

## К ВОПРОСУ ОБ ОДНОМ ЭФФЕКТЕ В МЕХАНИЗМЕ РАССЕЯНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МОНОСТАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

### Введение

В работе [1] описан эффект, наблюдаемый в механизме рассеивания звуковых волн при импульсном акустическом зондировании атмосферы, позволяющий использовать акустическое зондирование для дистанционного измерения температуры атмосферы с достаточно высокой точностью.

В статье рассмотрим более детально некоторые стороны этого эффекта с тем, чтобы полнее оценить его возможности.

Среди методов дистанционного измерения параметров атмосферы акустический метод привлекает особое внимание в силу его простоты и экономичности, а среди измеряемых основных параметров атмосферы особый интерес представляет температура, поскольку она связана с основными термодинамическими процессами в атмосфере.

Поскольку фаза акустического сигнала  $\varphi$  связана с температурой воздуха  $T$  простым соотношением через скорость звука  $c$

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t - \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\Delta h}{c} \quad (1)$$

где  $T$  – период колебаний звуковой волны;  $\Delta t$  – время в момент наблюдения звуковой волны;  $\Delta h$  – высота, на которой в данный момент времени  $\Delta t$  наблюдается звуковая волна;  $c$  – скорость звука, которая с температурой атмосферы связана соотношением  $c = 20\sqrt{T}$ : предпринимались неоднократные попытки использовать фазовый метод акустического зондирования для дистанционного измерения температуры атмосферы. Но для того чтобы из выражения (1) можно было определять температуру по измеренной фазе акустического эхо-сигнала, необходимо было зафиксировать величины  $\Delta t$  и  $\Delta h$ . Если время  $\Delta t$  можно зафиксировать путем стробирования приемника через заданное время  $\Delta t$ , то с фиксацией высоты  $\Delta h$  (или дальности  $\Delta R$ ) дело обстоит сложнее. Связано это с тем, что при дистанционном акустическом зондировании атмосферы высота  $\Delta h$  не измеряется, а фиксируется автоматически как  $\Delta h = c\Delta t$ . В этом случае, подставив в выражение (1) вместо  $\Delta h$  значение  $\Delta h = c\Delta t$ , получим

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T} - \frac{2\pi\Delta t}{T} = 0.$$

Отсюда следует вывод, что если высота (дальность) будет определяться автоматически, мы не должны наблюдать зависимости фазы  $\varphi$  от скорости звука  $c$ .

Таким образом, вопрос использования акустического зондирования для измерения температуры фазовым методом находился в тупике, поскольку не был известен механизм, позволяющий использовать фазовый метод акустического зондирования атмосферы для дистанционного измерения температуры атмосферы.

Предпринимались попытки экспериментальной проверки такого мнения [2, 3].

Хотя результаты двух различных экспериментов были противоречивы, авторы [2, 3] на основании своих экспериментов единодушно заключили, что поскольку не известен механизм, позволяющий объяснить существование связи между фазой акустического эхо-сигнала и температурой, фазовый акустический метод невозможно использовать для дистанционного измерения температуры атмосферы.

Однако нами [1] такой механизм был обнаружен. Он связан с существованием эффекта одновременного прихода акустического эхо-сигнала на вход приемной антенны с целой области высот, занимаемой половиной зондирующего импульса. В этом случае, действительно, при импульсном акустическом моностатическом зондировании и при небольших изменениях температуры атмосферы, а значит и скорости звука, происходят незначительные смещения звукового зондирующего пакета по высоте, причем основная часть этого пакета не смещается по высоте, оставаясь одинаковой для двух сравниваемых скоростей звука. Смещаются лишь передняя и задняя часть звукового пакета на небольшую величину, что проявляется в виде систематической ошибки в сторону занижения большей из двух сравниваемых скоростей звука, причем эту ошибку всегда можно учесть.

Рассмотрим основные аспекты этого вопроса более подробно.

### Физическое представление наблюдаемого эффекта

Обратимся к рис. 1 а, б, где на рис. 1, а представлен излученный звуковой пакет в момент времени  $t_2$ , когда передняя часть звукового пакета достигла высоты  $h_1$  ( $h_{max}$ ), а задняя часть – высоты  $h_2$ . На рис. 1, б представлена временная зависимость излученной звуковой волны с отмеченными на ней моментами времени  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$ .

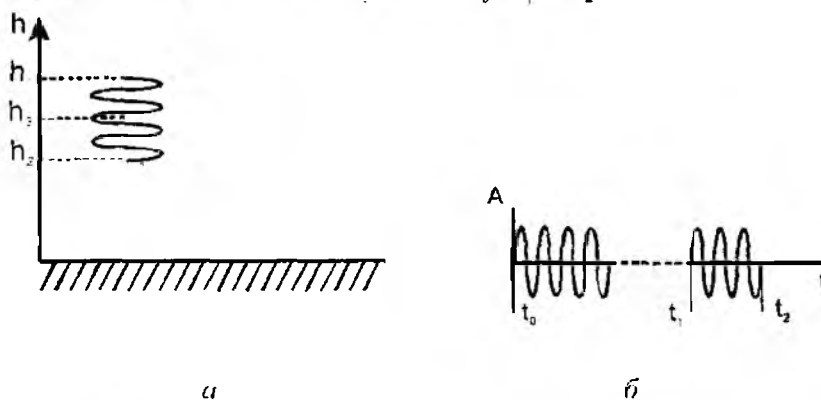


Рис. 1

В момент времени  $t_2$  рассеянная звуковая волна от передней части звукового пакета с высоты  $h_1$  ( $h_{max}$ ) направится вниз к поверхности земли навстречу излученному звуковому пакету. При этом в каждой точке излученного пакета она будет встречаться с рассеянной в каждой точке звуковой волной и тоже направляющейся вниз к поверхности земли.

Поскольку рассеянный акустический эхо-сигнал от передней части зондирующего импульса движется вниз, а зондирующий звуковой пакет перемещается вверх, то при одинаковой температуре в пределах зондирующего пакета, рассеянный от передней части излученного звукового пакета акустический эхо-сигнал встретится с задним фронтом излученного звукового пакета где-то на высоте  $h_3$ , равной высоте местонахождения заднего фронта излученного звукового пакета  $h_2 + \tau c/2$ .

Таким образом, на вход приемной акустической антенны каждое мгновение в течение длительности излученного звукового пакета будет приходить одновременно акустический эхо-сигнал, рассеянный целой областью высот, занимаемой половиной длительности излученного звукового пакета, и будет нести информацию о суммарной фазе и амплитуде этих эхо-сигналов для всей области высот в пределах  $h + \tau c/2$ .

### Математическое представление эффекта

Так как фаза акустической волны  $\varphi$  определяется выражением (1):

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta \tau - \frac{2\pi}{T} \times \frac{\Delta \eta}{\chi},$$

то при одинаковом значении величины  $\Delta t$  и  $c$ , фаза в каждой точке в пределах высоты, занимаемой половиной длительности зондирующего пакета будут определяться только величиной  $\Delta h$ , где  $\Delta h$  – расстояние от поверхности земли до отражающей точки.

Ее значение будет определяться соотношением

$$\varphi_{\Delta h} = \frac{2\pi}{Tc} \Delta h. \quad (2)$$

В этом случае среднее значение фазы акустического эхо-сигнала, поступающего на вход приемной антенны, будет представляться как

$$\varphi_{cp} = (\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n) / n, \quad (3)$$

где  $n$  – число слагаемых,  $\varphi_n$  – фаза акустического эхо-сигнала (2), принятого с элементарного участка высот  $\Delta h$  в пределах высоты, занимаемой половиной длительности излученного звукового пакета.

В этом случае выражение (3) можно представить как

$$\varphi_{cp} = \frac{2\pi}{Tc} \sum (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n) / n, \quad (4)$$

где  $\Delta h_n$  – расстояние от поверхности земли до каждой отражающей точки в пределах высоты, занимаемой половиной длительности зондирующего пакета.

При измерении относительных изменений температуры атмосферы мы должны сравнивать значения  $\varphi_{cp}$ , полученные для двух значений температуры атмосферы  $T_1$  и  $T_2$ . В этом случае, если сравниваемые температуры незначительно отличаются друг от друга, то естественно, они будут иметь совпадающие высоты и не совпадающие.

Совпадающие высоты дадут истинное значение о разнице температур атмосферы, несовпадающие высоты войдут в систематическую ошибку для большей из измеренных значений температур, уменьшая ее значение.

Если сумма совпадающих высот равна  $\sum h_{n, совп}$ , а несовпадающих высот  $\sum h_{n, несовп}$ , то измеренное значение фазы для большей из измеренных значений температуры, а значит и скорости звуковой волны  $\varphi_{cp \delta}$ , будет определяться как  $\varphi_{cp \delta} = \varphi_{совп \delta} + \varphi_{несовп \delta}$ , а для меньшей – как  $\varphi_{cp \nu} = \varphi_{совп \nu} + \varphi_{несовп \nu}$ , тогда разница между измеренными значениями  $\varphi_{cp \delta} - \varphi_{cp \nu} = (\varphi_{совп \delta} - \varphi_{совп \nu}) + (\varphi_{несовп \delta} - \varphi_{несовп \nu})$ .

В полном представлении значений фаз это будет выглядеть так:

$$\varphi_{cp \delta} = \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{n, совп}}{n} + \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{n, несовп}}{n},$$

$$\varphi_{cp \nu} = \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{n, совп}}{n} + \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{n, несовп}}{n},$$

здесь  $h_{n, несовп}$  – высота несовпадающих участков от поверхности земли до высоты несовпадения.

Тогда

$$\varphi_{cp \delta} - \varphi_{cp \nu} = \left( \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{n, совп}}{n} - \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{n, совп}}{n} \right) + \left( \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{n, несовп}}{n} - \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{n, несовп}}{n} \right). \quad (5)$$

Таким образом, из (5) следует, что различие в фазах двух измеряемых температур будет отличаться от истинного значения на величину  $\varphi_{\text{несовп}} = \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{\text{несовп}}}{n} - \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{\text{совп}}}{n}$ , связанную с несовпадением высот.

Так как суммарная высота для несовпадающих высот по сравнению с суммарной высотой для совпадающих высот есть величина второго порядка, то ошибка в оценке относительных измерений  $\varphi_{\text{р}}$  будет незначительная при небольших изменениях температуры атмосферы и будет тем меньше, чем меньше разность между сравниваемыми температурами.

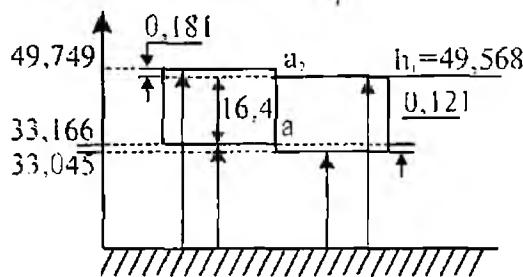
Для наглядности рассмотрим конкретный пример того, как меняется средняя высота при измерении фазы для двух значений температуры атмосферы  $T_1 = 273^\circ$  и  $T_2 = 275^\circ$ . Определим для этих значений температур скорости звука по известной формуле  $c = 20\sqrt{T}$ . Найденные значения скорости  $c_1 = 330,434 \text{ м/с}$  и  $c_2 = 331,662 \text{ м/с}$  для  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

При стробировании на уровне  $\Delta t_{\text{стр}} = 0,3$  с высота составляет  $h_{1\text{max}} = \frac{0,3}{2} \cdot 330,434 = 49,568 \text{ м}$  и  $h_{2\text{max}} = \frac{0,3}{2} \cdot 331,662 = 49,749 \text{ м}$  для  $c_1$  и  $c_2$  соответственно.

Таким образом, различие высот местонахождения переднего фронта излучаемого звукового пакета для скорости звука  $c_1$  и  $c_2$  будет составлять  $49,749 - 49,568 = 0,181 \text{ м}$ .

Найдем местонахождение середины излучаемого пакета для  $c_1$  и  $c_2$  при длительности излучаемого импульса  $\tau = 0,1 \text{ с}$ . Для этого найдем значение высоты при  $\Delta t_{\text{стр}} = 0,25 \text{ с}$  для  $c_1$  и  $c_2$ . Найденные значения оказались равными  $h_{1\text{min}} = 41,306 \text{ м}$  и  $h_{2\text{min}} = 41,457 \text{ м}$  для  $c_1$  и  $c_2$  соответственно.

На рис. 1, в представлено схематично расположение по высоте зондирующих импульсов для  $c_1$  и  $c_2$ , вернее, расположение их половин.



в

Рис. 1 (Продолжение)

Разобьем участок совпадающих высот на отрезки, равные  $0,3 \text{ м}$ . Число таких отрезков будет равно  $16,4:0,3=55$ . Для совпадающих высот среднее значение высоты

$$h_{\text{ср}} = \sum \frac{h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n}$$

Однако реальная величина  $h_{\text{ср}}$  для обоих значений будет отличаться, так как

$$h_{\text{ср}1} = \sum \frac{h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} + \frac{33,045}{n}$$

$$h_{\text{ср}2} = \sum \frac{h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} + \frac{49,749}{n}$$

То есть ошибка в оценке разницы между  $h_{cp,2}$  и  $h_{cp,1}$  будет в этом случае составлять

$$\frac{49.749}{n} - \frac{33.045}{n} = \frac{16.70}{55} \approx 0,3 м.$$

Таким образом, относительная ошибка в оценке разности ( $h_{cp,1} - h_{cp,2}$ ) будет составлять, если принять  $h_{cp} = 40 м$ ,  $\sim 0,75\%$ . Так как  $h_{cp} \sim \varphi_0$ , а  $\varphi_0 \sim 1/v_{интек}$ , то, следовательно, с такой точностью мы будем измерять относительные изменения фазы акустического эхо-сигнала, а значит, относительные изменения хаотической скорости молекул  $v_{интек}$ . Поскольку  $T^2 \sim v_{интек}^2$ , ошибка в оценке  $\Delta T$  будет составлять  $\sim 1,5\%$ . В представленном примере разницу температур в 2 мы бы измеряли фазовым способом с точностью 1,5 %, то есть измеренная величина была бы занижена на 1,5 % и составляла бы 1.97.

### Графическое представление наблюдаемого эффекта

На рис. 2 схематично представлено графическое сложение амплитуд и фаз двух колебаний одинаковой амплитуды, имеющих различные начальные фазы. На представленных рисунках рассмотрено сложение амплитуд и фаз звуковых волн в приемной антенне для сдвигов фаз между двумя колебаниями в:  $a - 45^\circ$ ;  $b - 90^\circ$ ;  $c - 157,5^\circ$ ;  $d - 180^\circ$ ;  $e - 225^\circ$ ;  $e - 315^\circ$

Из представленных рисунков следует, что, во-первых, при сложении двух колебаний одинаковой амплитуды полученные новые колебания всегда имеют начальную фазу, равную половине начальных фаз складываемых колебаний, а это значит, что каждое мгновение на входе приемной антенны в результате сложения колебаний звуковых волн, поступающих одновременно от целой области высот, получаем звуковую волну с начальной фазой, равной среднему значению начальных фаз всех звуковых волн, поступающих одновременно с этой области высот.

Во-вторых, сложение амплитуд этих звуковых волн, поступающих от этой области высот, происходит таким образом, что противофазные колебания вычитаются и дают нулевую амплитуду (рис. 2.  $d$ ), а близкие по величине к противофазным колебаниям, вносят незначительный вклад в формирование суммарной амплитуды, а следовательно, в формирование средней величины начальной фазы, полученной усредненной звуковой волны. Однако это не оказывает существенного влияния на точность измерения относительных изменений температуры атмосферы фазовым способом, так как структура рассеянного сигнала от этой области высот существенно не меняется в результате сохранения общей области высот при небольших изменениях температуры атмосферы.

### Экспериментальное подтверждение эффекта

На рис. 3,  $a, б$  представлены временные зависимости фазы акустического эхо-сигнала, полученные одновременно для трех значений длительности зондирующего импульса.

При проведении этого эксперимента принималось во внимание, что если среднее значение фазы измеряемого эхо-сигнала определяется длительностью зондирующего импульса (вернее, его половины), то при одинаковом измерительном стробе, который в эксперименте [1] составлял  $\tau_{инт} = 33 мс$ , с уменьшением длительности зондирующего импульса средняя высота отражающей области будет расти, и будет расти фаза рассеянного сигнала, так как  $\varphi \sim h$ . Это иллюстрирует рис. 3,  $б$ .

На рис. 3,  $б$  сказанное выше подтверждается полученными одновременно временными зависимостями измеряемой фазы акустического эхо-сигнала для трех значений длительности излучаемого импульса.

Фаза акустического эхо-сигнала для меньшей длительности излучаемого пакета волн на протяжении всего периода измерений была больше, чем фаза, измеряемая для большей длительности излучаемого импульса.

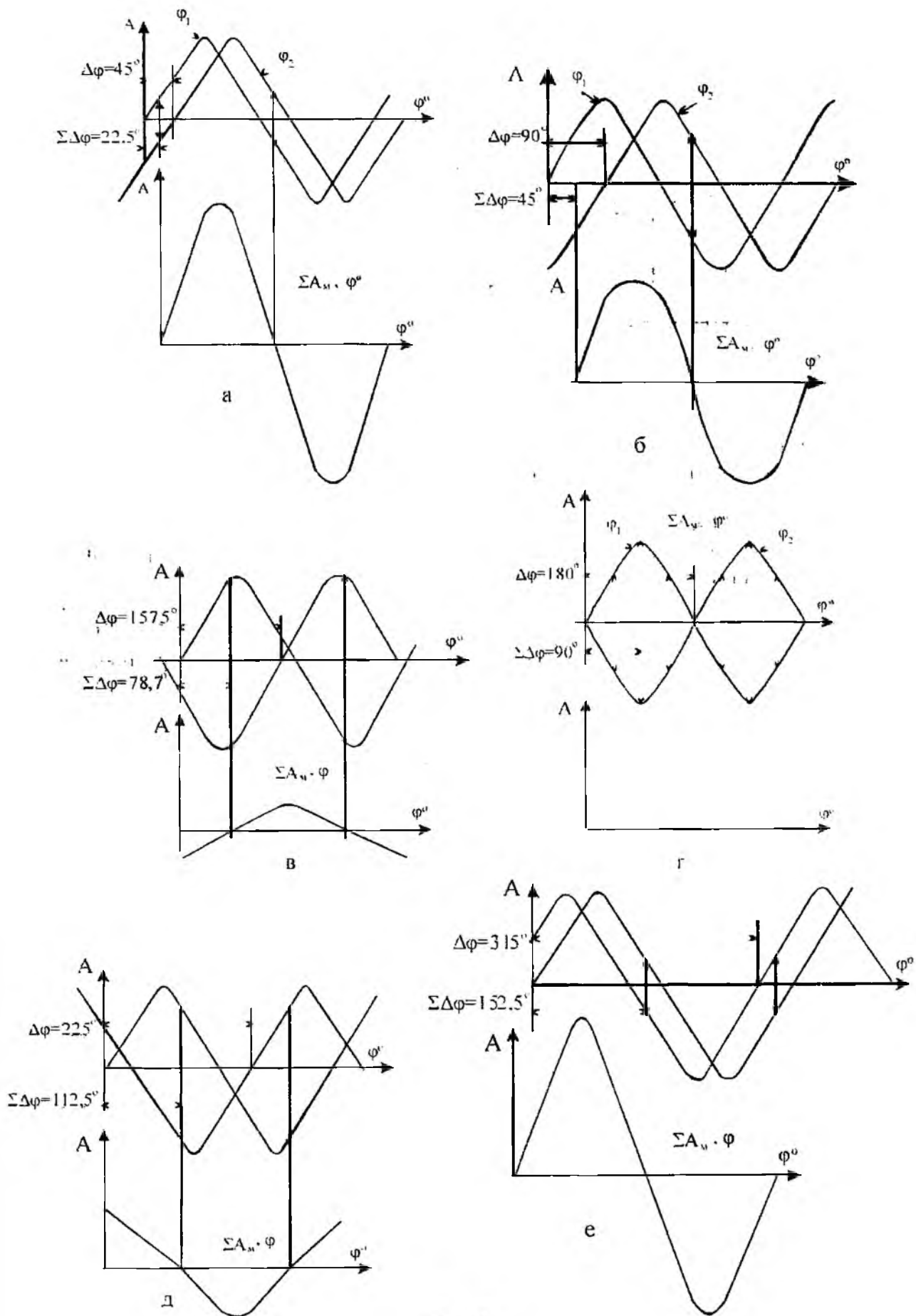


Рис. 2

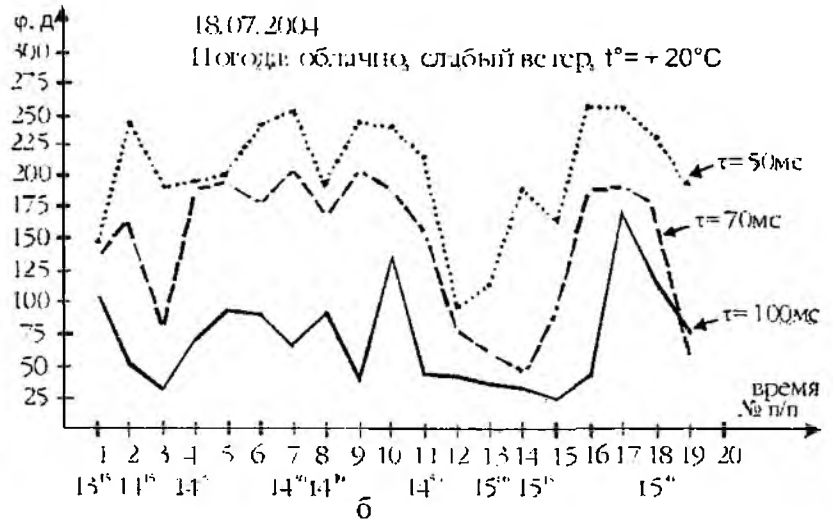
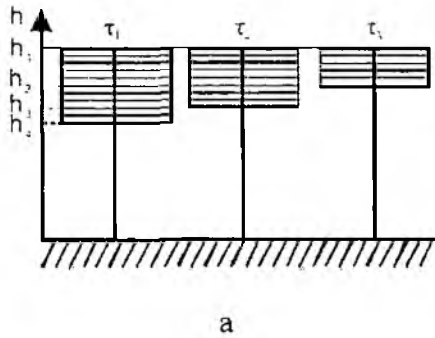


Рис. 3

Поэтому результаты этого эксперимента можно расценивать как подтверждающие существование нового эффекта в рассеянии звуковых волн при импульсном моностатическом зондировании.

То что полученные нами в экспериментах при импульсном моностатическом акустическом зондировании атмосферы эхо-сигналы не являются следствием переотражения звуковых волн от местных предметов и местности, свидетельствует рис. 4, где представлена временная зависимость акустических эхо-сигналов, полученных одновременно для трех направлений при одной высоте зондирования: *а* – для вертикального направления; *б* – под углом  $\alpha = 22^{\circ}$  от вертикали в западном направлении; *в* – под углом  $\alpha = 22^{\circ}$ , но в противоположном по азимуту направлении, то есть в восточном направлении. Рис. 4 взят из [4].



Рис. 4

Характерной особенностью условий эксперимента являлось то, что в западном и восточном направлениях существенно различались подстилающие поверхности.

Однако, несмотря на существенное различие подстилающей поверхности для двух направлений наклонного зондирования, временные фазовые зависимости их идентичны. Заметим, что наблюдаемое различие временных зависимостей, полученных для вертикального направления и наклонного, связано с существованием эффекта молекулярной анизотропии [5].

Таким образом, представленные на рис. 4 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что измеряемая фаза акустического эхо-сигнала есть результат взаимодействия акустической волны с атмосферой, а не является какой-то комбинацией переотражений от местных предметов и поверхности Земли.

То, что рассеянная акустическая волна не разрушается атмосферными процессами, свидетельствует рис. 5, а, б, который взят из [4], где представлены результаты зондирования при двух начальных фазах излучаемого акустического пакета, отличающихся на  $180^\circ$ : Н – при неперевернутой начальной фазе акустического эхо-сигнала; П – при перевернутой начальной фазе на  $180^\circ$ .

На рис. 5 представлены временные зависимости фазы акустического эхо-сигнала, полученные для трех направлений: а –  $\alpha = 0$ ; б –  $\alpha = 22$  для восточного направления; в –  $\alpha = 22$  для западного направления.

Как следует из рис. 5, а, б, при зондировании при перевернутой начальной фазе на  $180^\circ$  полученные соотношения временных зависимостей фазы эхо-сигнала для трех направлений соответствуют временным зависимостям, полученным при излучении неперевернутой начальной фазы излучаемого импульса и соотносятся между собой на  $180^\circ$ .

Эти результаты свидетельствуют о том, что в период измерений фаза акустического эхо-сигнала не искажалась атмосферными процессами и переотражениями от местности и несла объективную информацию о температуре атмосферного слоя, который акустическая волна прошла туда и обратно до высоты стробирования.

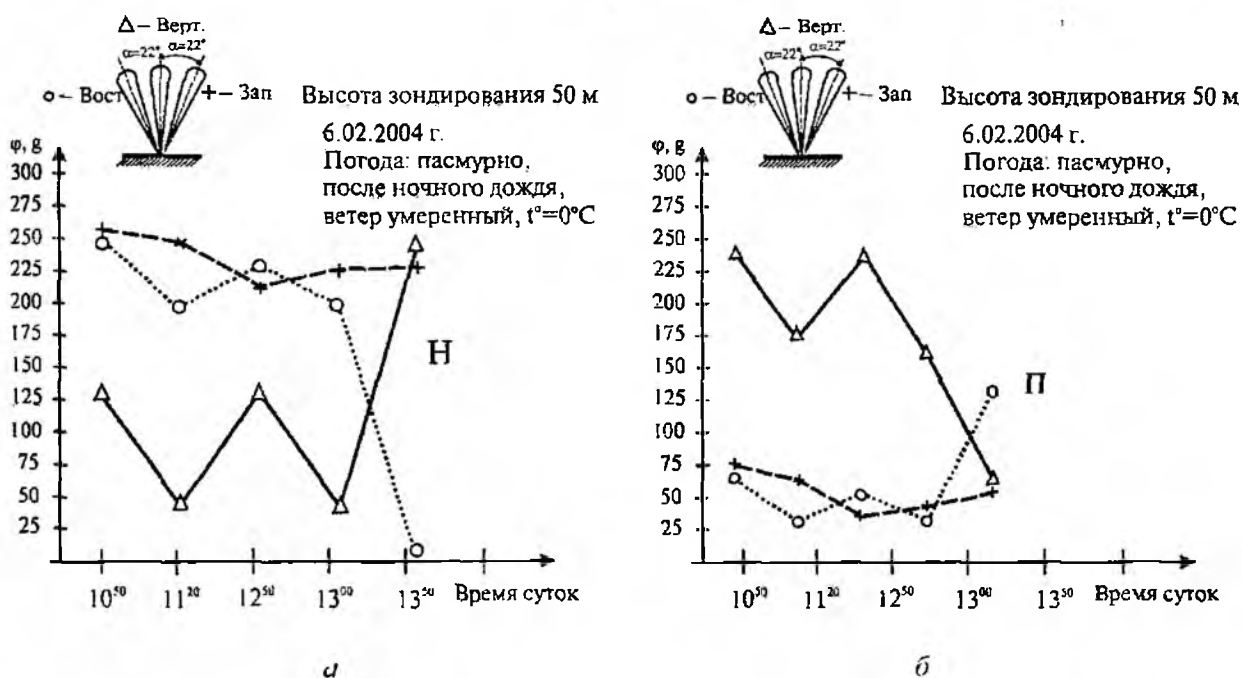


Рис. 5

### Возможности акустического зондирования при наличии наблюдаемого нового эффекта в рассеянии акустических волн при импульсном моностатическом зондировании

Под возможностями акустического зондирования в данном случае имеется в виду точность измерения относительных изменений температуры и возможные пределы измерения этих изменений. Кроме того, в данном случае при рассмотрении точности измерения температуры атмосферы и возможных пределов измеряемой температуры имеется в виду возмож-

ность акустического дистанционного измерения температуры атмосферы, связанная с сутью наблюдаемого нового эффекта в рассеянии акустических волн.

Что касается ошибок в измеряемой фазе акустического эхо-сигнала, таких, как например, влияние турбулентности как зашумляющего фактора на принимаемый эхо-сигнал, влияние доплеровских сдвигов при наличии ветра на фазы акустических эхо-сигналов и других факторов подобного типа, то они рассмотрены в [4], где представлен и способ их учета.

Итак, систематическая ошибка, которая возникает при использовании рассмотренного эффекта, связана с наличием несовпадающих высот в двух сравниваемых акустических пакетах. Это приводит к тому, что из двух сравниваемых температур атмосферы большее значение занижается на величину  $\Delta T$ , которую можно учесть. Для измеряемых значений фаз в этом случае это выразится как это показано соотношением

$$\varphi_{T_1} - \varphi_{T_2} = (\varphi_{T_1, \text{счит}} - \varphi_{T_2, \text{счит}}) + (\varphi_{T_2, \text{нечт}} - \varphi_{T_1, \text{нечт}}), \quad (6)$$

здесь  $\varphi_{T_1, \text{счит}} = \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{\text{счит}}}{n}$ ,  $\varphi_{T_2, \text{счит}} = \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{\text{счит}}}{n}$ ,  $\varphi_{T_1, \text{нечт}} = \frac{2\pi}{Tc_1} \sum \frac{h_{\text{нечт}}}{n}$ ,  $\varphi_{T_2, \text{нечт}} = \frac{2\pi}{Tc_2} \sum \frac{h_{\text{нечт}}}{n}$

где  $c_1$  – скорость звука для температуры  $T_1$ ,  $c_2$  – скорость звука для температуры  $T_2$ , причем  $T_2 > T_1$ , а  $n$  – число слагаемых высот  $h$  от поверхности Земли до каждой точки высот в пределах, занимаемых половиной длительности излучаемого акустического пакета волн.

Для  $\varphi_{T_1, \text{счит}}$  и  $\varphi_{T_2, \text{счит}}$  величины  $h_{\text{счит}}$  равны и потому измеренные значения для них будут определяться только различием в величинах  $c_1$  и  $c_2$ . Для  $\Delta\varphi_{\text{нечт}}$  величина ее будет определяться величиной  $c_1$ .

Систематическая ошибка в оценке разности величин  $c_1$  и  $c_2$  (а значит, разности величин  $T_1$  и  $T_2$ ) будет определяться значением разности сумм несовпадающих высот для  $c_1$  и  $c_2$ , а ее относительная величина будет выражаться как

$$\Delta = \frac{\sum h_{c_2, \text{нечт}} - \sum h_{c_1, \text{нечт}}}{\sum h_{\text{счит}}}, \quad (7)$$

где  $\sum h_{c_2, \text{нечт}}$  – сумма несовпадающих высот для  $T_2$ ,  $\sum h_{c_1, \text{нечт}}$  – сумма несовпадающих высот для  $T_1$ ,  $\sum h_{\text{счит}}$  – сумма совпадающих высот.

Величина этой ошибки будет зависеть от двух факторов:

1) от длительности излучаемого звукового импульса  $\tau$ , так как чем больше будет величина  $\tau$ , тем больше будет сумма  $\sum h_{\text{счит}}$  для фиксированной разности измеренных величин  $c_1$  и  $c_2$ , и тем меньше будет величина систематической ошибки;

2) от разности измеренных величин  $c_1$  и  $c_2$  при фиксированном значении величины  $\tau$ , так как с увеличением величины  $\Delta c = c_1 - c_2$  возрастет разность несовпадающих высот, и систематическая ошибка возрастает.

Поэтому для повышения точности измерения небольших относительных изменений величины  $T$  применяется нонусная шкала измерений величин  $\varphi$ , так, как это предлагается в [4, 6], где используется умножение частоты принятого эхо-сигнала в нужное число раз, определяемое необходимой точностью измерения относительных изменений температуры.

3) Для расширения диапазона измеряемой разности температур в сторону более значительных изменений этой разности применяются два подхода [6, 7]: первый из них направлен на сужение участков стробирования по высоте на более малые отрезки, вплоть до равных половине длительности излучаемого звукового пакета ( $\tau c$ ); второй использует деление частоты принятого эхо-сигнала. Либо применяется комбинированный подход, использующий первый и второй.

Рассмотрим конкретные примеры, иллюстрирующие возможности акустического метода, использующего наблюдаемый эффект в рассеянии акустических волн.

В патентах [6, 7] подробно описаны методики применения умножения и деления частоты принятого эхо-сигнала для расширения диапазона измеряемых величин  $T$ , а также за счет уменьшения длины участков стробирования.

На рис. 6 и 7 представлены временные зависимости фазы акустического эхо-сигнала, полученные одновременно для двух углов места:  $A_v$  – для вертикального направления,  $A_{70}$  – для угла места  $\beta = 70^\circ$ . Представленные зависимости получены при различной погоде. Рисунки взяты из работы [4].

В экспериментах использовалось умножение частоты принятых эхо-сигналов в 32 раза.

На обоих рисунках наблюдается явно выраженное устойчивое различие фазы эхо-сигналов, полученных для двух различных углов места, причем, в одном эксперименте величина  $\varphi_v$ , измеренная для вертикального направления, оказалась больше величины  $\varphi_{70}$ , измеренной при угле  $\beta = 70^\circ$ , а в другом эксперимента – наоборот.

Различие фаз для двух различных направлений связано с существованием молекулярной анизотропии атмосферы [5].

Однако здесь этот вопрос не рассматривается. В данном случае нас интересует сама величина различия в наблюдаемых зависимостях, полученных для двух направлений. В наблюдаемых зависимостях различие фаз эхо-сигналов, полученное для двух направлений, меняется от  $0^\circ$  до  $\sim 80^\circ$ .

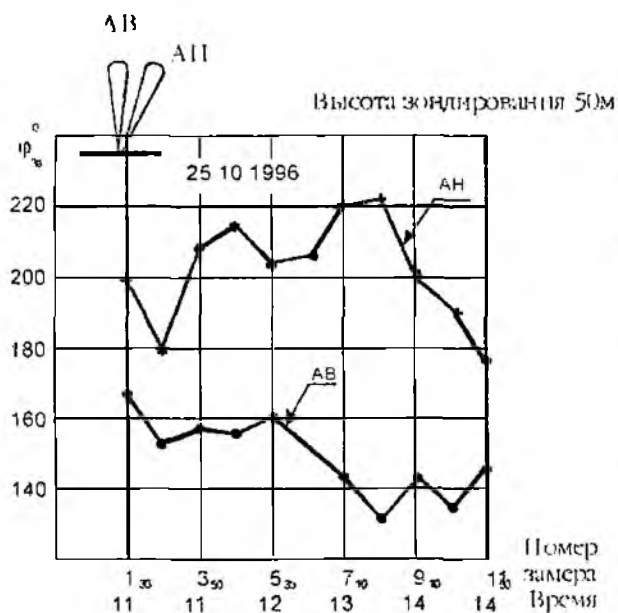


Рис. 6

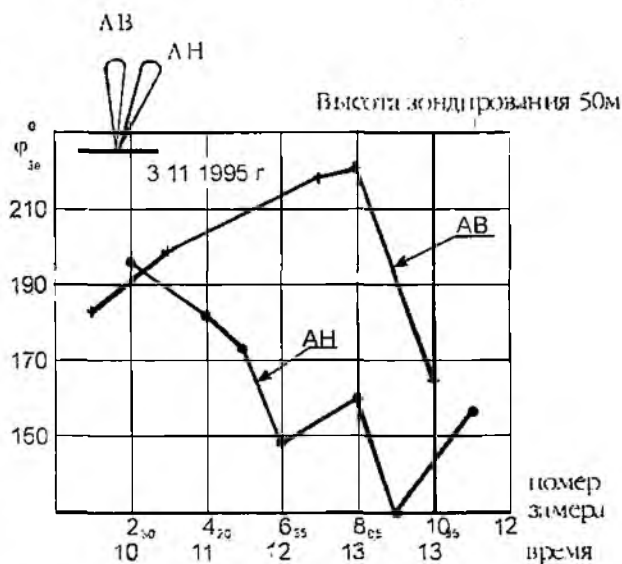


Рис. 7

Оценим, какой величине изменений температуры соответствуют наблюдаемые изменения фазы. Возьмем такие исходные данные: высота зондирования – 40 м,  $T = 10^{-3} c$ ,  $c_1 = 330,454$  м/с,  $T_1 = 273$ .

Для этих данных по формуле  $\varphi = 2\pi\Delta h/Tc$  найдем величину  $\varphi$ . Она равна  $43576,413^\circ$ .

Наблюдаемая максимальная величина изменений фазы в представленных экспериментальных данных, умноженная в 32 раза, составляет  $\sim 80^\circ$ , а неумноженное значение –  $80:32=2,5^\circ$ .

Найдем величину  $c_2$  для фазы  $\varphi_2$ , представляющую сумму  $\varphi_2 = \varphi_1 + 2,5^\circ = 43578,913^\circ$ .

Определим величины  $c_2$  и  $T_2$  для  $\varphi_2$ :

$$\varphi_2 = \frac{2\pi\Delta h}{Tc} = \frac{360 \cdot 40}{10^{-3}c_2}.$$

$$c_2 = 330,435,$$

$$T_2 = c_2/400 = 272,968.$$

Найдем разность температур  $T_1 - T_2$ , соответствующую наблюдаемой разности фаз  $\Delta\varphi = 2,5^\circ$ :

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 273 - 272,968 = 0,032.$$

Найденная относительная систематическая ошибка для этих данных составила  $\Delta = 0,007\%$ . Ошибка рассчитывалась так же, как это сделано выше при расчете ее величины в примере при измерении разности температур в  $2^\circ$ .

Таким образом, при умножении частоты акустического эхо-сигнала можно измерять сотые доли градусов, причем с высокой точностью (поскольку на рис. 1 и 2 фаза акустических эхо-сигналов флуктуирует незначительно), при систематической ошибке  $\Delta \approx 0,007\%$ .

Оценим максимальные пределы величин измеряемых изменений температуры.

Сначала оценим без применения деления частоты акустического эхо-сигнала.

Исходные данные: излучаемая частота звука  $\sim 1 \text{ кГц}$ , минимально возможная величина расстояния  $\Delta h = \tau c/2 = 0,1 \cdot 330/2 = 16,5 \text{ м}$ ,  $c_1 = 330,454 \text{ м/с}$ .

$$\text{Найдем для этих данных величину } \varphi_1 = 360^\circ \cdot 16,5 \cdot 10^3 / 330,454 = 17975,27.$$

Поскольку измерения фазы этим способом ведется в пределах  $360^\circ$ , найдем  $\varphi_2 = \varphi_1 + 360^\circ = 18335,27$ .

Определим для  $\varphi_2$  величину  $c_2$  из выражения

$$\varphi_2 = \frac{360 \cdot 16,5}{10^{-3}c_2}, 18335,27 = \frac{360 \cdot 16,5}{10^{-3}c_2}, c_2 = 323,96 \text{ м/с}, \text{ а } T_2 = 262,37.$$

$$\text{Значение } \Delta T = T_1 - T_2 = 273 - 262,37 = 10,63.$$

Таким образом, расширить диапазон измеряемых изменений величины  $T^\circ$  за счет уменьшения стролируемого участка  $\Delta h$  до минимально возможного, равного половине длительности излучаемого импульса, можно примерно до  $10^\circ$ .

Относительная систематическая ошибка в этом случае составляет  $\sim 20\%$ , т.е. измеренная разность температур в  $10^\circ$  будет занижена на  $20\%$ , т.е. на  $2^\circ$ .

Дальнейшее увеличение этого предела возможно за счет применения деления частоты принимаемого эхо-сигнала в 2 раза, и соответствующее им расширение предела измеряемых температур до  $20^\circ$ .

Относительная систематическая ошибка в этом случае будет составлять  $\sim 40\%$ , т.е. измеренная разность температур в  $20^\circ$  будет занижена на  $40\%$ , т.е. на  $8^\circ$ .

Таким образом, рассмотренный способ дистанционного измерения температур на основании наблюдаемого нового эффекта в рассеянии акустических волн при импульсном зондировании атмосферы позволяет измерять температуру атмосферы в широких пределах от сотых долей градуса ( $0,01$ ) и до значений порядка  $10-20^\circ$  с относительной систематической ошибкой, которая растёт с ростом  $\Delta T$  от  $0,014\%$  для  $\Delta T = 0,032^\circ$  до  $40\%$  при  $\Delta T = 20^\circ$ .

### Выводы

1. В результате существования эффекта одновременного прихода акустических эхо-сигналов на вход приемной антенны с целой области высот, занимаемой половиной длитель-

ности излученного импульса, создаются условия для сохранения большой области одинаковых высот для двух сравниваемых измерений при незначительных изменениях температуры атмосферы, что позволяет использовать акустическое импульсное моностатическое зондирование для дистанционного измерения относительных изменений температуры атмосферы с достаточно высокой точностью.

2. Наличие такого эффекта в механизме рассеяния звуковых волн при импульсном моностатическом зондировании атмосферы позволяет измерять с помощью акустического зондирования атмосферы относительные изменения температуры в широких пределах – от сотых долей градусов (0,01) и до значений порядка 10–20° с относительной систематической ошибкой, которая растет с ростом измеряемой величины  $\Delta T$  от 0,014 до 40 %.

3. Применимость нового способа дистанционного измерения относительных изменений температуры атмосферы подтверждено многочисленными экспериментами.

**Список литературы:** 1. Делов И.А., Слитченко Н.И. О механизме рассеяния звуковых волн при акустическом импульсном моностатическом зондировании атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Т. 3, № 3. С. 16 – 21. 2. Bradley S.G., Hipkin V.J. and Underwood K. The relationship between the phase of a sodar signal and atmospheric temperature // Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Sympos. On Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans Auckland, 2000, New Zealand, P.13 – 18. 3. Surridge A.D. On a phase sensitive acoustic sounder. J. Atmos. Terres. Phys., 49, P.105 – 110, 1978. 4. Делов И.А., Слитченко Н.И. Результаты экспериментальных исследований анизотропии молекулярных процессов атмосферы с помощью акустического зондирования // Прикладная радиоэлектроника. 2004. Т. 3, № 3. С. 27 – 31. 5. Бондаренко М.Ф., Слитченко Н.И., Делов И.А., Леонидов А.В. Результаты измерений анизотропии температуры атмосферы в приземном слое Земли контактным способом // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т.4, № 4. С. 383 – 393. 6. Делов И.А., Слитченко М.Г., Леонидов О.В. Спосіб дистанційного вимірювання висотних профілів температури повітря за допомогою акустичного зондування атмосфери. Патент України № 77836 від 15 січня 2007 р. 7. Делов И.А., Слитченко Н.И., Леонидов А.В. Способ определения типа температурной стратификации атмосферы. Заявка на Патент Украины.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редакцию 25.02.2008*