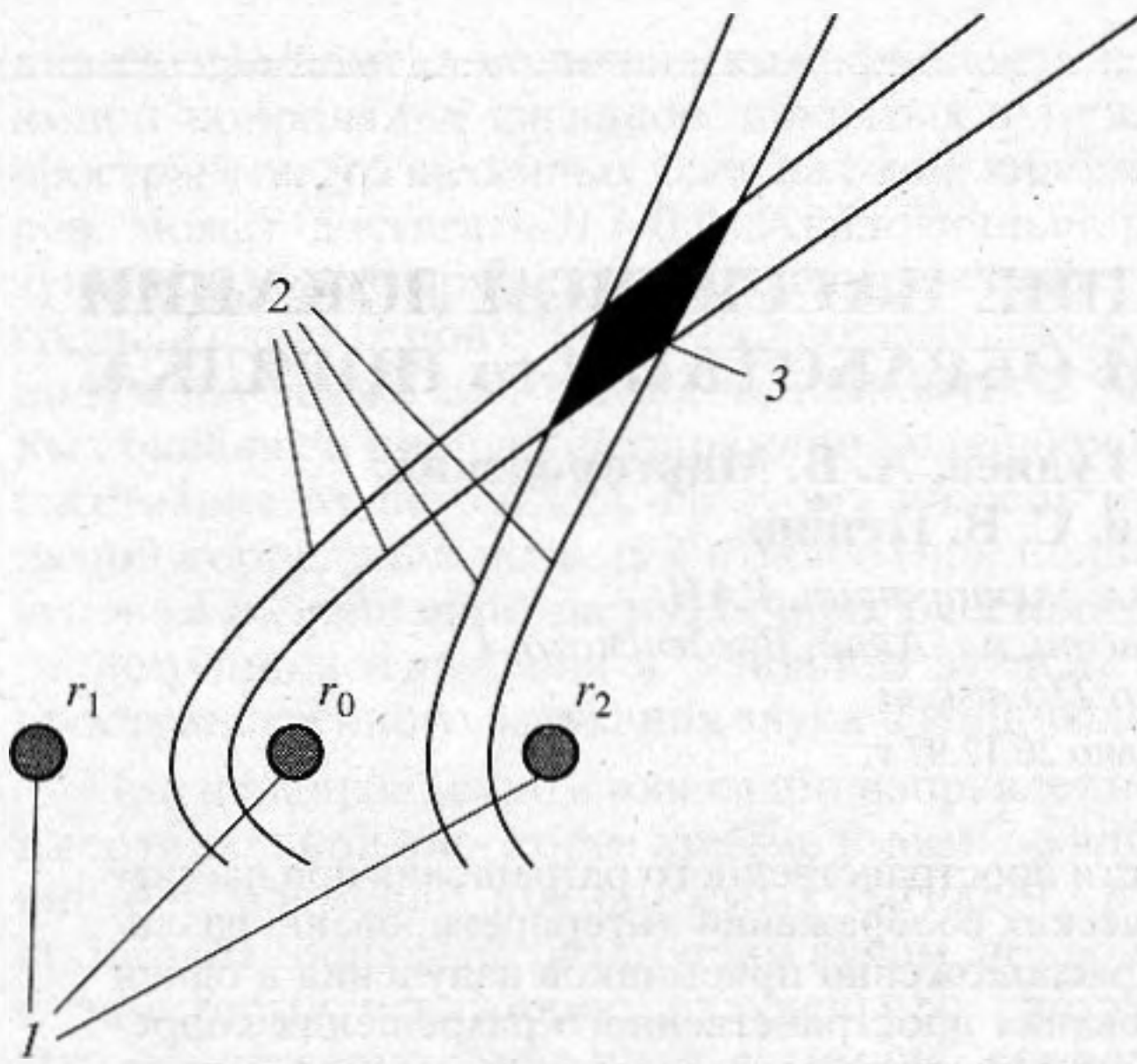


Рис. 1. Схема формирования ячейки пространственного разрешения в плоском случае: 1 – приемники излучения, 2 – линии равных разностей задержек сигналов от разных приемников, 3 – ячейка пространственного разрешения.

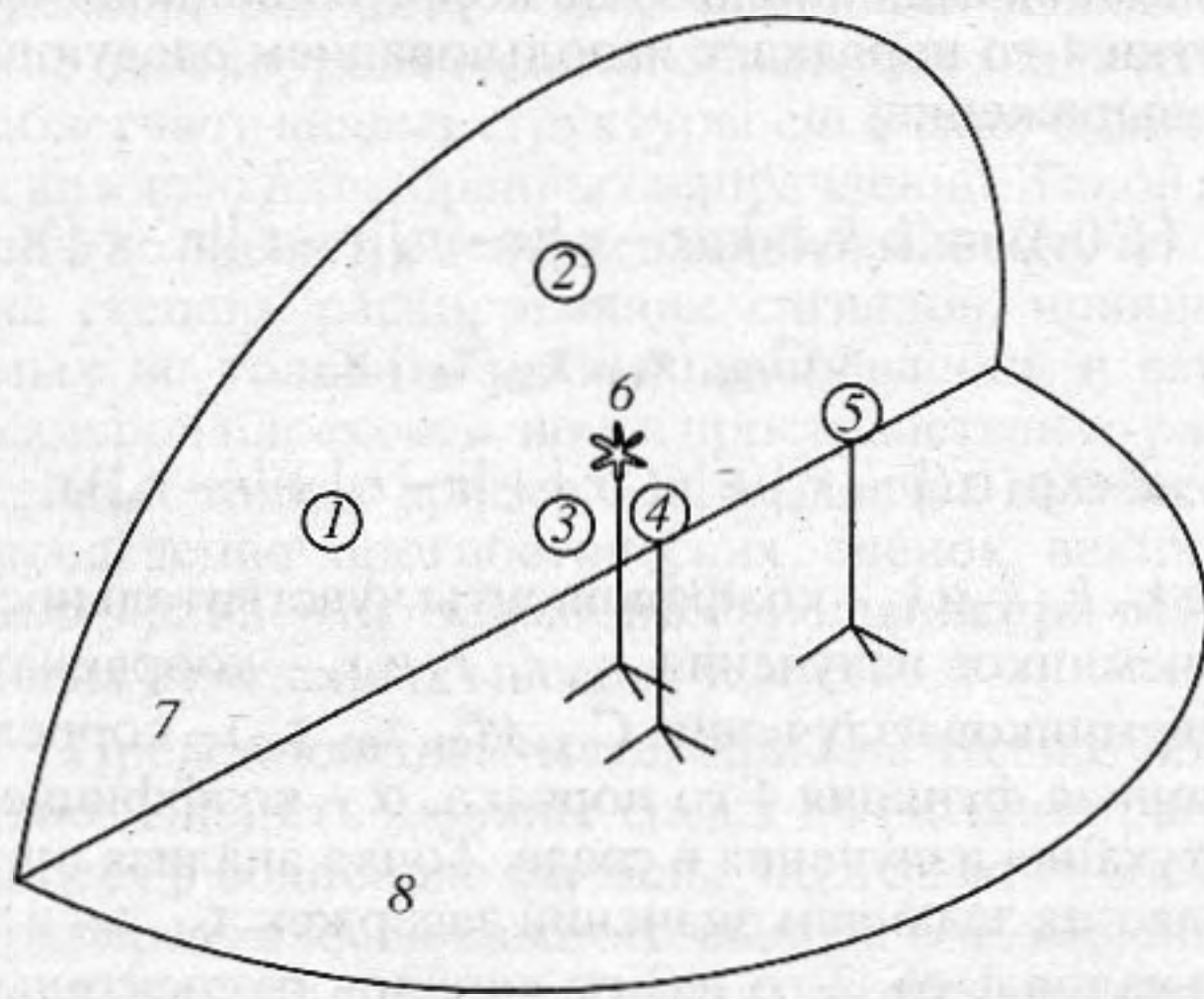


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1–5 – приемники излучения (микрофоны), 6 – источник излучения, 7 – стена здания, на которой расположены 1-й, 2-й и 3-й приемники излучения, 8 – поверхность земли.

$C_{13}(\tau_{03} - \tau_{01})$, $C_{03}(\tau_{03})$, $C_{12}(\tau_{02} - \tau_{01})$ – корреляционные функции 2-го порядка.

Рассмотрим в качестве простейшего случай одного точечного источника некогерентного излучения. В этом случае для δ -коррелированных по времени принимаемых сигналов парные корреляционные функции будут иметь вид δ -функций, отстоящих от начала координат на расстояние, пропорциональное разности хода от источника до со-

ответствующих приемников. Геометрическое место точек, для которых фиксирована разность расстояний до двух заданных точек (где расположены приемники) есть, как известно, гиперболическая поверхность. Различным парам приемников соответствуют гиперболические поверхности с разными параметрами. Точка анализа определяется пересечением этих поверхностей. Это справедливо для δ -коррелированного излучения. Реально, когда у сигналов конечный спектр, пики корреляционных функций, соответствующих точечным источникам, имеют, как известно, ширину Δ (по какому-либо уровню, например 0.5), обратно пропорциональную ширине спектра. Тогда поверхности равных задержек преобразуются в слои, состоящие из пары поверхностей, соответствующих задержкам $\tau_{01} - \Delta/2$ и $\tau_{01} + \Delta/2$. Пересечение таких слоев образует элементарную ячейку пространственного разрешения (являющуюся в некотором смысле представлением функции неопределенности), вид которой, из общих соображений, должен зависеть от положений приемников излучения и положения точки зондирования. Это геометрически иллюстрируется на рис. 1, для плоского случая, где r_0 , r_1 и r_2 – точки расположения приемников излучения.

Как видно, форма ячейки пространственного разрешения имеет ромбообразную форму, причем ее продольный и поперечный размеры могут быть различны. Такой подход позволяет объяснить, почему в первых экспериментах [1, 2], при проведении которых приемники излучения располагались в одной плоскости, продольное пространственное разрешение было заметно хуже (примерно в 5 раз) поперечного. Оценки, сделанные с учетом конкретной геометрии, приводят к такому же соотношению между продольным и поперечным пространственными разрешениями.

На основе приведенных соображений несложно предложить такое расположение приемников, при котором пространственное разрешение было бы заведомо одинаково по разным направлениям. Для этого приемники необходимо поместить в вершины тетраэдра, а источники расположить вблизи центра тетраэдра. Как показали дальнейшие эксперименты, область, где разрешение близко для разных направлений, простирается внутри тетраэдра практически до его граней.

Для проверки правильности сделанного предположения, были выполнены соответствующие эксперименты. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В базовой конфигурации использовалось пять микрофонов, образующих два тетраэдра с общим основанием: правый и левый. Таким образом, была возможность получать пять изображений с помощью разных приемников, сгруппированных по 4, как бы с разных точек зрения. Размер сторон тетраэдров состав-

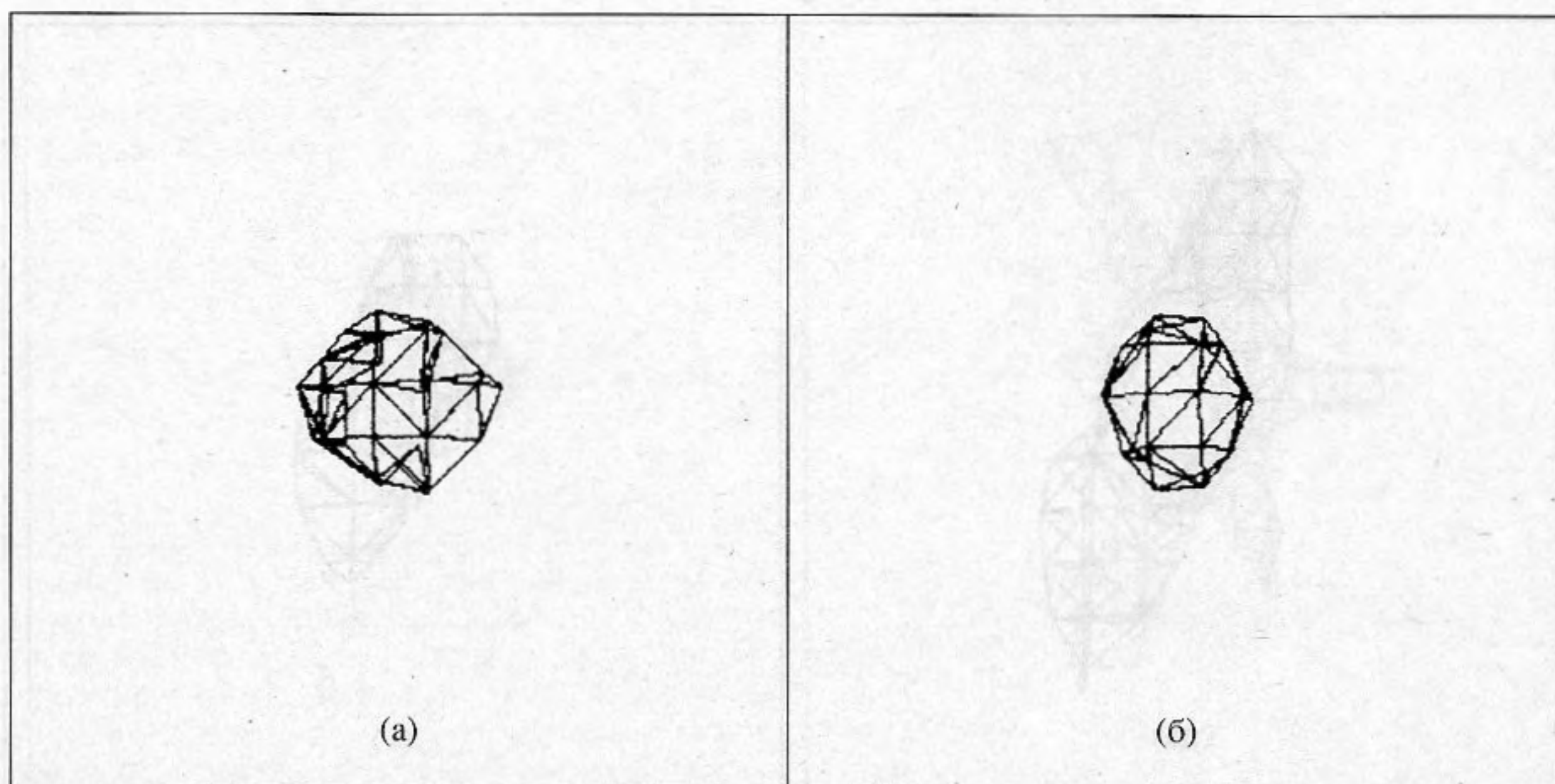


Рис. 3. Изображения источника излучения в виде поверхностей постоянных уровней интенсивности (равных 0.5 от максимума), при использовании сигналов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го приемников излучения. а – результаты эксперимента; б – результаты теоретического расчета в соответствии с результатами работ [1, 2].

лял около 6 м. В качестве источника некогерентного акустического излучения использовалось сопло, из которого выходил сжатый воздух. Сопло располагалось вблизи центра общего для двух тетраэдров треугольника, в его плоскости, как показано на рис. 2.

Экспериментальные результаты, полученные на этой установке при максимальной частоте регистрации сигналов в каждом канале около 4 КГц и полосе частот около 1 КГц, подтвердили предположение о равенстве в такой конфигурации пространственных разрешений по разным направлениям. Это иллюстрируется на рис. 3, на котором представлены трехмерные изображения источника, полученные с помощью микрофонов 1, 2, 3 и 4 (см. рис. 2), в виде поверхности уровня постоянной интенсивности, равной в данном случае 0.5 от величины максимума интенсивности.

Как видно, представленные поверхности подобны друг другу по форме. Размер теоретической поверхности несколько менее размера экспериментальной, что, как показал анализ, явилось следствием особенностей частотного спектра экспериментальных сигналов. На поверхностях, полученных как из эксперимента, так и из теории, пространственное разрешение практически не зависит от направления. Размер (диаметр) этих поверхностей, являющийся, по сути дела, разрешением локатора по уровню 0.5, составляет менее 40 см (что близко к величине длины когерентности при полосе частот около 1 кГц). Это соответствует результатам работы [9], где при активном

зондировании было получено пространственное разрешение порядка длины волны излучения.

Поскольку источником излучения являлось сопло диаметром менее 1 мм (гораздо меньшим фактически наблюдаемого пространственного разрешения), то полученное изображение можно рассматривать как элементарную ячейку разрешения или, говоря другими словами, как линию уровня аппаратной функции корреляционного локатора. Это изображение было получено с помощью приемников, расположенных вблизи вершин “левого” тетраэдра. Такое же изображение получается, если использовать сигналы и “правого” тетраэдра. Однако, такая картина наблюдается не со всеми возможными “четверками” полученных сигналов. На рис. 4а представлена поверхность уровня изображения того же источника, полученная в том же эксперименте с помощью другой группы из четырех приемников излучения 1, 3, 4, 5 (см. рис. 2). Как видно, все эти приемники располагались с одной стороны от источника. На рис. 4б представлено изображение, полученное для тех же условий теоретически.

Видно, что, формы экспериментальных и теоретических поверхностей аппаратной функции (по уровню 0.5) имеют эллипсоидоподобную, вытянутую форму и качественно подобны друг другу. Это подтверждает сделанный выше вывод о природе зависимости пространственных разрешений по разным направлениям от взаимного расположения источника излучения и приемников.

Свойства систем отображения определяются не только величиной разрешения по уровню 0.5,

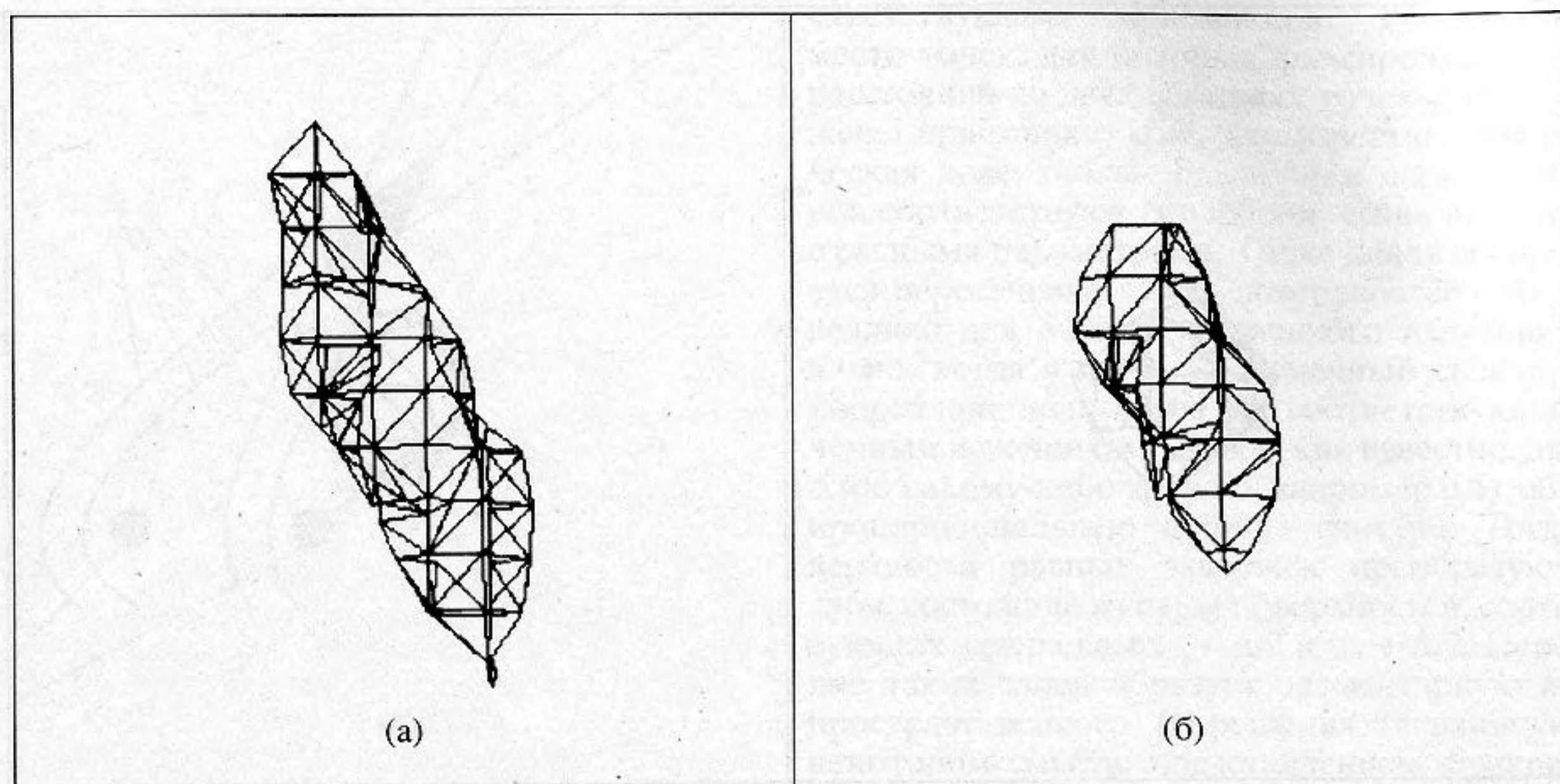


Рис. 4. Изображения источника излучения в виде поверхностей постоянных уровней интенсивности (равных 0.5 от максимума), при использовании сигналов 1-го, 2-го, 4-го и 5-го приемников излучения. а – результаты эксперимента, б – результаты теоретического расчета.

но и поведением аппаратной функции при меньших уровнях, что характеризует возможность отображения контрастных (с большими перепадами интенсивности) объектов. На рис. 5 представлены изображения (поверхности постоянного уровня интенсивности) того же, что и на рис. 3 и 4 объекта, но полученные при меньших значениях уровня – 0.3 и 0.2.

Как видно, при уменьшении уровня отображения происходит общее увеличение размеров поверхности уровня изображения (сравните с рис. 3) и, кроме того, проявляются (становятся видны) характерные особенности – “отростки” исходящие из изображения. При уровне 0.3 эти “отростки” только начинают проявляться, а при уровне 0.2 становятся существенными. Как показал анализ и как видно на рисунках, эти “отростки” располагаются вдоль трех осей, пересекающихся в центре распределения. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей показывает, как и ранее, довольно неплохое их соответствие.

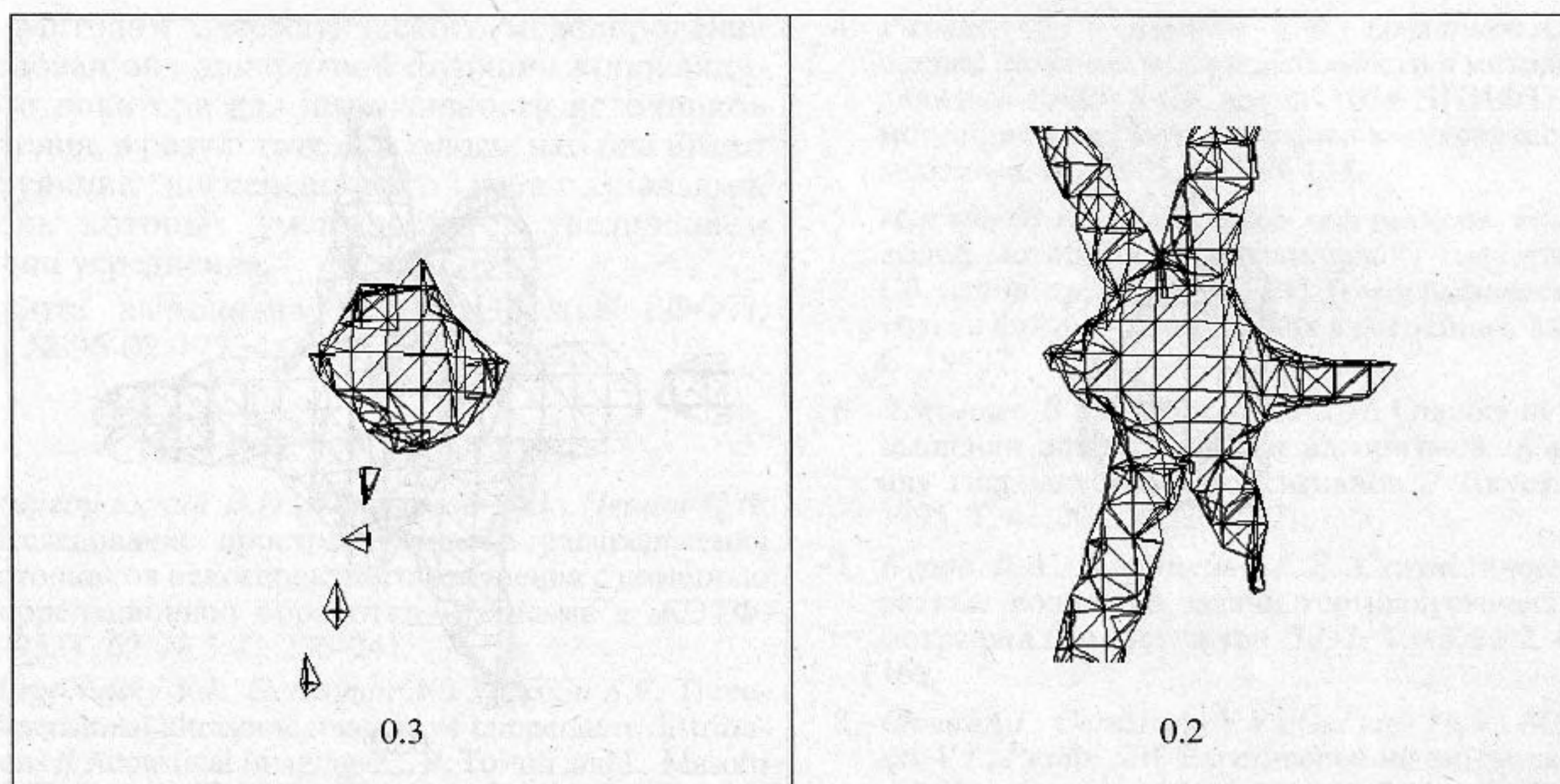
Природа этих особенностей может быть наглядно понята из рассмотрения выражения (1). Как видно, каждое из трех слагаемых имеет вид произведения двух корреляционных функций 2-го порядка, что для случая точечного источника излучения, эквивалентно пересечению двух гиперболических поверхностей, которое представляет собой линию. Эти линии и проявляются в виде “отростков”. В центре, соответствующем положению источника, где происходит наложение трех таких линий, величина сигнала будет втрое больше чем на линиях. Анализ эксперименталь-

ных результатов показал их количественное соответствие с приведенной выше моделью.

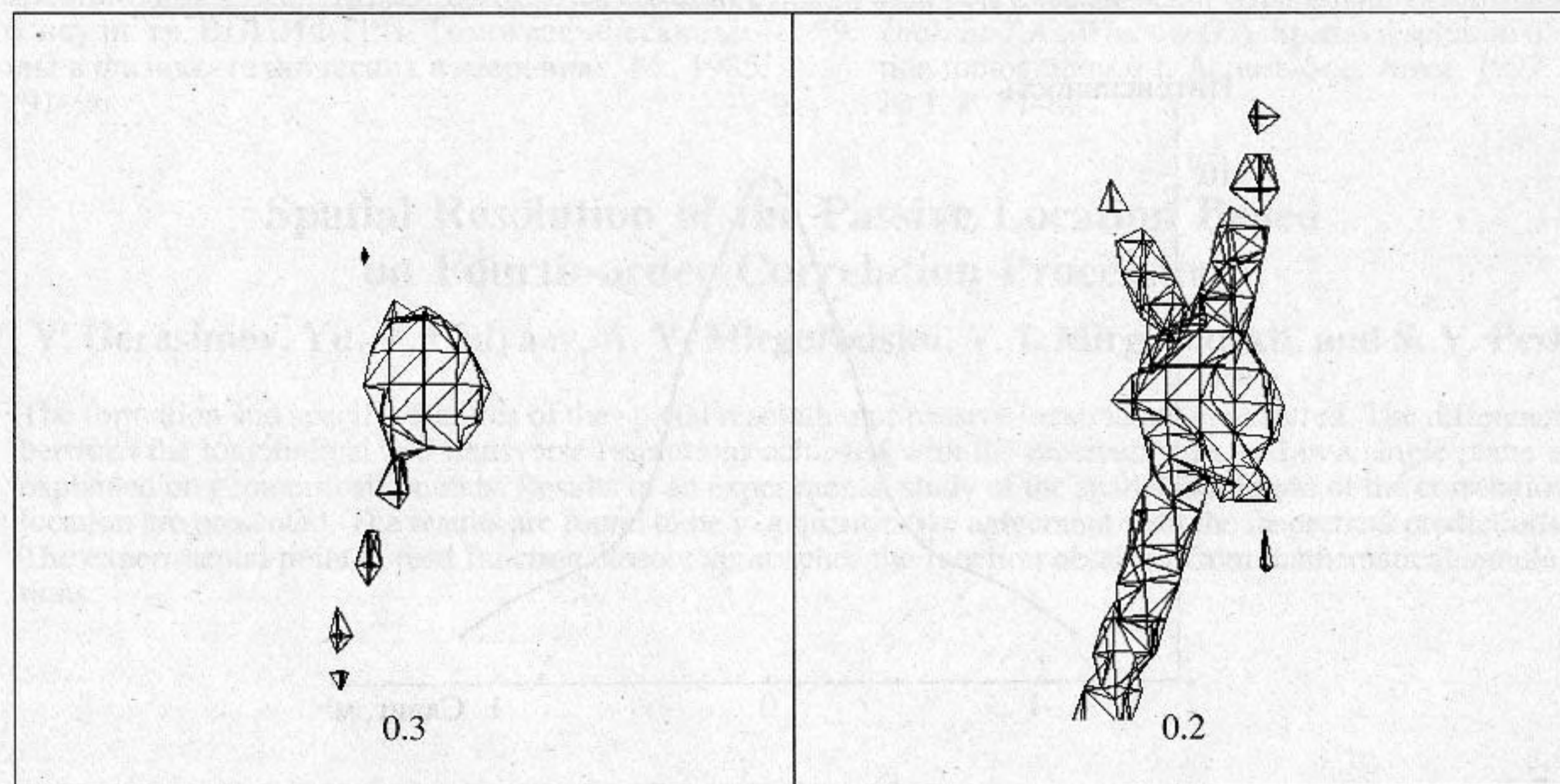
Одним из способов уменьшения влияния этого, безусловно, вредного, эффекта является объединение в одно изображений, полученных при различных группировках приемников по 4. Это должно приводить к результату, так как у этих изображений “отростки” располагаются, как правило, по разным направлениям. На рис. 6 представлено изображение, сформированное путем объединения всех пяти изображений, полученных от пяти групп приемников. Использовать экспериментальные результаты для построения этих изображений оказалось проблематично из-за недостаточно высокого их контраста. Это связано с не имеющими, в данном случае, принципиального значения особенностями сигналов, регистрируемых в эксперименте. Во-первых, это наличие акустических отражений, а во-вторых, помехи (типа сетевых наводок), которые препятствуют проведению анализа сами по себе, а также через интермодуляционные искажения принимаемых сигналов.

Как видно из рис. 6, уровень “отростков” заметно снизился – при уровне 0.1 их нет вообще. Это подтверждает плодотворность приведенного выше предложения по уменьшению влияния “отростков” на качество изображения.

Для более наглядного представления параметров разрешения, которые возможно получить с помощью корреляционной локализации, был проделан численный эксперимент с одним источником некогерентного излучения. Размер полученного в результате расчетов изображения источника был



(a)



(б)

Рис. 5. Изображения источника излучения в виде поверхностей постоянных уровней интенсивности (равных 0.3 и 0.2 от максимума), при использовании сигналов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го приемников излучения. а – результаты эксперимента, б – результаты теоретического расчета.

подвергнут оценочному измерению при различных уровнях (так как форма поверхности уровня особенно при малых значениях уровня не сферическая). Результат таких измерений в зависимости от величины уровня, при котором строилась поверхность, представлен на рис. 7. Эта зависимость, по-видимому, может приближенно рассматриваться как аппаратная функция, однако следует помнить, что для системы отображения, которой и является корреляционный локатор, аппаратной

функцией в более строгом смысле, является функция трех переменных. На рис. 7 пунктиром показан результат аппроксимации с помощью функции “дисперсионного” типа. Как видно, до уровня $\sim 3 \times 10^{-2}$ аппаратная функция имеет близкий к “дисперсионному” вид, а при меньших уровнях наблюдаются “крылья”, величина которых, как показало моделирование, убывает с увеличением длительности усреднения принимаемых сигналов.

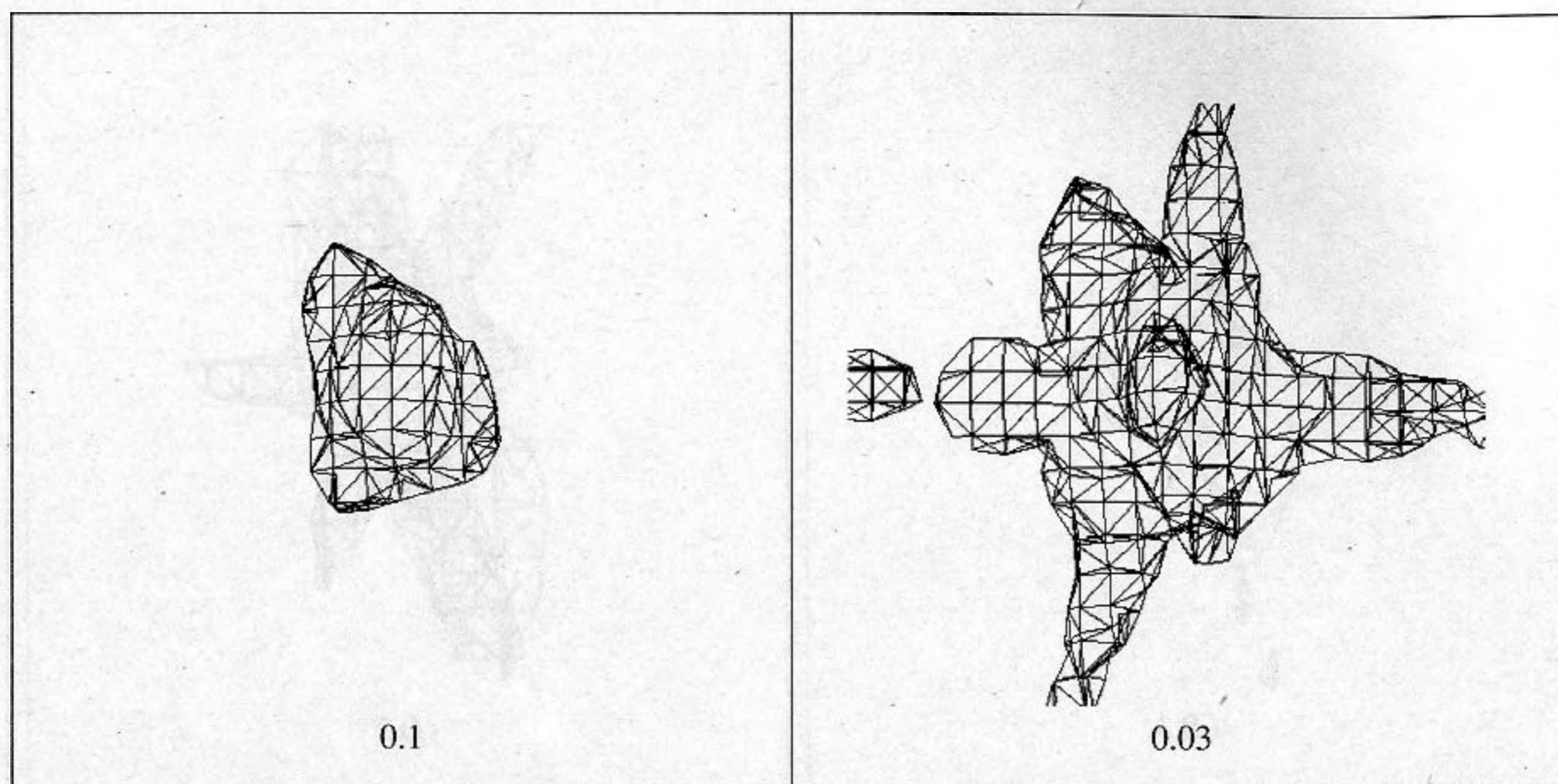


Рис. 6. Изображения источника излучения в виде поверхностей постоянных уровней интенсивности (равных 0.1 и 0.03 от максимума), полученные объединением всех пяти изображений (результаты теоретического расчета).

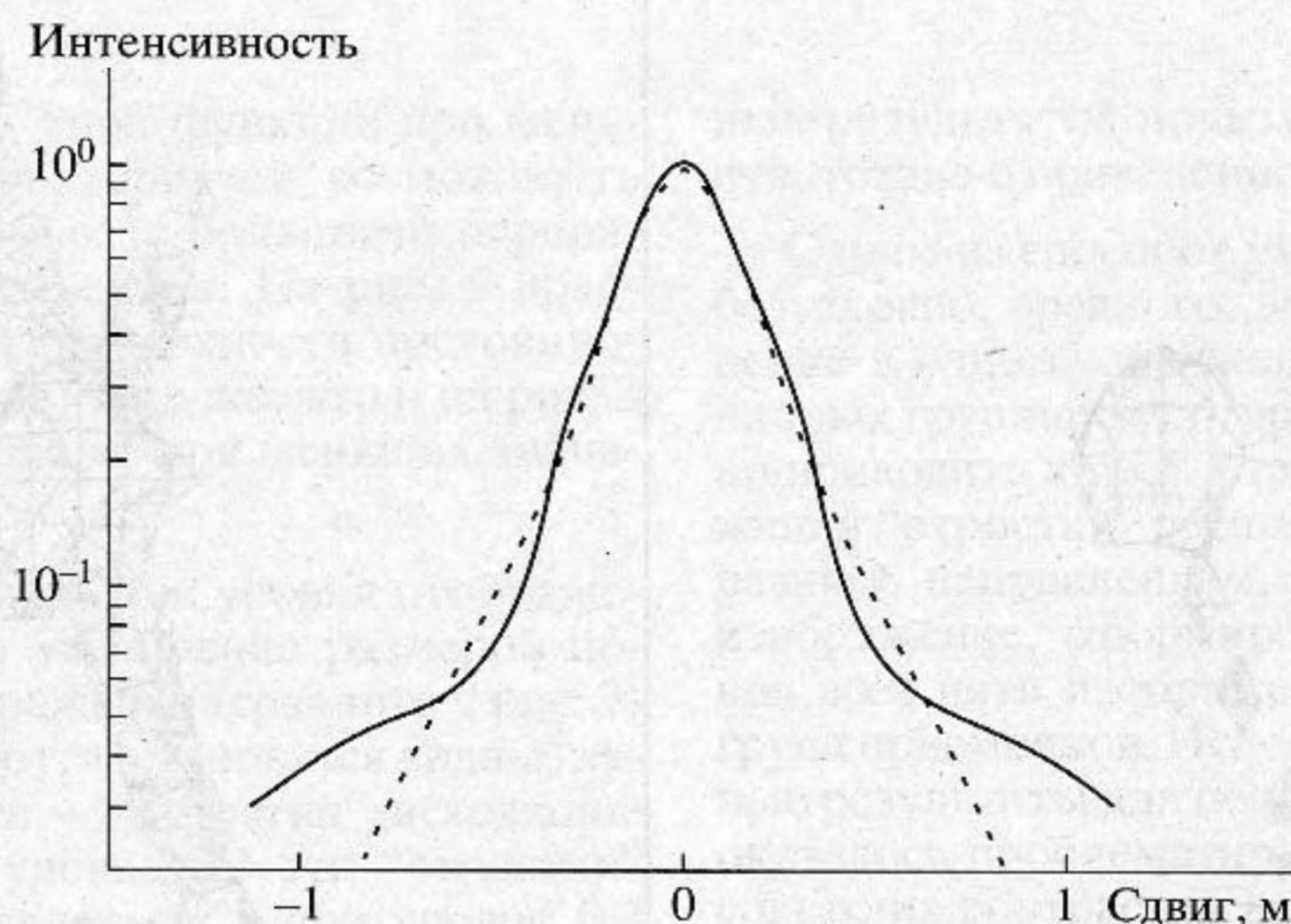


Рис. 7. Усредненная по направлениям аппаратная функция корреляционного локатора при количестве отсчетов 10^6 , получено математическим моделированием.

В заключение сформулируем основные выводы работы.

1. На основе геометрических соображений интерпретированы различия в продольном и поперечном разрешениях при расположении приемников излучения в одной плоскости. Теоретически показано, что при расположении приемников излучения вблизи вершин тетраэдра пространственное разрешение источников вблизи центра тетраэдра одинаково по всем направлениям.

2. Проведены экспериментальные исследования пространственного разрешения корреляционного локатора. В результате обнаружено

количественное согласование со сделанными теоретическими предсказаниями. В частности экспериментально получено:

а) равенство пространственного разрешения (по уровню 0.5) по всем направлениям (форма элемента пространственного разрешения близка к сферической),

б) вид аппаратной функции близкий к предсказанному на основе математического моделирования,

в) пространственное разрешение близкое по величине к длине когерентности принимаемого излучения.

3. Методом математического моделирования исследован вид аппаратной функции корреляционного локатора для интенсивности источников излучения, в результате оказалось, что она имеет вид функции "дисперсионного" типа с крыльями, уровень которых уменьшается с увеличением времени усреднения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 96-02-17734а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Исследование пространственного распределения источников некогерентного излучения с помощью корреляционной обработки // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. № 3. С. 236–241.
2. *Mirgorodsky V.I., Gerasimov V.V., Peshin S.V.* Three-dimensional ultrasonic imaging of temperature distributions // *Acoustical Imaging-22*, P. Tortoli and L. Masotti ed. New York: Plenum Press, 1996. P. 89–94.
3. *Бычков В.Б., Теворовский В.И.* Об одной интерференционной схеме эмиссионной томографии // Сб. научн. тр. ВНИИФТРИ. Томографические методы в физико-технических измерениях. М., 1985. С. 91–96.
4. *Рахимов Р., Фейзханов У.Ф., Цыганков С.Г.* Об оценке функции неопределенности в методе неподвижной точки // Сб. научн. тр. ВНИИФТРИ. Томографические методы в физико-технических измерениях. М., 1985. С. 120–124.
5. *Маслов В.К.* Измерение параметров волновых полей методами кинематической томографии // Сб. научн. тр. ВНИИФТРИ. Томографические методы в физико-технических измерениях. М., 1990. С. 19–27.
6. *Лекомцев В.М., Москвичев Д.П.* Оценка путей повышения эффективности алгоритмов обнаружения гидроакустических сигналов // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. № 2. С. 267–271.
7. *Буров В.А., Касаткина Е.Е.* Статистические обратные волновые задачи термоакустической томографии // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 2. С. 162–169.
8. *Chmill A.I., Gerasimov V.V., Guluaev Yu.V., Mirgorodsky V.I., Peshin S.V.* Experimental investigations of the correlation tomography space resolution // *Acoustical Imaging-23*, S. Lees ed. New York: Plenum Press, 1997. P. 607–611.
9. *Dickens T.A., Winbow G.A.* Spatial resolution of diffraction tomography // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. № 1. P. 77–86.

Spatial Resolution of the Passive Location Based on Fourth-order Correlation Processing

V. V. Gerasimov, Yu. V. Gulyaev, A. V. Mirgorodskii, V. I. Mirgorodskii, and S. V. Peshin

The formation and specific features of the spatial resolution of passive location are considered. The difference between the longitudinal and transverse resolutions achieved with the receivers arranged in a single plane is explained on geometrical grounds. Results of an experimental study of the spatial resolution of the correlation location are presented. The results are found to be in a quantitative agreement with the theoretical predictions. The experimental point-spread function closely approaches the function obtained from mathematical simulations.