

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ
Федеральное государственное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиофизический институт»
(ФГНУ «НИРФИ»)

Препринт № 511

Результаты
радиоакустического зондирования мезосферы
с использованием комплекса «Сура-саунд»

Н.А.Митяков
В.А.Зиничев
Г.П.Комраков
В.О.Рапопорт
Н.А.Рыжов
Ю.А.Сазонов

Нижний Новгород
2007

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ МЕЗОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЛЕКСА «СУРА-САУНД»

Митяков Н.А., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Рапопорт В.О.,
Рыжов Н.А., Сазонов Ю.А.

// Препринт № 511. – Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ,
2007. – с.21.

УДК 534.231:533.9.08

В работе приводятся первые экспериментальные результаты радиоакустического зондирования мезосферы. Метод радиоакустического зондирования мезосферы базируется на брэгговском рассеянии радиоволн на неоднородностях электронной концентрации D- или E- слоя ионосферы, образованных бегущей акустической волной.

Эксперименты по радиоакустическому зондированию нижней ионосферы проводились на установке «Сура–саунд», созданной на базе ионосферного нагревного стенда «Сура» в 2002 – 2004 гг. недалеко от р/п Васильсурск. В экспериментах были зафиксированы сигналы радиоакустического зондирования с высот около 75 – 80 км.

© Научно-исследовательский радиофизический институт, 2007

Введение

В 2002 – 2004 гг. на основе стенда «Сура» был создан геофизический комплекс «Сура-саунд» для исследования тропосферы и мезосферы. Стенд «Сура» был дополнен мощным низкочастотным акустическим излучателем, работающим по принципу акустической сирены с рупором [1, 2]. Комбинация мощного радара нагревного ионосферного стенда и созданного акустического излучателя позволяет проводить исследование атмосферы методом радиоакустического зондирования декаметровыми волнами.

Метод радиоакустического зондирования хорошо известен и основан на резонансном (брегговском) рассеянии радиоволны на звуке [3]. Акустический излучатель генерирует звуковую волну. Сигнал радара рассеивается на периодических неоднородностях плотности воздуха акустической волны. При соблюдении пространственного синхронизма звука с падающей и рассеянной радиоволнами доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала равен частоте звуковой волны. Для случая обратного рассеяния соотношение частот радиоволны f и акустической волны F определяется равенством $\frac{c}{f} = \frac{2c_a}{F}$,

где c и c_a – скорости радио- и звуковой волн. Скорость звука зависит от температуры воздуха, поэтому брегговское рассеяние будет иметь место лишь при определенной частоте звука.

Акустические волны на частотах около 20 Гц распространяются практически без затухания до высоты около 75 – 80 км, т.е. до нижней ионосферы (мезосферы). Это позволяет создавать в нижней ионосфере возмущения электронной концентрации на частоте инфразвука и реализовать радиоакустическое зондирование мезосферы [4, 5].

1. Комплекс «Сура–саунд»

Комплекс «Сура–саунд» включает в себя диагностический радар, мощный излучатель акустических волн, датчики электрического и акустического полей, температуры и давления [2, 4].

Для радиозондирования может быть использован один из передатчиков стенда «Сура» – ПКВ-250 (мощность в импульсе 250 кВт, минимальная длительность импульса 50 мкс), либо широкополосный радиопередатчик «Бриг» (мощность в импульсе 1 кВт, минимальная длительностью импульса 3 мкс). Для излучения и приема сигналов радара используются отдельные секции антенной системы комплекса «Сура». В состав комплекса входит также система управления, регистрации и сбора экспериментальных данных, расположенная в павильоне передатчиков стенда. Система включает в себя ЭВМ для управления экспериментом и регистрации данных, ряд НЧ- и ВЧ генераторов, синхронизованных общим стандартом частоты.

Акустический излучатель может работать в диапазоне частот 16 – 23 Гц и обеспечивает выходную мощность (на основной гармонике) 500 – 800 Вт. Частота акустического излучателя перестраивается в пределах 16 – 23 Гц по заданной программе для того, чтобы удовлетворить условию синхронизма акустической и электромагнитной волн в среде, температуру которой нужно измерить.

Сбор данных проводится с помощью платы АЦП. Для обработки полученных экспериментальных данных используются специально разработанные программы на основе стандартного пакета MATLAB.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕЗОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА «СУРА–САУНД»

Митяков Николай Анатольевич
Зиничев Виталий Александрович
Комраков Георгий Петрович
Рапопорт Виктор Овсеевич
Рыжов Николай Александрович
Сазонов Юрий Александрович

Подписано в печать 26.12.2006 г. Формат 60 × 84/16
Бумага писчая. Объем 1,31 усл. п. л. Заказ 5564. Тираж 50.

Отпечатано в ФГНУ «НИРФИ».
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25

Список литературы

1. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Сазонов Ю.А., Рыжов Н.А. Система радиоакустического зондирования атмосферы на основе стенда "Сура"// Препринт № 467, НИРФИ, 2001. – 24 с.
2. Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Сазонов Ю.А., Рыжов Н.А. Результаты первых экспериментов с использованием комплекса «Сура-саунд»// Сб. докл. XXI Всероссийской науч. конф. "Распространение радиоволн" 25 – 27 мая 2005 г., 2005, т. 2, с. 237.
3. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985.
4. Rapoport V.O., Bespalov P.A., Mityakov N.A., Parrot M., Ryzhov N.A. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment// J. Atm. Solar-Terr. Phys., 2004, v. 66, N. 12, p. 1011.
5. Рапопорт В.О., Беспалов П.А., Митяков Н.А., Рыжов Н.А. Радиоакустический метод зондирования ионосферы. Препринт №503, НИРФИ, 2005. 10с.

В целом система «Сура-саунд» позволяет проводить следующие исследования:

- радиоакустическое зондирование тропосферы в целях дистанционного измерения температуры и исследования динамических процессов в тропосфере (диапазон высот 1 – 10 км);
- радиоакустическое зондирование мезосферы (диапазон высот 60 – 80 км);
- электроакустическое зондирование приземного слоя атмосферы;
- мониторинг температуры, давления и напряженности геоэлектрического поля в приземном слое атмосферы.

Летом 2005 и 2006 гг. с целью отработки методики эксперимента проводились сеансы радиоакустического зондирования тропосферы и мезосферы.

2. Результаты радиоакустического измерения параметров тропосферы

В сеансах радиоакустического зондирования тропосферы акустический излучатель работал импульсами длительностью 2 секунды с периодом повторения 15 – 20 с. Несущая частота акустического импульса оставалась неизменной в течение импульса, но изменялась (по заданной программе) к началу следующего импульса.

В качестве радара использовался передатчик «Бриг». Длительность импульса передатчика выбиралась равной 6 – 8 мкс, период повторения – от 20 до 70 мкс (в зависимости от высоты зондирования). Каждый раз на время излучения акустического импульса (2 с) радиопередатчик запирался.

В качестве передающей и приемной антенн радара использовались первая и третья секции антенны комплекса

«Сура». Геометрические размеры каждой секции составляют 100 x 300 м, расстояние между центрами этих секций – 200 м. С выхода третьей секции антенны принимаемый сигнал подавался на два выносных широкополосных антенных усилителя, включенных последовательно. Общее усиление антенных усилителей (с учетом потерь в соединительном кабеле) составляло около 20 дБ.

Основное усиление, преобразование и селекция принимаемого сигнала осуществлялось радиоприемным устройством «Катран» (P399A) с минимальной полосой пропускания 0.3 кГц. Для увеличения развязки между трактами передатчика и приемника применялось разделенное во времени стробирование сигналов передатчика и приемника. Для последующей обработки использовался сигнал с выхода ПЧ-2 приемника (номинальная частота 215 кГц). Сигнал с выхода ПЧ-2 подавался на внешний смеситель. Частота внешнего гетеродина выбиралась ниже частоты ПЧ-2 приемника на 50 или на 185 Гц. Вся аппаратура комплекса работала от одного общего синхронизирующего устройства (синхрометр Ч7-15). Преобразованный внешним смесителем низкочастотный сигнал поступал на плату АЦП для регистрации. Оцифровка данных производилась с частотой 1600 отсчетов в секунду.

На рис. 1а и 1б приведен пример спектральной обработки записи сигнала сеанса от 26 июня 2005 г. Продолжительность записи, представленной на рис. 1, составляет 18 с. Длительность одной выборки для спектрального анализа составляет 4 с, что обеспечивает частотное разрешение 0.25 Гц. На этих рисунках по горизонтальной оси приведена разность частоты сигнала и частоты передатчика в герцах. Рис. 1а соответствует отрицательным значениям сдвига частоты, рис. 1б – положительным.

На этих рисунках смещенные по вертикальной оси спектры соответствуют последовательным выборкам, отстоящим друг от

Для надежной работы системы необходимо заметно (на 15 – 20 дБ) повысить чувствительность приемной аппаратуры. Это, однако, сталкивается с трудностями, обусловленными как импульсной работой радара и помехами от радиостанций в диапазоне 9 МГц, так и ограниченным динамическим диапазоном используемых радиоприемников. Не исключено, что сильный сигнал, рассеянный естественными неоднородностями мезосферы также может давать вклад в шумовую составляющую приемного тракта на частотах, превышающих 7 – 20 Гц.

Потенциал системы можно увеличить, существенно увеличив мощность акустического излучателя комплекса «Сура-саунд» за счет его реконструкции, либо, например созданием системы из 4-х (и более) излучателей, аналогичных действующему. Последнее позволит в 16 (или более) раз увеличить эффективную мощность излучения звука в зенитном направлении. Кроме того, диаграмма направленности акустического излучателя в этом случае будет более согласована с диаграммой направленности радара.

В целом, результаты радиоакустического зондирования атмосферы с использованием геофизического комплекса «Сура-саунд» показывают принципиальную возможность использования комплекса для исследования динамики атмосферы и мезосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 04-02-16612.

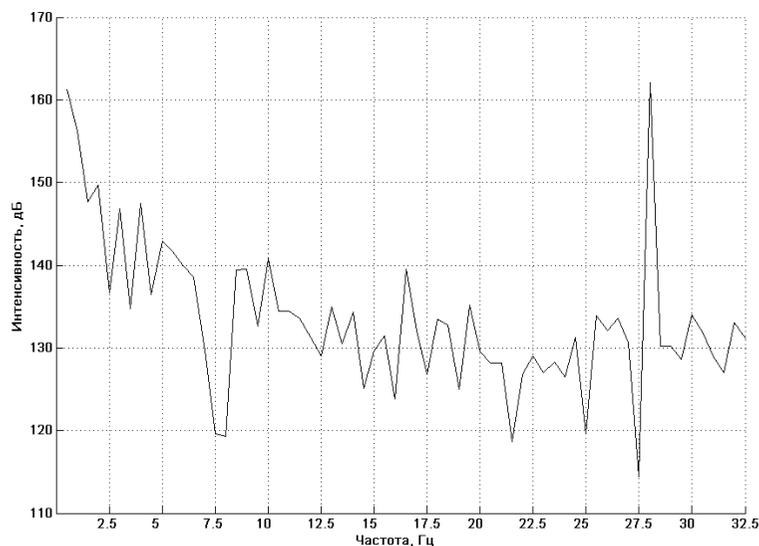


Рис. 6

Заключение

Впервые получены надежные данные радиоакустического зондирования мезосферы. В дневные часы в интервале высот 75 – 85 км измеренные значения температуры атмосферы находятся в пределах 180 – 205 К.

Максимальная величина радиосигнала, рассеянного акустической решеткой в мезосфере, составляет около 0.1 мкВ, что достаточно хорошо согласуется с оценками ожидаемого сигнала – 0.4 мкВ, но лишь на 5 дБ превышает уровень шума (0.05 мкВ). Рассеянные сигналы в сеансах радиоакустического зондирования редки, ввиду того, что уровень шума в полосе 0.5 Гц в данном диапазоне частот составляет 0.05 мкВ, что примерно на 14 дБ превышает шумы космического радиоизлучения с температурой $T = 2 \cdot 10^5$ К.

друга по времени на 1 с. Первый (нижний) спектр соответствует моменту времени, когда передний фронт звуковой волны доходит до высоты 2.0 км, верхний – соответствует высоте 5.4 км. Частота звуковой волны была равна 19.26 Гц (на рисунке положение этой частоты обозначено тонкой вертикальной линией). На рис. 1а видно, что на 7-м и 8-м спектрах появляется спектральная линия на частоте звукового сигнала. Следует обратить внимание, что на рис. 1б аналогичный сигнал (с положительным сдвигом частоты) отсутствует. Напомним, что при радиоакустическом зондировании частота рассеянного сигнала ниже несущей частоты передатчика. 7-ой и 8-ой спектры на рисунках соответствуют моментам времени, когда передний фронт звуковой волны достигает высоты 4.0 – 4.3 км. Значение частоты радиоакустического сигнала позволяет определить скорость звука в области рассеяния и, следовательно, – температуру тропосферы на указанной высоте. Для рассматриваемого случая температура в области рассеяния (на высотах 4.0 – 4.3 км) составляла -12°C . Сильная спектральная линия на частоте ~ 32 Гц на рис. 1а принадлежит контрольному сигналу. Этот сигнал излучался через вторую секцию антенны комплекса от отдельного генератора для проверки всего приемного тракта и калибровки уровня полезного сигнала.

Точность измерения температуры $\frac{\delta T}{T} = \frac{2\delta F}{F}$

определяется ошибкой измерения частоты линии сигнала δF . Для приведенного примера ширина линии равна $\delta F = 0.25$ Гц, что соответствует погрешности измерения температуры около 6 град. Более точные измерения можно получить при использовании фазовых методов, однако для этого необходимо иметь отношение сигнала к шуму не менее 15 – 20 дБ в полосе порядка 5 – 10 Гц.

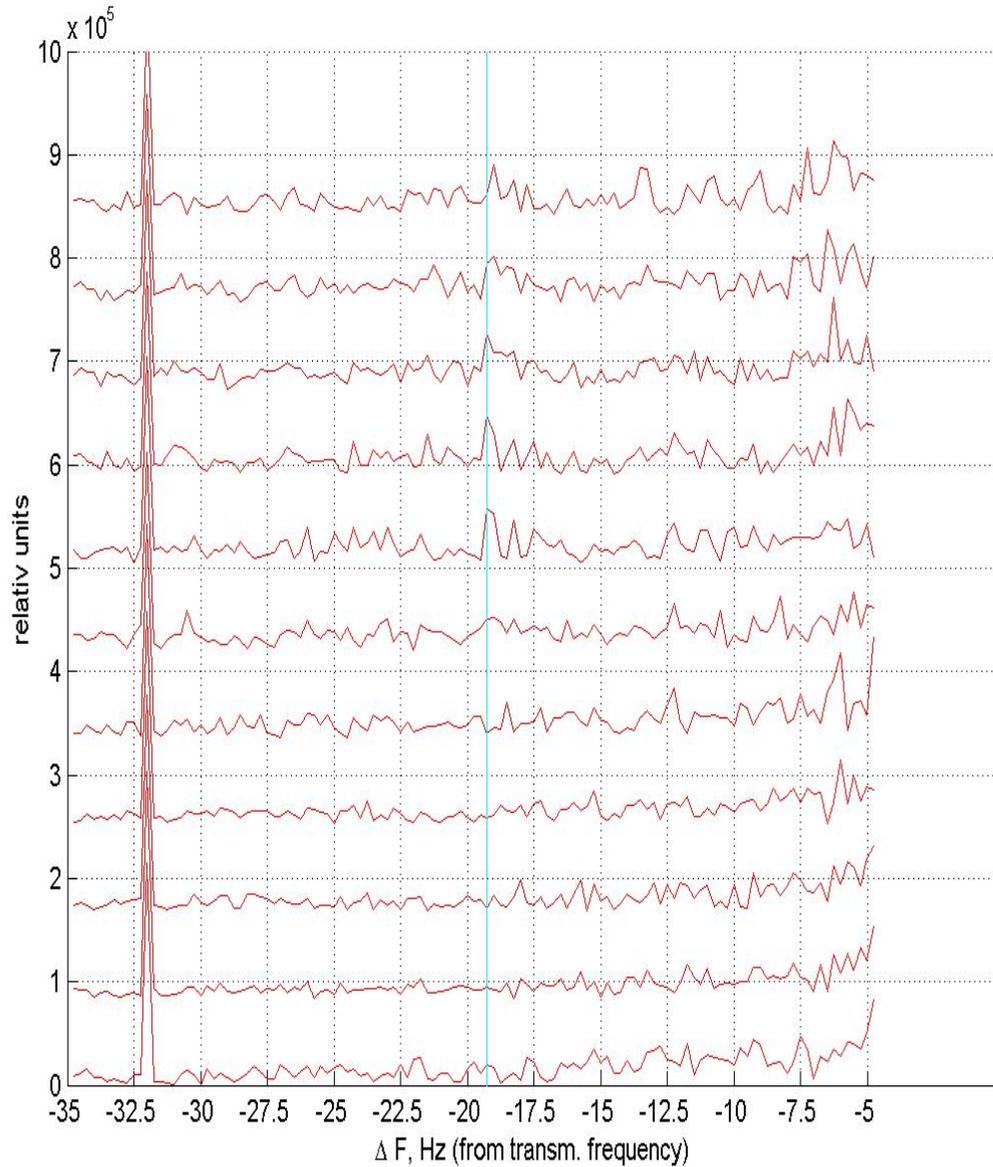


Рис. 1а.

На рис. 5 представлена спектрограмма, аналогичная спектрограмме на рис. 4б, но относящаяся к 8-й минуте этого же цикла. На этой спектрограмме также присутствует хорошо выраженная линия на частоте 17 Гц.

Наконец, на рис. 6 представлена спектрограмма, относящаяся к 6-й минуте следующего (4-го) цикла сеанса 26 сентября 2006 г. Здесь имеется линия на частоте 16.5 Гц. Эта частота также хорошо соотносится с акустической частотой и соответствует задержке 5 мин (см. рис. 2). Частота 16.5 Гц определяет величину температуры области мезосферы 187 ± 6 К. Некоторая разница в температурах, определенных по данным рис. 4 и 5, может быть связана с различной высотой области, ответственной за рассеяние сигнала радара.

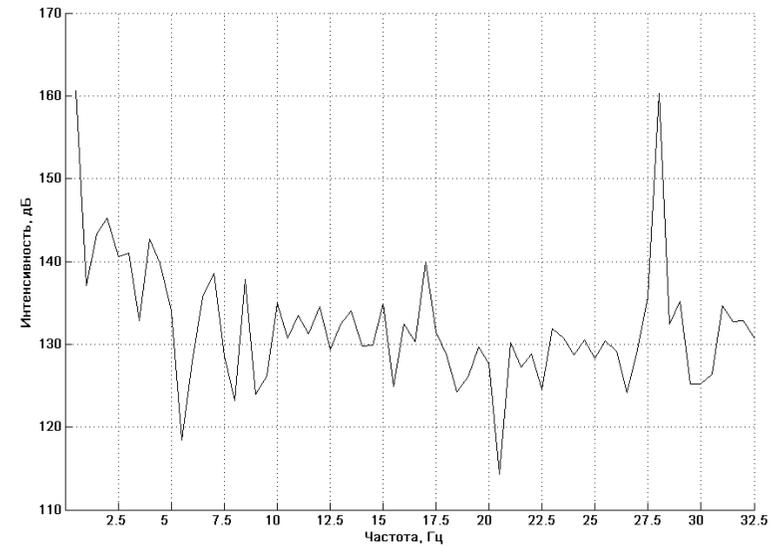


Рис. 5

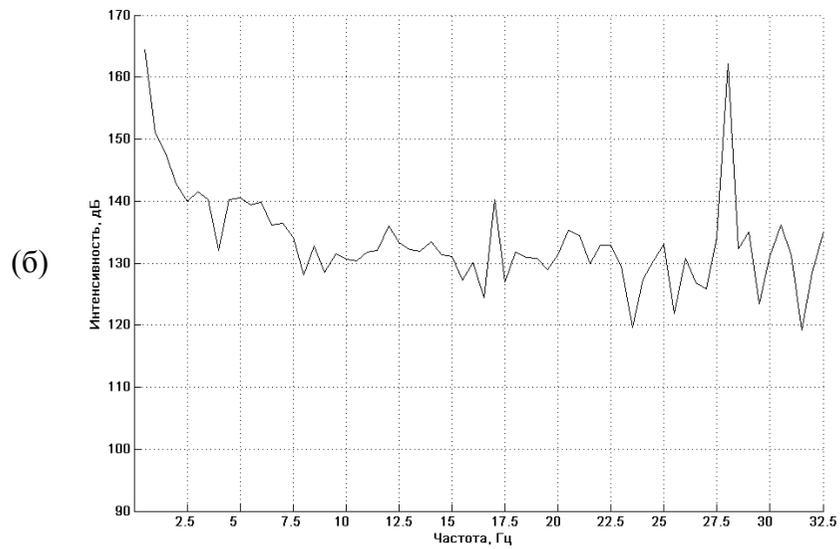
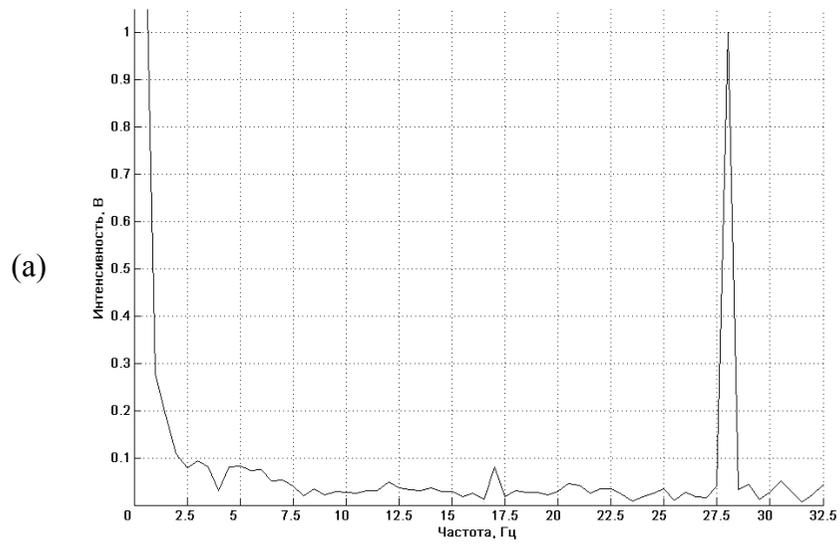


Рис. 4

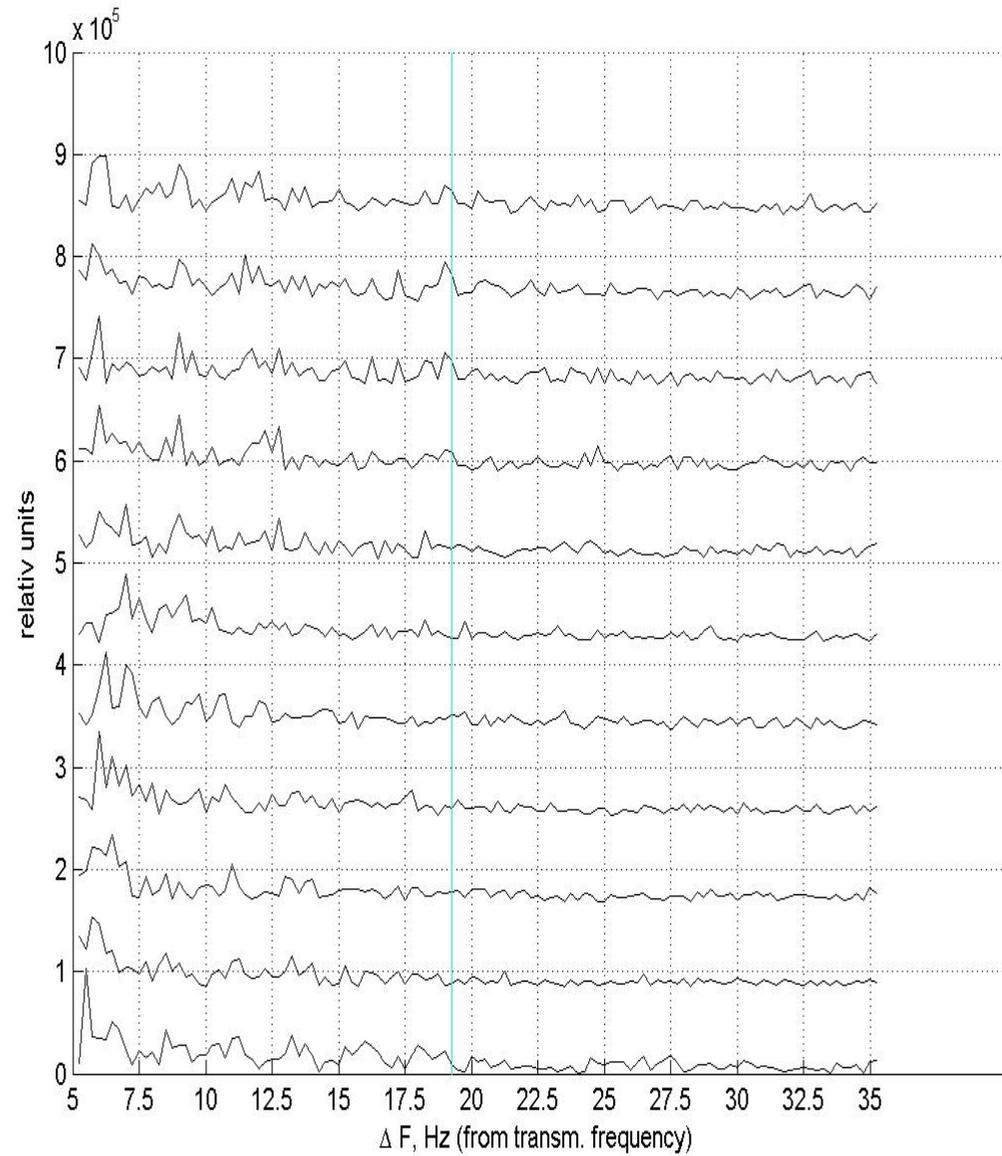


Рис. 16.

3. Радиоакустическое зондирование мезосферы

Как уже отмечалось выше, декаметровые системы РАЗ могут быть использованы для исследования мезосферы на высотах, где поглощение звука из-за вязкости невелико, а обратное рассеяние радиоволн определяется квазипериодической решеткой плазмы [4, 5]. Коэффициент отражения радиоволн от неоднородностей плазмы на много порядков больше, чем от неоднородностей нейтральной атмосферы. Оценки показывают, что интенсивность сигнала, рассеянного плазменной решеткой, образованной звуковой волной в мезосфере, достаточна для того, чтобы исследовать возможности нового метода диагностики ионосферы, основанного на радиоакустическом зондировании [5]. В ионосфере будет распространяться волна плотности плазмы, повторяющая акустическую волну. Относительная амплитуда периодической решетки плазмы равна числу Маха в звуковой волне. Именно поэтому метод радиоакустического зондирования ионосферы полностью сохраняет возможности радиоакустического зондирования тропосферы. С его помощью можно получать профили температуры и исследовать динамику вертикальных движений в мезосфере. Дополнительно метод радиоакустического зондирования мезосферы позволяет измерить плотность нейтральных частиц по затуханию звука и определить профиль электронной концентрации в мезосфере по величине рассеянного сигнала на разных высотах [5].

В работе [5] приведены оценки ожидаемой величины радиосигнала, рассеянного квазиплоской акустической волной на высотах около 80 км. В [5] принято, что концентрация электронов на высоте 80 км равна 10^3 см^{-3} , характерная длина синхронизма составляет 300 м. При использовании передатчика «Бриг» мощностью 1 кВт рассеянный сигнал на выходе антенны согласно оценкам составит $2.5 \cdot 10^{-8} \text{ В}$. Напомним, что эти

передатчика 400 посылок в секунду), частотное разрешение – 0.5 Гц. На приведенных спектрограммах область частот от 0 до 7 Гц соответствует сигналу, рассеянному на естественных неоднородностях мезосферы. Интенсивность этого сигнала резко возрастает вблизи нулевой расстройки. Не исключено, что такой сильный сигнал может давать вклад в шумовую составляющую приемного тракта на частотах, превышающих 7–20 Гц. Спектральная линия на частоте 28 Гц соответствует специально введенному в приемную антенну контрольному сигналу, частота которого была на 28 Гц ниже частоты передатчика, а амплитуда составляла 1 мкВ. На спектрограмме, представленной рис. 4а, хорошо видна линия на частоте 17 Гц, которая может быть отождествлена с сигналом, рассеянным на звуковой решетке в области мезосферы. На рис. 4б представлена эта же спектрограмма в полулогарифмическом масштабе. Из рис. 4а, 4б видно, что величина рассеянного сигнала меньше величины контрольного сигнала на 20 – 22 дБ, т.е. не превышает 0.1 мкВ, и всего лишь на 5 дБ превышает уровень шума. Температура в области мезосферы определяется частотой передатчика и звуковой волны. Для частоты радиопередатчика 9.02 МГц и частоты звука $17 \pm 0,25 \text{ Гц}$ значение температуры составляет $199 \pm 6 \text{ К}$.

При длительности радиоимпульса 300 мкс мы не можем с достаточной точностью указать высоту рассеивающего слоя. Однако временная задержка импульса, соответствующая времени прохождения звуковым цугом области высот от поверхности земли до высоты рассеяния, для случая рис. 4 составляет около 5 мин, что соответствует высотам 75–80 км. (Спектрограммы рис. 4 относятся к 5–7 с шестой минуты цикла, а частоты рассеянного сигнала на шестой минуте должны соотноситься с зондирующей акустической частотой первой минуты работы акустического излучателя (в цикле).)

сигналу передатчика, наведенному непосредственно на приемную антенну. Отсчеты с 26 по 134 относятся к открытому состоянию тракта приемника, в течение которого возможен прием сигналов с антенны. На приведенном рисунке в интервалах отсчетов 40 ÷ 60 и 100 ÷ 130, что соответствует высотам 100 ÷ 150 и 250 ÷ 350 км соответственно, видны следы сильного сигнала, рассеянного естественными неоднородностями в E- и F- областях ионосферы.

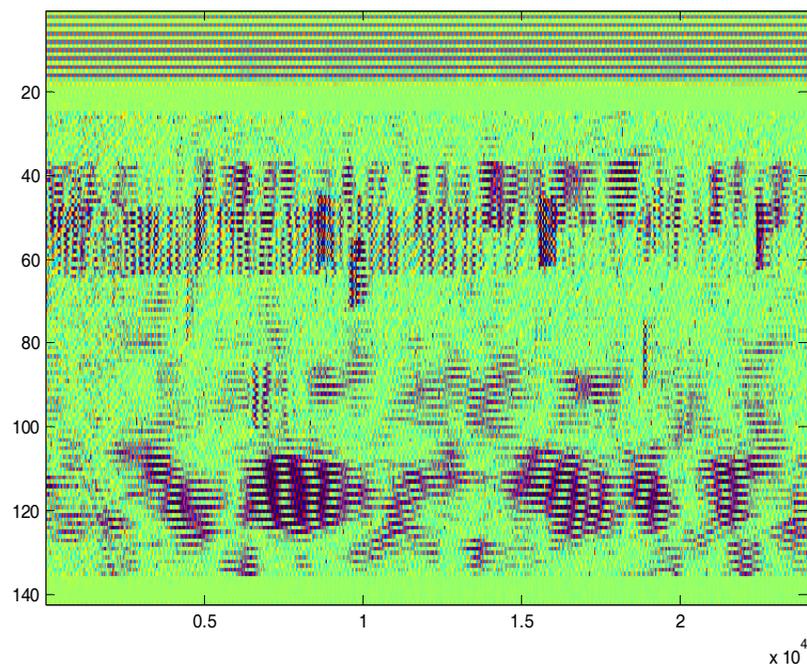


Рис. 3.

На рис. 4 – 6 приведены образцы спектров, относящихся к сеансу от 26 сентября 2006 г. Длительность выборки для спектрального анализа в каждом случае составляла 2 с или 800 тактовых периодов передатчика (при тактовой частоте

оценки приведены для квазиплоского фронта акустической волны без учета влияния турбулентности на её распространение.

Для зондирования мезосферы (область высот 70 – 80 км) длительность импульса передатчика была увеличена до 300 мкс, а период посылки импульсов – до 2500 мкс. При таких длительностях импульса для зондирования появляется возможность использовать мощный радиопередатчик комплекса «Сура» с импульсной мощностью 250 кВт и средней мощностью 26 кВт. Ожидаемая амплитуда рассеянного сигнала в этом случае должна составлять $4 \cdot 10^{-7}$ В.

При зондировании мезосферы мы применяли радиоприемное устройство Р-155 («Брусника») с полосой пропускания 30 кГц. Поскольку, в отличие от режима тропосферного зондирования, где используются короткие радиоимпульсы с высокой частотой посылок, при зондировании мезосферы используются импульсы длительностью 300 мкс, то к моменту прихода следующего импульса все переходные процессы в приемнике заканчиваются и сигнал принимается практически без искажения.

Приемник был расстроен относительно частоты передатчика на -200 Гц и частота сигнала передатчика в канале ПЧ-2 составляла 127.8 кГц (номинальная частота ПЧ-2 при точной настройке приемника равна 128 кГц). Частота оцифровки данных платой АЦП была равна 56800 отсчетов в секунду. Таким образом, преобразованная частота на выходе платы АЦП составляла 14.2 кГц, т.е. на каждый период преобразованного сигнала приходилось ровно 4 отсчета. При этом за время между соседними импульсами передатчика имело место целое число отсчетов (71 или 142 отсчета при длительности периода повторения импульсов передатчика 1250 или 2500 мкс

соответственно). Это обстоятельство существенным образом облегчает последующую обработку записи.

Для обработки вся последовательность данных группировалась в циклы длительностью в один период повторения (71 или 142 отсчета). Эти циклы обладали тем свойством, что первые 17 отсчетов в каждом цикле относились к записи сигнала передатчика (при длительности импульса передатчика 300 мкс), тогда как в отсчетах с 28 по 43 (с учетом временной задержки) мог присутствовать рассеянный сигнал с мезосферных высот. При цифровой обработке мы в каждом цикле перемножали данные отсчетов со 2-го по 17-й соответственно на отсчеты с 28 по 43 с последующим усреднением полученных данных. Эта операция аналогична синхронному детектированию с последующей фильтрацией низкочастотной составляющей. Полученный таким образом низкочастотный сигнал подвергался спектральной обработке.

4. Результаты радиоакустического зондирования мезосферы

В экспериментах проводившихся в сентябре 2006 года для радиоакустического зондирования мезосферы использовался радиопередатчик ПКВ-250, работавший на несущей частоте 9.02 МГц. Длительность импульса передатчика составляла 300 мкс, период повторения импульсов – 2500 мкс. Акустический излучатель работал в непрерывном режиме с линейной частотной модуляцией: интервал излучаемых частот – от 15.8 до 18.3 Гц проходил за 1 минуту, в последующую минуту частота изменялась в обратном направлении. Временная последовательность излучаемой акустической частоты представлена на рис. 2. Примерное время прохождения акустическим цугом области высот от поверхности земли до мезосферы составляет около 5 мин. Каждый сеанс

радиоакустического зондирования мезосферы состоял из нескольких (от 3 до 5) циклов длительностью по 10 мин. В каждом цикле акустический излучатель и радар работали поочередно – из 10 мин цикла первые 5 мин работал акустический излучатель, а в последующие 5 мин производилось радиозондирование.

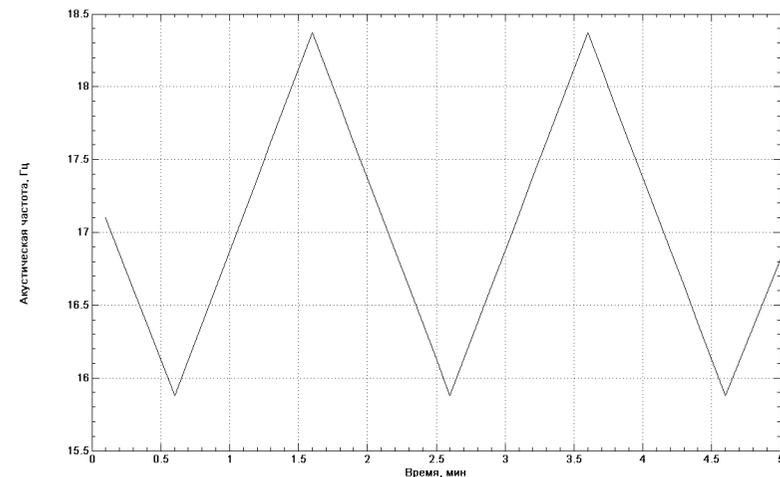


Рис. 2

На рис. 3 приведен пример яркостной записи интенсивности принятого сигнала в зависимости от высоты и времени. Высота отложена по вертикальной оси и градуирована в последовательных отсчетах при оцифровке данных через каждые 17.6 мкс. Числа 20, 40, 60, 80 на вертикальной оси соответствуют высотам 52.8, 105.6, 158.5, 211.3 км и т.д. Ось времени (горизонтальная ось) градуирована в тактовых периодах повторения импульса передатчика; длительность периода 2500 мкс. Длительность записи на рис. 3 составляет 60 с. Каждый раз первые 17 отсчетов (в направлении сверху вниз) относятся к