

Министерство образования Российской Федерации
Научно-исследовательский радиофизический институт

П р е п р и н т N 464

**МНОГОЛУЧЕВОЙ
БИСТАТИЧЕСКИЙ СОДАР**

В. О. Рапопорт,
Н. А. Митяков,
В. А. Зиничев,
Ю. А. Сазонов
Ф. И. Выборнов

Нижний Новгород 2000

В 1997-1998 с помощью однолучевого бистатического содара, созданного на базе двух полноповоротных параболических антенн РТ-15 диаметром 15 метров, были проведены исследования ветровой турбулентности в атмосфере. При бистатическом зондировании исследуемая область определяется пересечением лучей приемной и передающей антенн. Полученные данные по рассеянию акустических волн позволили наблюдать эволюцию во времени атмосферной турбулентности в объеме рассеяния, а также оценить величину структурного параметра ветровой турбулентности на двух пространственных масштабах (0,5 и 30 метров) инерционного интервала. Для исследования пространственно-временных корреляционных характеристик атмосферной турбулентности необходимо получать одновременные данные о рассеянии акустических волн в нескольких соседних рассеивающих объемах. Для таких измерений авторы предложили использовать новый инструмент - многолучевой бистатический содар. С этой целью была проведена модернизация однолучевого бистатического содара и создан многолучевой режим. Летом 2000 г. были получены пробные записи в многолучевом режиме работы содара, которые демонстрируют возможности нового инструмента.

1. Введение

Для исследования ветровой турбулентности обычно используется акустический локатор (сонар). В 1997-1998 в НИРФИ были проведены эксперименты с помощью бистатического сонара, созданного на базе двух полноповоротных параболических антенн РТ-15 (диаметр 15 метров, фокусное расстояние 5,25 м), разнесенных на 425 метров. В фокальной плоскости передающей антенны были установлены четыре синфазных рупорных излучателя 25ГР-Д2 со смещением оси каждого излучателя (относительно фокуса) на 21 см в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В фокусе приемной антенны был установлен измерительный микрофон. Акустическая система работала на фиксированной частоте (636 или 836 Гц). При бистатическом зондировании исследуемая область задается пересечением лучей приемной и передающей антенн. Полученные на этой установке данные по рассеянию акустических волн позволили наблюдать эволюцию во времени атмосферной турбулентности в объеме рассеяния, а также оценить величину структурного параметра ветровой турбулентности на двух пространственных масштабах (0,5 и 30 метров) инерционного интервала [1].

Для исследования пространственно-временных корреляционных характеристик (что явилось бы следующим шагом в исследовании атмосферной турбулентности) необходимо получать одновременные данные о рассеянии акустических волн из нескольких соседних рассеивающих объемов. Для проведения таких измерений была выполнена модернизация имевшегося бистатического сонара, позволившая реализовать многолучевой режим работы как передающей, так и приемной антенн. Кроме того, была использована дополнительная приемная антенна РТ-4 (диаметр зеркала

- 4,5 м, фокусное расстояние - 1,57 м), находящаяся на расстоянии около 400 метров от передающей антенны (примерно в том же направлении, что и основная приемная антенна РТ-15).

Летом 2000 г. были получены пробные записи в многолучевом режиме работы содара, которые демонстрируют возможности нового инструмента. В задачу на первом этапе входило сопоставление расчетных данных о взаимодействии лучей передающей и приемной антенн с полученными в результате эксперимента записями рассеянного сигнала. В какой степени можно разделить соседние объемы рассеяния, образованные пересечением лучей; какую геометрию лучей следует использовать в дальнейшем; какая из двух приемных антенн имеет преимущество - на подобные вопросы мы хотели найти ответы на первом этапе.

2. Постановка эксперимента

В модернизированном содаре четыре рупорных излучателя передающей антенны РТ-15 запитывались (каждый) от отдельных усилителей мощности и задающих звуковых генераторов. Рабочие частоты четырех генераторов были выбраны равными 737, 787, 837 и 887 Гц. Все четыре усилителя мощности управлялись общим импульсным генератором, задававшим длительность и период повторения зондирующих импульсов. Электрическая мощность, подводившаяся к каждому рупору, составляла 20 - 25 Вт. Таким способом формировались четыре разнесенных в пространстве луча передающей антенны. Расчетное угловое смещение центра (оси) каждого луча относительно оси зеркала составляло около 2 градусов при ширине луча (на уровне - 3 дБ) около 2 градусов. Поскольку лучи передающей антенны имели разные частоты, идентификация лучей в пространстве определяется однозначно. Разумеется, акустическая мощность в каждом из четырех лучей передающей антенны содара меньше, чем суммарная мощность на рабочей частоте в однолучевом режиме, что приводит к некоторому снижению потенциала многолучевого содара.

В экспериментах 2000 г. главная ось передающей антенны была постоянно направлена в зенит. На рис.1 представлен расчетный контурный график сечения четырех лучей передающей антенны горизонтальной плоскостью на высоте $Z = 400$ м от зеркала. Контурные показывают распределение интенсивности акустических волн (в относительных единицах) для каждого луча на этой плоскости. Расчет проводился с использованием ЭВМ путем суммирования звуковых полей, переизлучаемых каждым элементом, расположенным на раскрыве параболической антенны. Поэтому результаты расчета справедливы как в ближней, так и в дальней зоне. Центр графика ($X = 0, Y = 0$) соответствует проекции геометрической оси зеркала на рассматриваемую горизонтальную плоскость. Ось Y направлена вдоль линии, соединяющей передающую и приемную антенны.

Из рис.1 видно, что центры лучей образуют квадрат, стороны которого повернуты относительно координатных осей X, Y на угол, примерно равный 20 градусам. Такой поворот соответствует реальному расположению излучателей в фокальной плоскости антенны. Ширина лучей пропорциональна длине акустической волны и составляет примерно 15 м на частоте 737 Гц. Видно также, что на удалении 400 метров от зеркала центры лучей отклонены на 12 метров от геометрической оси зеркала. Как уже отмечалось, каждому лучу соответствует своя частота звука: первому лучу - 737 Гц (координаты центра $X = -11,6$ м, $Y = -3,9$ м), второму - 787 Гц ($X = 12$ м, $Y = -4$ м) и т.д. (по часовой стрелке).

В фокальной плоскости приемной антенны были также установлены четыре микрофона со смещением (относительно фокуса) на 14 см в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Это позволило сформировать четыре разделенных в пространстве луча приемной антенны. Величина смещения микрофонов (14 см) определялась геометрией эксперимента, при которой ось приемной антенны была направлена под углом около 45 градусов к горизонту и пересекала ось передающей антенны на высоте

Transmitter beams; Height=400+dH(m); dH=0;

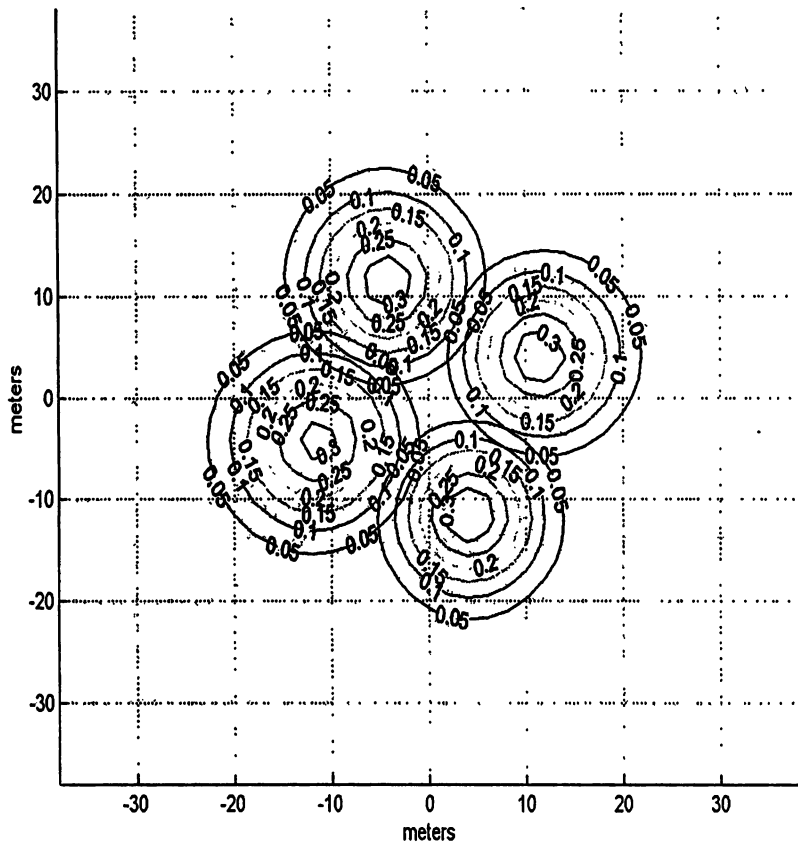


Рис.1

400м. При этом наклонная дальность для приемной антенны была примерно в 1,5 раза больше чем для передающей антенны. На рис.2 представлен контурный график сечения той же горизонтальной плоскостью (в пределах той же площадки) четырех лучей приемной антенны РТ-15 для частоты 737 Гц. Каждый луч антенны соответствует своему микрофону, соединенному с определенным каналом платы АЦП: первый луч ($X = -12$ м, $Y = -6$ м) соответствует первому каналу, второй луч ($X = -3$ м, $Y = 16$ м) - второму каналу и т.д. Основное отличие диаграмм на рис.1 и рис.2 (кроме очевидного расширения контуров на рис.2, связанного с большей удаленностью приемной антенны от точки пересечения осей антенн) состоит в том, что с изменением высоты горизонтальной плоскости, на которой рассматривается распределение интенсивности лучей, положение контуров этих лучей на плоскости изменяется. Изменения происходят вдоль оси Y , т.е. вдоль направления базы. Такое смещение контуров лучей объясняется их наклоном относительно горизонта. Для передающей антенны (рис.1), ориентированной в зенит, смещение контуров с изменением высоты плоскости весьма незначительно. В связи с этим максимальное совмещение лучей передатчика и приемника достигается (для разных пар лучей) на разных высотах. В действительности имеет место прием на каждый луч (микрофон) рассеянного сигнала из нескольких областей. Число таких областей зависит от взаимной ориентации лучей приемной и передающей антенн (от углов поворота лучей относительно оси параболоида). В оптимальном случае (когда лучи на рис.1 и 2 были бы расположены в углах прямоугольников, стороны которых параллельны осям координат) можно получить трехмерную матрицу из 8 рассеивающих объемов. При повороте лучей одной из антенн на 45 градусов вокруг оси антенны мы получили бы 6 рассеивающих объемов. В нашем эксперименте лучи как приемной, так и передающей антенн были повернуты на небольшой (около 20 градусов) угол по сравнению с оптимальным случаем 8-элементной матрицы.

Receiver beams; $F_a=737(\text{Hz})$; Height= $400+dH$ (m), $dH=0$;

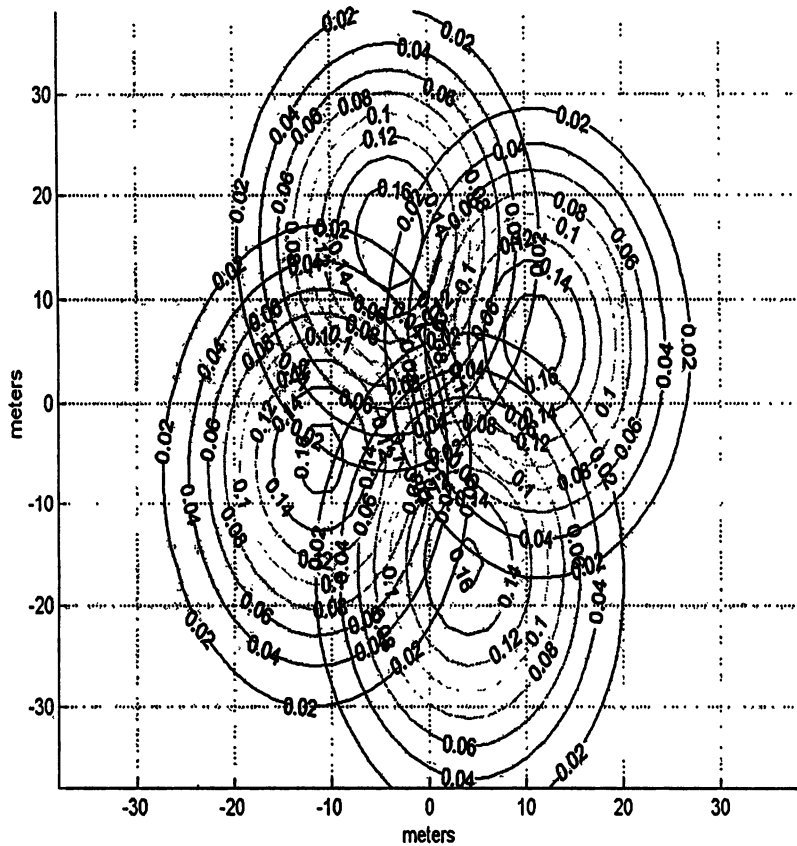


Рис.2

Далее следует определить области пересечения лучей в пространстве и коэффициенты взаимодействия лучей. Область пересечения лучей будем задавать высотой ее центра, где происходит максимальное взаимодействие рассматриваемой пары лучей (поскольку вертикальный размер для всех областей примерно одинаков и составляет около 30 метров). За коэффициент взаимодействия лучей будем принимать расчетную интенсивность сигнала (выраженную в децибеллах), принятого каждым микрофоном (приемным лучем) в результате рассеяния акустической волны в тонком слое максимального сближения лучей передатчика и приемника. Расчет проводился в предположении, что рассеивающие свойства среды одинаковы во всем объеме рассеяния. Как уже отмечалось выше, оптимальная высота, для которой коэффициент взаимодействия лучей будет максимальным, оказывается различной для различных пар (передающий - приемный) лучей. В качестве примера на рис.3(а,б,в,г) показано взаимное расположение (области пересечения) приемных лучей с первым лучем передающей антенны для оптимальных (для каждого приемного луча) высот взаимодействия. Коэффициент взаимодействия максимален для первых лучей приемной и передающей антенны (лучи пересекаются полностью, рис.3а) и уменьшается по мере взаимного удаления лучей (рис.3б,в,г). Полная матрица максимальных коэффициентов взаимодействия четырех лучей передающей антенны с четырьмя лучами приемной антенны (РТ-15) и соответствующие им оптимальные высоты взаимодействия, отсчитанные от уровня 400 м, приведена в таблице 1. Здесь за 0 дБ принят уровень максимального взаимодействия четвертого луча передающей антенны с четвертым лучом приемной антенны (оптимальная высота равна 396 м).

Таблица 1.

	737 Гц, луч 1	787 Гц, луч 2	837 Гц, луч 3	887 Гц, луч 4
Канал 1	-2,98 дБ, -2 м	-2,83 дБ, -16 м	-12,91 дБ, -10 м	-7,95 дБ, +4 м
Канал 2	-4,70 дБ, +20 м	-1,87 дБ, +4 м	-8,41 дБ, +12 м	-2,72 дБ, +28 м
Канал 3	-14,2 дБ, +8 м	-8,16 дБ, -6 м	-0,96 дБ, +2 м	-1,82 дБ, +18 м
Канал 4	-8,53 дБ, -12 м	-3,32 дБ, -26 м	-2,30 дБ, -20 м	0 дБ, -4 м

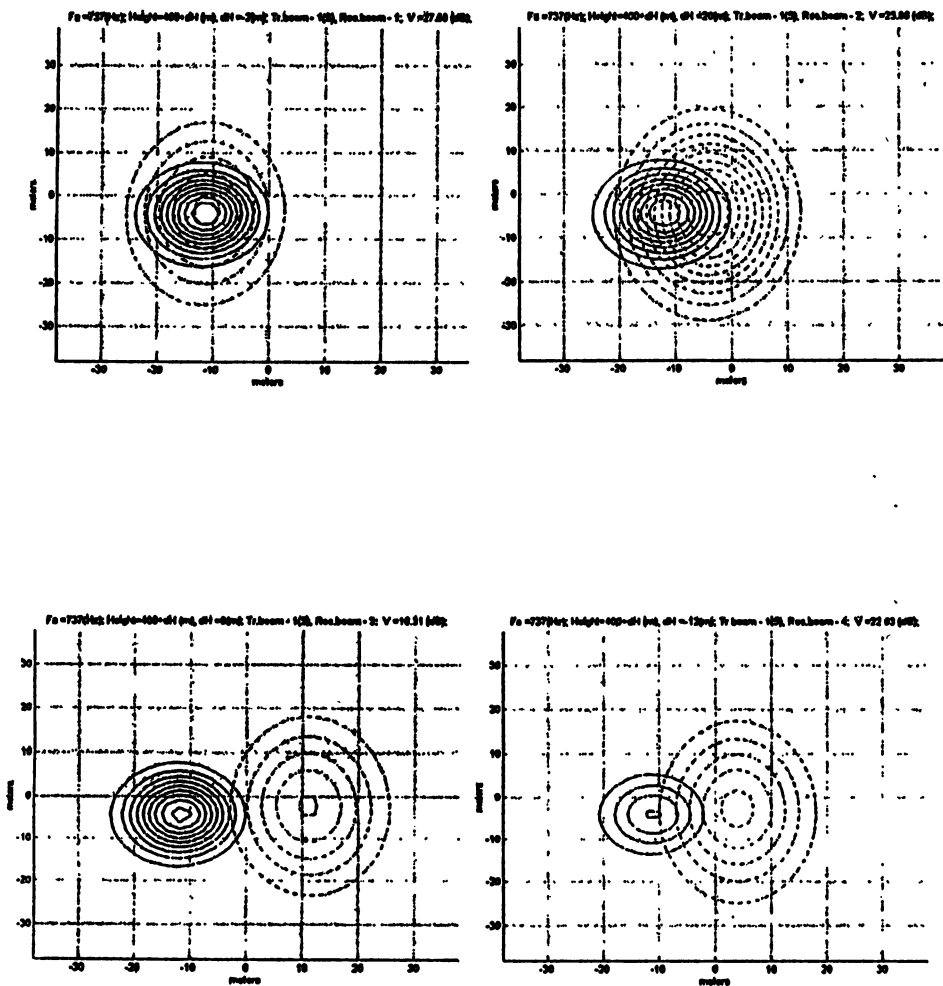


Рис.3

Как видно из приведенной таблицы 1, оптимальная высота взаимодействия (для разных пар лучей) изменяется от 374 до 428 метров.

В части сеансов осуществлялся прием рассеянного сигнала на две антенны: основную (РТ-15) и дополнительную параболическую антенну РТ-4 диаметром 4.5 метров, работавшую в двухлучевом режиме. В фокальной плоскости РТ-4 были установлены два микрофона, смещенные относительно фокуса на 14 см в разные стороны таким образом, чтобы сформировать два луча с разносом в вертикальной плоскости. Ось антенны была ориентирована под углом около 45 градусов к горизонту. На рис. 4 представлена расчетная диаграмма направленности (по мощности, частота 887 Гц) в виде контурного графика сечения лучей плоскостью, перпендикулярной геометрической оси этой антенны и удаленной от антенны на расстояние 565 метров. На рис 5 представлено взаимное пересечение верхнего луча РТ-4 с лучами передающей антенны в горизонтальной плоскости на высоте 460 м, а на рис. 6 - аналогичная картина для нижнего луча на высоте 352 метра. Размер области взаимодействия по вертикали здесь составляет около 90 м - для верхнего луча и около 65 м - для нижнего луча. В таблице 2 представлена полная матрица максимальных коэффициентов взаимодействия (в дБ) четырех лучей передающей антенны с обоими лучами приемной антенны (РТ-4) и соответствующие им оптимальные высоты взаимодействия, отсчитанные от уровня 400 м (здесь канал 5 - верхний луч, канал 6 - нижний луч). Так же, как и в таблице 1, за 0 дБ принят коэффициент взаимодействия четвертого луча передающей антенны с четверым лучом приемной антенны РТ-15.

Таблица 2.

	737 Гц, луч 1	787 Гц, луч 2	837 Гц, луч 3	887 Гц, луч 4
Канал 5	-8.0 дБ, +58 м	-6.2 дБ, +40 м	-5.8 дБ, +48 м	-4.7 дБ, +70 м
Канал 6	-7.5 дБ, -52 м	-5.8 дБ, -62 м	-5.3 дБ, -56 м	-4.2 дБ, -44 м

Как видно из табл.2 (и в отличие от данных табл. 1) коэффициенты взаимодействия для различных лучей передающей

Receiver beams; Antenna diameter $D=4.5(m)$; distans= $565m$; $Fa=887(Hz)$;

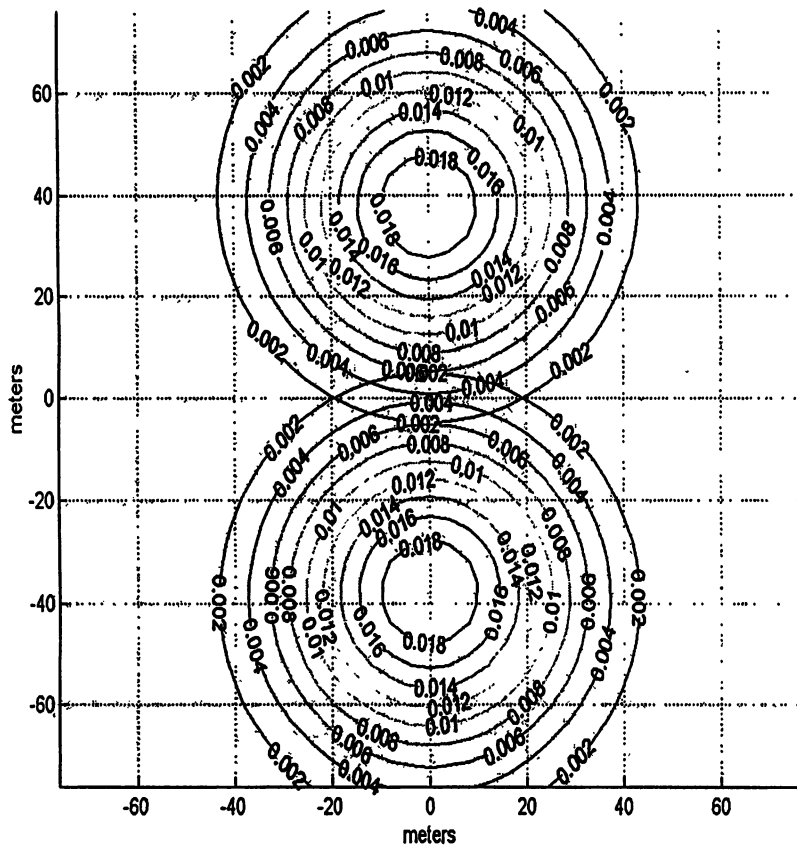


Рис.4

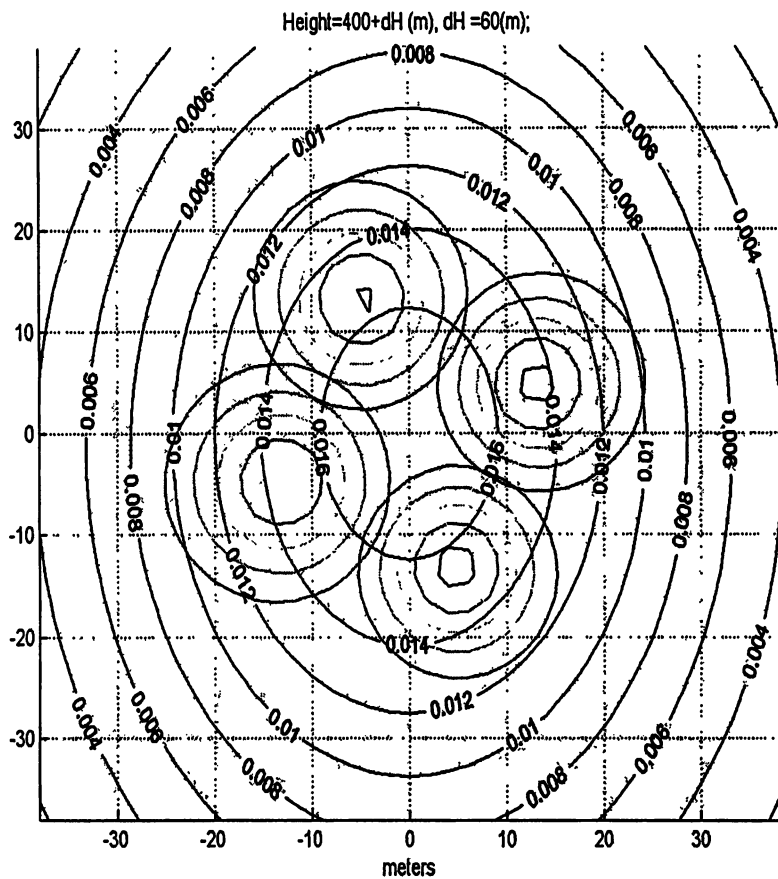


Рис.5

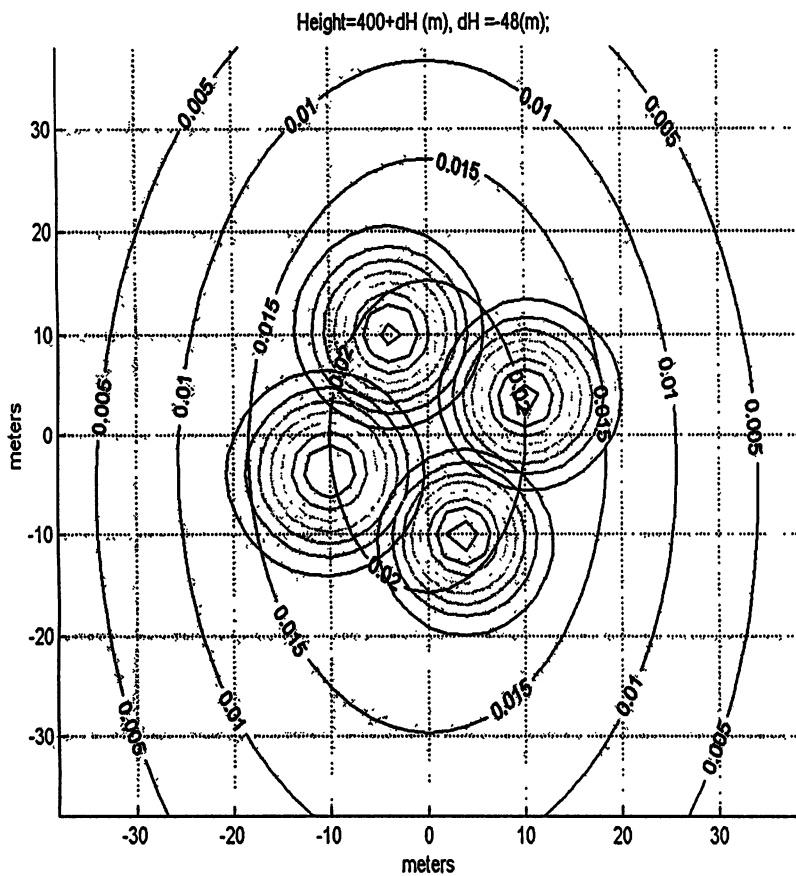


Рис.6

антенны и одним лучем РТ-4 отличается не более чем на 3.3 дБ. В то же время расположение всех восьми областей взаимодействия однозначно определено двумя приемными каналами и четырьмя частотами. Например, сигналам на каждой из четырех частот канала 5 соответствуют определенные объемы рассеяния, сечение которых горизонтальной плоскостью показано на рис.5. Такая четкость в положении рассеивающих объемов и почти одинаковые значения коэффициентов взаимодействия намного облегчают анализ экспериментальных данных для выявления различия параметров атмосферной турбулентности в соседних рассеивающих объемах. Приведенные выше расчеты справедливы в отсутствии рефракции акустических волн. В реальных условиях наиболее существенна ветровая рефракция. Составляющая ветра вдоль оси Y (вдоль базы) не влияет радикально на условия пересечения лучей, а вызывает лишь (при наличии высотного градиента скорости ветра) увеличение или уменьшение (в зависимости от направления ветра) высоты, на которой происходит пересечение. Именно эта составляющая скорости ветра (вдоль базы) и определяет величину доплеровского сдвига рассеянного сигнала. Составляющая ветра поперек базы смещает оба луча (передатчика и приемника) в поперечном (к базе) направлении. Однако лучи приемной антенны смещаются в большей степени из-за большего времени распространения (большей дальности). Разность времен для нашей геометрии эксперимента составляет примерно 0,5 с. Для средней (по высоте) скорости ветра 6 м/с центры лучей разойдутся на 3 м, что при ширине лучей приемного зеркала в области рассеяния около 20 м приведет лишь к незначительным изменениям эффективности взаимодействия лучей. Существенное нарушение геометрии пересечения лучей следует ожидать при средней скорости ветра около 30 м/с. Такой сильный ветер имеет место лишь в экстремальных условиях. Разумеется, для приемной антенны диаметром 4,5 м влияние ветра существенно уменьшается.

3. Результаты пробных экспериментов

В июле-августе 2000 г. была проведена серия экспериментов с помощью многолучевого бистатического содара. Как уже отмечалось, энергетический потенциал многолучевого содара несколько ниже, чем однолучевого. В отличие от экспериментов, проведенных ранее (в 1997 - 1998 гг.), в которых регистрация сигнала осуществлялась в узком (порядка 150 Гц) частотном диапазоне, в многолучевом многочастотном содаре сигнал регистрировался в более широкой полосе (от 300 герц до одного килогерца). Эксперименты проводились в дневное время. Следует отметить, что в этот период установилась относительно тихая погода: скорость ветра (вблизи земли) обычно не превышала 1-3 м/с. Такие метеоусловия не способствуют образованию значительных ветровых неоднородностей показателя преломления акустических волн, необходимых для их эффективного рассеяния. Тем не менее, в ряде сеансов были получены необходимые данные, демонстрирующие возможности многолучевого зондирования.

Алгоритм обработки сигнала на данном этапе существенно не отличался от алгоритма, разработанного ранее для однолучевого содара. Первичная обработка экспериментальных данных заключалась в проведении фурье-анализа (для каждого из приемных каналов), проводимого по временным выборкам длительностью по 1 - 2 секунде, взятым (из непрерывной записи) с периодичностью, равной периоду посылки зондирующих импульсов. Выборки брались с определенной задержкой по времени относительно переднего фронта мощного импульса, приходящего на приемную антенну непосредственно с передающей антенны. Фурье-анализ проводился в полосе частот 700 - 900 Гц, охватывающей все четыре рабочие частоты. На рис.7 представлены спектры (в яркостной записи) для каждого из четырех каналов приемной антенны РТ-15 для сеанса от 2 июля, время наблюдения (местное) 15:15 - 15:45. На каждом из представленных спектров по вертикальной оси отложена частота (большая

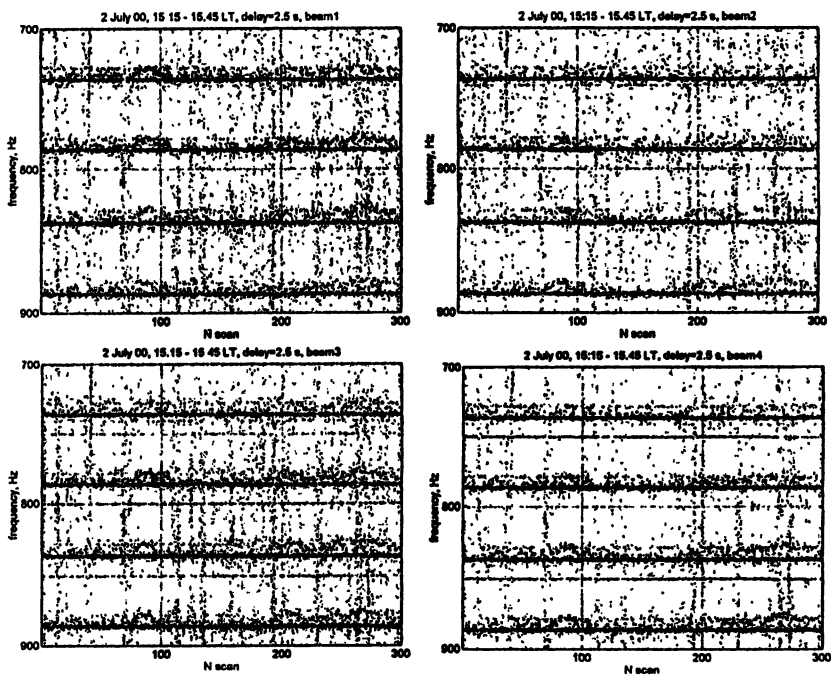


Рис.7

частота расположена ниже), а по горизонтальной оси отложено время от начала сеанса, задаваемое номером периода (скана). Каждый канал яркостной записи содержит 300 сканов в сеансе длительностью 30 минут. Четыре интенсивные линии на спектрах, расположенные на частотах зондирования (737, 787, 837 и 887 Гц), обусловлены сигналами, рассеянными местными (неподвижными) объектами и время прихода которых соответствует выбранной задержке. Выше (либо - ниже) этих линий видны менее интенсивные "линии", частота и интенсивность которых, как правило, не остаются постоянными. Эти "линии" обязаны сигналам, принимаемым за счет рассеяния зондирующих импульсов на движущихся неоднородностях турбулентного происхождения (ветровая турбулентность) и представляют для нас предмет исследования. Смещение частоты этих сигналов (относительно частоты зондирующих импульсов) имеет доплеровскую природу. На рисунке 8 приведены аналогичные результаты спектральной обработки сигналов для сеанса от 3 июля (13.30 - 14.00 местного времени). Длительность акустических импульсов для обоих приведенных сеансов составляла 2 с., период повторения импульсов - 6 с, временная задержка 2,5 с. Для четырехканальной приемной антенны амплитуды сигналов на четырех частотах образуют 16 - элементную матрицу, которую можно сопоставить с 16 - элементной матрицей коэффициентов взаимодействия лучей (таблица 1). Номера лучей приемной антенны соответствуют номерам каналов приведенных на рис. 7 и 8. К сожалению, номера лучей и частоты передающей антенны не были идентифицированы. Тем не менее, на наш взгляд, это не снижает ценности первого эксперимента. В приведенных примерах спектральной обработки наиболее отчетливо рассеянные сигналы проявляются на 1 приемном канале (рис.7, частоты 737, 787 и 837 Гц) и на 3 приемном канале (рис. 8, частоты 737, 787 и 837 Гц) в сеансах от 2 и 3 июля. В сеансе от 2 июля на 1 канале (вблизи скана 90) доплеровский сдвиг частоты сигнала составляет -9,6 Гц, что соответствует скорости ветра на высоте 400 м (в направлении базы) -5,7 м/с. На

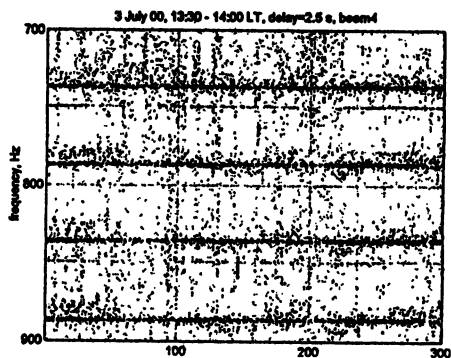
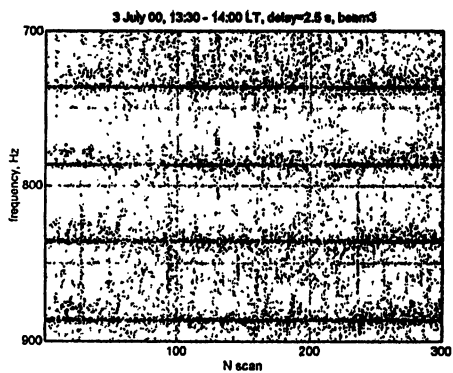
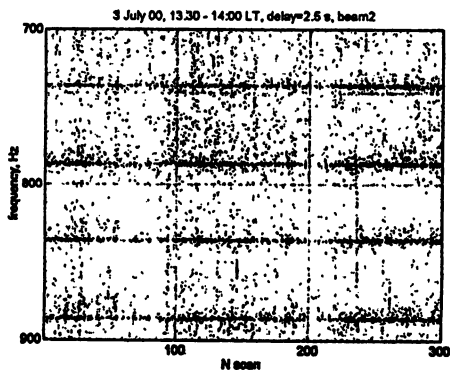
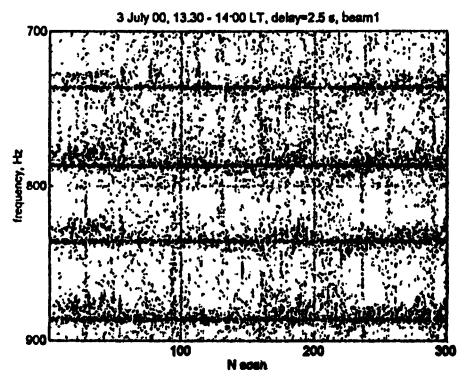


Рис.8

рис.9 приведен результат спектральной обработки для сеанса от 3 августа (12:00 -12:30 местного времени). В этот сеанс прием сигнала производился на две антенны (РТ-15 и РТ-4), период повторения импульсов составлял 5.5 с, длительность импульса - 1.5 с. Сравнение динамических спектров сигналов, принятых на обе антенны, приводит к неожиданным результатам. Прежде всего следует отметить, что на 4.5 метровом зеркале (РТ-4) уровень принятого рассеянного сигнала, по крайней мере, не меньше, чем для большого 15 - метрового зеркала. Этот результат противоречит расчетным данным, приведенным в табл.1 и 2. Согласно расчетам сигнал на 4.5 метровом зеркалом должен быть на 4 - 5 дБ меньше, чем на 15 - метровом. Этот экспериментальный факт может быть обусловлен несколькими причинами. Основными из них, как нам представляется, могут быть как недостаточная точность наводки большого зеркала на область рассеяния (ошибка не должна превышать 1 углового градуса), так и недостаточная жесткость обшивки зеркала РТ-15. Возможно также различие в уровнях шумов в местах расположения микрофонов, возникающих при обтекании ветром приемных зеркал. Динамика спектра рассеянного сигнала на 4.5 - метровом зеркале также несколько отличается от динамики спектра сигналов 15 - метрового зеркала. Особенно отчетливо видна разница в характере спектров в двух лучах малого зеркала (РТ-4), где записи существенно различаются в деталях. Это различие может быть естественным образом объяснено тем, что области рассеяния для верхнего и нижнего лучей РТ-4 находятся на разных высотах, где условия возникновения и развития турбулентности различны. Приведем оценку величины доплеровского сдвига частоты и скорости ветра по спектрам рис.9. Вблизи скана 180 доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала в течение примерно одной минуты изменился от - 2 до + 16 Гц. Это означает, что составляющая скорости ветра (в направлении базы) на высоте 400 м за одну минуту изменилась от - 1.2 м/с до + 9.3 м/с.

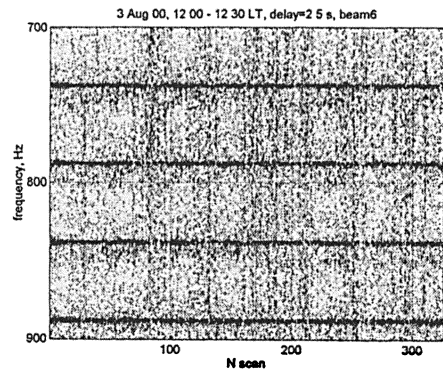
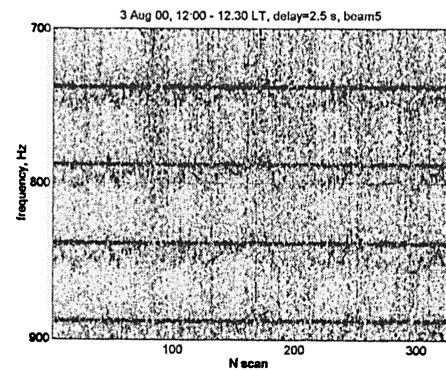
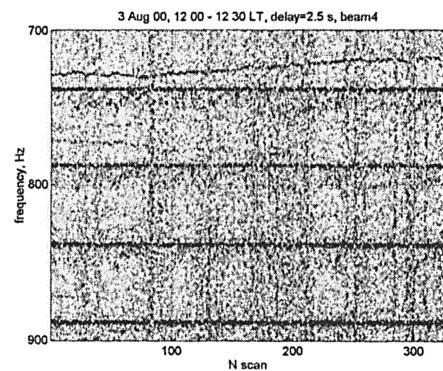
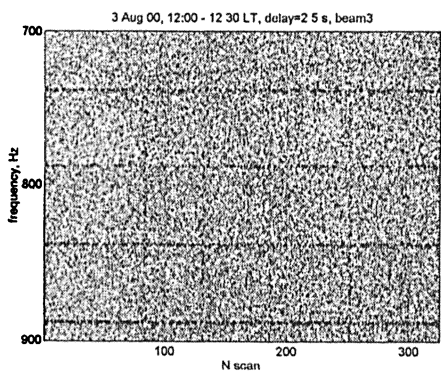
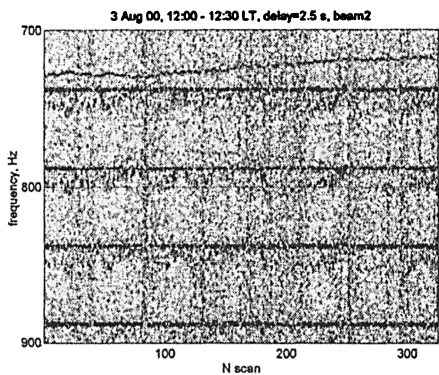
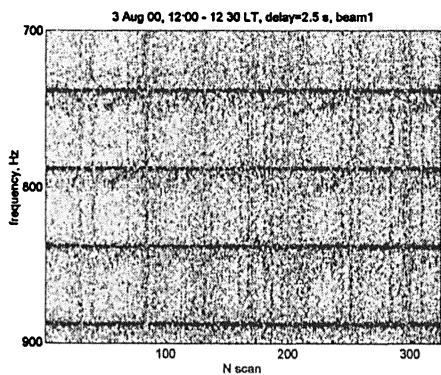


Рис.9

4. Заключение

Первые эксперименты подтвердили возможность исследования пространственно - временной структуры ветровых неоднородностей с использованием многолучевого многочастотного содара. Интересен результат совместного использования большой (РТ-15) и малой (РТ-4) приемных антенн, которые дополняют друг друга. В последующих экспериментах предполагается проведение более детального анализа данных и построение моделей турбулентной структуры ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 00-02-17372 и 00-02-31017).

1. В.О.Рапопорт, Н.А.Митяков, В.А.Зиничев, Ю.А.Сазонов. Исследование динамических процессов в тропосфере локационными методами. //Препринт 449, Нижний Новгород: НИРФИ, 1999.

MULTIBEAM BISTATIC SODAR

In 1997-1998 on one-beam bistatic sodar, created on the basis of two parabolic antennas with diameter of 15 meters, carried out investigation of a wind turbulence of an atmosphere. At one-beam bistatic sodar the scattered volume is determined by cross section of beams receiving and transmitting antennas. The received scattered from this volume acoustic waves have allowed to observe evolution in time of an atmospheric turbulence, and also to estimate quantity of structural parameter of a wind turbulence on two spatial scales (0.5 and 30 meters) in inertial interval. For examination of the spatial - time correlation of an atmospheric turbulence it is necessary to have the simultaneous data on a scattering of acoustic waves in several scattering volumes. For such measurements the authors have offered to use the new instrument - multibeam bistatic sodar. With this purpose the modernization one-beam bistatic sodar was carried out and the multibeam sodar was created. The summer of 2000 were carried out test observations with multibeam sodar, which demonstrate opportunities of the new instrument.