

В.А. Зиничев, В.О. Рапопорт, В.Ю. Трахтенгерц,
А.Л. Фабрикант, Ю.Г. Федосеев

РАДИОАКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ В КОРОТКОВОЛНОВОМ РАДИОДИАПАЗОНЕ

Показана принципиальная возможность радиоакустического зондирования тропосферы и нижней стратосферы при использовании низкочастотного звука и радиоволн декаметрового диапазона. Создан экспериментальный макет системы радиоакустического зондирования в указанном диапазоне, основу которого составляет антенная решетка из пяти монополюсных акустических излучателей с частотой 41 Гц и общей мощностью ≈ 200 Вт, а также радиолокатор на частоте ≈ 19 МГц с коэффициентом усиления антенны $G \sim 10$ и средней мощностью ≈ 100 Вт. При условиях, близких к штительным, отраженный сигнал превышает уровень шумов для высот $\sim 1-2$ км. Проведена оценка параметров полномасштабной радиоакустической установки, способной зондировать нижнюю стратосферу при условии компенсации ветрового сноса.

1. До настоящего времени существующие установки радиоакустического зондирования (РАЗ) работали, главным образом, в диапазоне дециметровых длин волн и допускали измерение профиля температуры до высот 1–3 км [1]. Представляет интерес изучение путей дальнейшего развития метода РАЗ, позволяющих существенно увеличить его дальность [2]. Возможность использования РАЗ для исследования всей толщи тропосферы чрезвычайно привлекательна, так как при этом значительно расширяется круг доступных для исследования задач. К ним относятся, например, различные проблемы динамики мезомасштабных структур в тропосфере: конвективных ячеек, облаков, гроз, а также строения и динамики фронтов, ядер, циклонов и т.д. Заметим, что радиоакустический метод мог бы дать информацию о поле температуры внутри таких объектов, как грозовые облака или смерчи, где затруднены контактные методы. В стратосфере наиболее интересным и возможным приложением метода РАЗ является исследование внутренних гравитационных волн, излучаемых при различных тропосферных процессах и переносящих энергию и импульс в верхние слои атмосферы. Задача настоящей статьи — оценить принципиальные и технические возможности создания систем стратосферно-тропосферного РАЗ (СТРАЗ).

2. В основе метода РАЗ лежит эффект резонансного (брэгговского) рассеяния радиоволн на периодических колебаниях диэлектрической проницаемости в поле звуковой волны. Распространяющийся акустический волновой пакет играет роль движущегося сферического «зеркала», фокусирующего отраженный радиосигнал на приемной антенне. Доплеровский сдвиг частоты отраженной радиоволны позволяет определить локальную скорость звука.

В реальных условиях принимаемый радиосигнал может значительно уменьшаться под действием различных факторов [1]. Среди них следует выделить два основных эффекта, ограничивающих дальность существующих установок РАЗ:

а) Ветровой снос акустического «зеркала». Этот эффект можно компенсировать за счет использования подвижной звуковой или радиоантенны, либо с помощью сети из нескольких стационарных антенн. Более эффективным, однако, представляется другой способ компенсации, основанный на использовании наклонного зондирования и поиске отраженного сигнала по углам [3]. В этом способе используется вертикальный градиент скорости ветра, приводящий к повороту смещенного ветром акустического «зеркала», которое при определенных условиях оказывается направленным на приемную антенну. Такой способ компенсации возможен лишь при использовании полноповоротных антенн.

б) Турбулентные искажения фазы звуковой волны, приводящие к разбиению акустического «зеркала» на некоррелированные участки. Отраженные от этих участков радиосигналы складываются некогерентно. Эти искажения определяют максимальную дальность РАЗ. На рисунке приведена теоретическая зависимость (см. [1]) максимальной дальности r_m от параметра

$$\Pi = \lambda_a^{2.4} [\bar{P}_e W_a / (\Theta_e \Theta_a)^2] \cdot [\rho(r_m) / \rho(0)],$$

где \bar{P}_e — средняя мощность излучаемого радиосигнала (при заданном уровне шумов приемника); W_a — мощность звукового импульса; Θ_e и Θ_a — ширина диаграмм направленности соответственно радио- и акустической антенн; λ_a — длина звуковой волны; $\rho(r)$ — вертикальный профиль плотности воздуха в атмосфере. На рисунке отмечены также известные по литературе реализации системы РАЗ [1, 4].

Из приведенной формулы следует, что для увеличения высоты зондирования необходимо, в первую очередь, увеличивать длину волны при узкой диаграмме направленности и достаточно большой мощности. Таким образом, реализация СТРАЗ требует перехода в КВ радиодиапазон.

Однако на частотах < 20 МГц существенно возрастает уровень радишумов. Помехи от радиовещания и КВ-связи значительно уменьшаются при $f > 25$ МГц. В то же время, увеличение частоты звука приводит к росту диссипации. Звук с частотой 60 Гц слабо диссипирует до высот ~ 30 км.

В результате оптимальными представляются следующие частоты: $f_a = 60$ Гц ($\lambda_a = 5$ м); $f_e = 30$ МГц ($\lambda_e = 10$ м).

Для формирования достаточно узких лучей как радио-, так и акустическая антенны должны представлять собой решетки сфазированных излучателей. По-видимому, реально возможное число фазуемых элементарных излучателей составляет $\lesssim 100$. Расположенные на расстояниях $\lesssim \lambda$ друг от друга, они формируют диаграмму направленности шириной $\sim 7^\circ$.

Мощность звука ограничивается нелинейными эффектами, приводящими к образованию ударных волн. При $\Theta_a = 7^\circ$ разрыв в звуковой волне образуется на высоте ≈ 20 км, если $W_a = 5$ кВт.

При $\bar{P}_e = 2,5$ кВт система СТРАЗ с приведенными выше параметрами имеет потенциал, достаточный для зондирования до высот ~ 20 км (см. рисунок) и может быть реализована при наличии:

– приемопередающей радиоантенны (при моностатической схеме), состоящей из ~ 100 сфазированных слабонаправленных элементов, формирующих луч шириной $\approx 7^\circ$. Средняя мощность, излучаемая каждым элементом, должна быть $\gtrsim 50$ Вт.

– сфазированной решетки из ~ 100 монополярных акустических излучателей мощностью $\gtrsim 100$ Вт каждый.

Подчеркнем, что регулярное проведение РАЗ требует компенсации ветрового сноса. Для этого антенны должны быть полноповоротными и допускать возможность быстрого поиска по углу места и азимуту, т. е. необходимо электронное управление лучом. Другие способы: поле излучателей (размером $3 \text{ км} \times 3 \text{ км}$), либо передвижные антенны – вряд ли могут быть реализованы в КВ диапазоне.

4. Строительство полномасштабной системы СТРАЗ представляет собой сложную научно-техническую задачу. Поэтому представляется естественным в качестве промежуточного этапа создать аналогичную систему меньшего масштаба, необходимую для проверки возможностей РАЗ в КВ диапазоне и отработки необходимых для этого технических средств. Такая установка, помимо отработки полномасштабной системы СТРАЗ, могла бы быть использована для решения некоторых задач динамики тропосферы, в частности для исследования конвективных ячеек и гроз.

В качестве первого этапа реализован действующий макет системы РАЗ с параметрами: $f_e = 19$ МГц, $\bar{P}_e = 100$ Вт, $f = 41$ Гц, $W_a = 200$ Вт, $\Theta_e \approx \Theta_a \approx 90^\circ$. Приемная и передающая антенны состоят из трех диполей каждая и разнесены на расстояние 120 м. Посредине между ними расположена акустическая антенная решетка из 5 активных резонаторов Гельмгольца. Четыре резонатора (по углам квадрата) возбуждаются динамическими головками типа 30 ГД–2 (по 4 на каждый резонатор), а один резонатор (в центре квадрата) – электромагнитным резонансным излучателем. Последний излучатель мог генерировать акустическую мощность до 250 Вт с КПД 20%, но для целей РАЗ он использовался лишь на половину максимальной мощности.

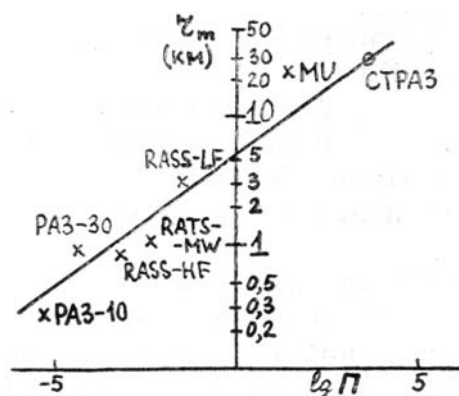


Рис. 1

Для выделения доплеровского сдвига частоты преобразованный по частоте радиосигнал с выхода приемника подавался на низкочастотный анализатор спектра. Предварительные эксперименты показали, что в безветренную погоду отраженный от звукового пакета радиосигнал превышает уровень шумов до высот $\sim 1-2$ км.

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука. 1985. 197 с.

2. Зиничев В.А., Фабрикант А.Л., Шлюгаев Ю.В. // В кн.: 5 Всес. совещание по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере. (Тезисы докл.). М., 1987.
3. А.с. 1290881 СССР, МКИ 01 13/95. Радиоакустический способ измерения температуры и скорости ветра в атмосфере / Фабрикант А.Л. Оpubл. в БИ. 1988. № 45.
4. Matuura N., Masuda Y., Inuki H., Kato S., Fukao S., Sato T., Tsuda T. // Nature. 1986. V. 323. P. 426–428.

Научно-исследовательский радиофизический институт,
г. Горький
Институт прикладной физики АН СССР,
г. Горький

Поступила в редакцию
1 сентября 1988 г.

V. A. Zinichev, V. O. Rapoport, V. Yu. Trakhtengerts, A. L. Fabrikant,
Yu. G. Fedoseev. **Radioacoustic Sounding of the Troposphere in Short Wave Range.**

A principal possibility is shown for the radioacoustic sounding of the troposphere and lower stratosphere by using low frequency sound as well as decametric electromagnetic waves. The experimental model of the radioacoustic sounding system (RASS) for the above range has been built. It is based on the antenna array consisting of five acoustic monopoles of 41 Hz and the sound power ≈ 200 W as well as the radar at the frequency 19 MHz with the antenna gain $G \sim 10$ and the mean power ≈ 100 W. Under the conditions close to still the RASS echosignal exceeds the noise level for the height $\sim 1-2$ km. The parameter estimation has been carried out for the full-scale RASS which is capable of sounding the lower stratosphere under the condition of wind displacing compensation.