

УДК 551.501.724:551.596

## МЕТОД РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО РАДИОСИГНАЛА\*

А. Л. Фабрикант

Рассмотрена возможность использования миллиметровых радиоволн для радиоакустического зондирования атмосферы. Радиоволны рассеиваются на естественных неоднородностях (каплях, аэрозолях и т.п.), концентрация которых осциллирует в поле звуковой волны. Если амплитуда излучаемого радиосигнала модулирована, то частота модуляции рассеянного радиосигнала оказывается смещенной на величину доплеровского сдвига. Измеряя сдвиг частоты модуляции, можно определить скорость звука в зондируемом объеме.

Радиоакустическое зондирование (РАЗ) атмосферы основано на использовании обратного рассеяния монохроматических радиосигналов возмущениями плотности в цуге бегущей звуковой волны [1]. Эффективность такого метода определяется когерентным сложением радиосигналов, отраженных от разных частей акустического волнового пакета, при выполнении условия Брэгга

$$\lambda_e = 2 \lambda_s', \quad (1)$$

где  $\lambda_e$  и  $\lambda_s'$  - длины радио- и звуковых волн. Распространяющийся акустический волновой пакет играет роль движущегося сферического "зеркала", фокусирующего отраженные радиоволны на приемной антенне. Доплеровский сдвиг частоты отраженных радиоволн позволяет определить локальную скорость звука и, соответственно, температуру.

В условиях реальной атмосферы ветровой снос акустического зеркала и турбулентные искажения фазы, разбивающие сферический волновой фронт звуковой волны на некоррелированные "осколки", ограничивают дальность действия метода РАЗ до высот  $\leq 1$  км [1]. Увеличение предельной дальности РАЗ возможно за счет использования более длинных волн [2]. Однако переход в диапазон метровых длин волн значительно увеличивает трудности технической реализации направленных радио- и акустических антенн, при этом ухудшается пространственная разрешающая способность метода.

В настоящей работе предлагается модификация метода РАЗ, основанная на использовании коротковолновых СВЧ радиосигналов с амплитудной модуляцией и длинноволнового звука. Волны сантиметрового и более коротковолновых диапазонов не могут быть использованы для РАЗ атмосферы, так как звук соответствующих частот быстро затухает. В то же время РЛС на сантиметровых и миллиметровых волнах широко используются для радиолокации туманов, облаков и осадков [3]. Ниже мы рассмотрим способ, позволяющий использовать для РАЗ волны огибающей модулированного СВЧ излучения, рассеянного на естественных атмосферных неоднородностях\*\*. Этот способ основан на

\*Статья представлена автором на дискете.

\*\*Ранее рассматривались возможности использования синусоидально модулированного излучения для локации пространственных неоднородностей рассеивающей среды, см., например, [4].

измерении доплеровского сдвига частоты модуляции рассеянных радиосигналов, возникающего, если концентрация некогерентных рассеивателей (например, облачных капель) осциллирует в поле бегущей звуковой волны.

Рассмотрим уравнение радиолокации [3]:

$$P_r = P_0 \sigma \frac{G_e^2 \lambda_e^2}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2)$$

где  $P_0$  и  $P_r$  - мощность излучаемого и принимаемого радиосигналов,  $r$  - высота зондирования,  $G_e$  - коэффициент усиления антенны РЛС вдоль оси диаграммы направленности (ДН),  $\sigma$  - сечение рассеяния цели. Если рассеяние происходит в объеме  $V = 4\pi r^2 l / G_e$ , то сечение рассеяния  $\sigma = \int \eta dV$ , где  $\eta$  - удельное сечение рассеяния. Из формулы (2) следует выражение для мощности принимаемого нестационарного непрерывного радиосигнала, рассеянного на объеме, занятом распространяющимся звуковым импульсом, длина которого  $l = c_s \tau$ , а передний фронт находится на высоте  $r_0(t) = c_s t$ :

$$P_r(t) = \frac{G_e \lambda_e^2}{(4\pi r)^2} \int_{r_0(t)-l}^{r_0(t)} \frac{P_0(t-2r/c_0) \eta(r, t-r/c_0)}{r^2} dr \quad (3)$$

Здесь  $c_0$  - скорость света,  $c_s$  - скорость звука,  $\tau$  - длительность звукового импульса. Будем считать, что мощность излучаемого сигнала промодулирована по закону:

$$P_0(t) = P_e [1 + \cos(\Omega t + \varphi_0)], \quad (4)$$

а удельное сечение рассеяния модулируется звуковой волной с числом Маха  $M$ , так что

$$\eta(r, t) = \eta_0 [1 + M \cdot \Pi(r_0 - l, r_0) \cdot \cos(\omega_s t - k_s r)], \quad (5)$$

где  $\eta_0$  - невозмущенное удельное сечение рассеяния,  $\omega_s$  и  $k_s$  - частота и волновое число звуковой волны, а функция

$$\Pi(r_1, r_2) = \begin{cases} 0 & \text{при } r < r_1 \\ 1 & \text{при } r_1 < r < r_2 \\ 0 & \text{при } r > r_2 \end{cases} \quad (6)$$

Радиоволны, рассеянные на неоднородностях, находящихся вне звукового пакета, остаются модулированными, так же как и излучаемый РЛС сигнал; - по закону (4)\*. В то же время, сигнал, рассеянный в слое  $r_0 - l < r < r_0$ , содержит частоту модуляции, отличную от  $\Omega$ .

Рассмотрим амплитуду колебаний мощности со сдвигом частоты модуляции. Для этого подставим (4) и (5) в формулу (3). Полагая  $r_0 = c_s t$  и учитывая, что  $\omega_s r_0 / c_0 \ll 1$ , получим величину мощности принимаемого радиосигнала с частотой модуляции  $\tilde{\Omega} = \Omega - \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega = 2(c_s / c_0) \Omega$ :

\*Скорость естественных движений атмосферных неоднородностей полагаем малой по сравнению со скоростью звука и пренебрегаем соответствующим доплеровским сдвигом частоты модуляции рассеянных волн.

$$\tilde{P}_r(t) = (M/2) \cdot P_{or} \left[ \frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \cdot \cos(\tilde{\Omega} t + \Delta k l / 2 + \varphi_0) + \right. \\ \left. + \frac{\sin[(2\Omega/c_0 + k_s)l/2]}{(2\Omega/c_0 + k_s)l/2} \cos[\tilde{\Omega} t + (2\Omega/c_0 + k_s)l/2 + \varphi_0] \right]. \quad (7)$$

Здесь  $P_{or} = (4\pi r_0)^{-2} G_e \lambda_e^2 P_e \eta_0 l$  - средняя принимаемая мощность непрерывного радиосигнала, рассеянного в объеме, занятом звуковой волной,  $\Delta k = 2\Omega_0/c_0 - k_s$  - расстройка условия Брэгга (1). Имея в виду, что при РАЗ обычно выполняются условия  $\Delta k \ll k_s$  и  $n = k_s l \gg 1$ , мы можем пренебречь вторым слагаемым в (7) и в результате получим

$$\tilde{P}_r(t) = (M/2) \cdot P_{or} \frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \cdot \cos(\tilde{\Omega} t + \Delta k l / 2 + \varphi_0). \quad (8)$$

Измеряя доплеровский сдвиг частоты модуляции  $\Delta\Omega$  рассеянного радиосигнала, можно найти скорость движения звукового импульса  $c_s = c_0 \Delta\Omega / 2\Omega$ . Производя наклонное зондирование под двумя направлениями с противоположными азимутами и одинаковым углом места  $\alpha$ , можно определить соответствующие скорости движения звуковой волны:  $c_s^\pm = c_s \pm U \sin \alpha$ , где  $U$  - проекция скорости ветра на плоскость, образованную двумя направлениями зондирования. Эти данные позволяют определить температуру и скорость ветра [5].

Таким образом, рассматриваемая методика РАЗ возможна в атмосфере, содержащей некогерентные рассеиватели, и основана на использовании радиосигналов с амплитудной модуляцией. Как и в "обычном" методе РАЗ, здесь используется пространственный резонанс: совпадение периода акустической решетки с половиной длины радиоволны (условие (1)). При этом условии волны интенсивности радиосигналов, рассеянных на частицах в соседних максимумах плотности в звуковой волне, складываются когерентно, и глубина модуляции рассеянного радиосигнала оказывается максимальной.

Подчеркнем, что несущая частота радиосигналов  $\omega$  может значительно превышать частоту модуляции, так что

$$\omega_s \ll \Omega = \omega_s \frac{c_0}{2c_s} \ll \omega. \quad (9)$$

Излучение сигналов с достаточно малой длиной волны, например, в сантиметровом или миллиметровом диапазоне длин волн можно осуществлять с высокой направленностью. Это позволяет повысить по сравнению с обычной методикой РАЗ разрешающую способность по углу и, следовательно, увеличить точность измерения температуры и скорости ветра, не создавая при этом радиопомех в широко используемых радио- и телевизионных диапазонах. В то же время, частота  $\omega_s$  акустического сигнала и связанная с ней условием (9) частота модуляции радиосигнала могут быть достаточно произвольными.

Следует, однако, учесть, что акустические колебания воздуха увлекают за собой частицы аэрозоля с размерами [6]

$$r_k \leq \left( \frac{9 \nu_a}{2\omega_s} \frac{p_a}{p_0} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

где  $p_a$  и  $p_0$  - плотность воздуха и вещества аэрозоля,  $\nu_a$  - кинематическая вязкость воздуха. Более крупные капли колеблются с меньшей амплитудой, отставая от движения окружающего их воздуха. В частности, водяные капли с радиусом  $r_k \leq 10$  мкм, из которых, как правило, состоят облака, участвуют в колебательном движении под действием звукового поля с частотой  $f \leq 150$  Гц. Следовательно, для проведения РАЗ в облаках по предлагаемой методике необходимо использовать низкочастотный звук.

Оценим теперь максимальную дальность РАЗ с амплитудно-модулированным радиосигналом. Подставляя удельное сечение рассеяния  $\eta = Z \cdot \pi^5 / \lambda^4$ , выраженное через величину радиолокационной отражаемости  $Z$  [3], в формулу (8) при  $\Delta k = 0$ , получим амплитуду модуляции мощности принимаемого радиосигнала на частоте  $\tilde{\Omega}$ :

$$P_r = \frac{\pi^3 \ln 2}{2} \frac{M l Z}{\theta_e^2 \lambda_e^2 r^2} p_e, \quad (11)$$

где эффективная ширина  $\theta_e$  диаграммы направленности РЛС выражается через коэффициент усиления  $G_e = 32 \ln 2 / \theta_e^2$  в предположении, что ДН аппроксимируется гауссовой кривой [3].

Если рассеивающий объем находится во френгоферовой зоне акустической антенны, обладающей коэффициентом усиления  $G_a$  и излучающей мощность  $W_s$ , то интенсивность звукового поля  $I = W_a G_a / (4\pi r^2)$ , а соответствующее число Маха равно величине

$$M = \left( \frac{2I}{p_a c_s^3} \right)^{1/2} = r^{-1} \left( \frac{W_a G_a}{2\pi p_a c_s^3} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в формулу (11), получим

$$P_r = \frac{\pi^3 \ln 2}{2} \left( \frac{W_a G_a}{2\pi p_a c_s^3} \right)^{1/2} \frac{p_e l Z}{\theta_e^2 \lambda_e^2} \frac{1}{r^3}. \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что при увеличении дальности зондирования  $r$  мощность принимаемого сигнала убывает как  $r^{-3}$  быстрее, чем по формуле Маршалла обычной методики РАЗ, дающей закон убывания  $\sim r^{-2}$ . Однако при учете турбулентных искажений волнового фронта звука применимость формулы Маршалла ограничена лишь очень малой высотой

$$r \leq r_t = (c_n \lambda_a / 2\pi)^{3/4} \theta_e^{-5/8}, \quad (14)$$

на которой поперечный радиус когерентности звуковой волны становится сравнимым с поперечным размером ДН РЛС ( $c_n$  - структурная постоянная показателя преломления звука в турбулентной среде [1]). При  $r > r_t$  принимаемый сигнал убывает гораздо быстрее - как  $r^{-26/5}$  [1].

Для низкочастотного звука - в метровом диапазоне длин волн - эффект турбулентного искажения фронта акустического сигнала значительно слабее [2], что позволяет обеспечить измерения

по предлагаемой выше методике на достаточно больших высотах. Следует также отметить, что современные технические средства для излучения радиосигналов в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн обеспечивают более высокую мощность излучения, чем мощность РЛС, обычно используемых в методе РАЗ. Применение таких средств также повышает высоту зондирования.

Для примера оценим возможность зондирования облака со средним размером капель  $r_k = 8,5$  мкм и концентрацией капель  $N = 600$  см<sup>-3</sup>. Функция распределения Хргиана-Мазина капель по диаметрам  $f(D) \sim D^2 \exp(-3D/2r_k)$  (см. [7]) позволяет вычислить величину радиолокационной отражаемости

$$Z = \int f(D)D^6 dD \approx 7N(2r_k)^6 \approx 10^{-19} \text{ м}^{-3}. \quad (15)$$

Если акустическая антенна представляет собой решетку из  $N$  сфазированных монополюсных излучателей [2], то интенсивность звука во Фраунгоферовой зоне определяется величиной

$$G_a W_a = 2N^2 W_0, \quad (16)$$

где  $W_0$  - мощность, излучаемая одним излучателем вблизи акустически жесткой поверхности Земли. Подставляя (16) в формулу (13), получим величину максимальной дальности РАЗ при заданном минимальном уровне мощности принимаемого радиосигнала  $P_r = P_{\min}$ :

$$r_{\max} = \left[ \frac{\pi^2 \ln 2}{2} \left( \frac{\pi W_0}{p_a c_s^3} \right)^{1/2} \frac{NIZ}{\theta_e^2 \lambda_e^2} \frac{P_e}{P_{\min}} \right]^{1/3}. \quad (17)$$

Возьмем значения параметров РЛС (ср. [7]):  $\lambda_e = 8$  мм,  $\theta_e = 0,25^\circ$ .

$P_{\min} = 10^{-12}$  Вт. Если в акустическую антенну входят 16 излучателей мощностью  $W_0 = 250$  Вт (ср. [2]) с длительностью импульса 1 с ( $l \approx 300$  м), то соответствующая РЛС с излучаемой мощностью  $P_e = 300$  кВт может осуществлять зондирование по рассмотренному выше способу до высоты  $r_{\max} \approx 2$  км.

Оценка по формуле (14) для типичной величины  $c_n \sim 10^{-3} \text{ м}^{1/3}$  дает значение  $r_t \approx 7$  км. Следовательно, турбулентные искажения фронта звуковой волны не должны оказывать существенного влияния на дальность РАЗ с амплитудной модуляцией.

В заключение заметим, что предложенный метод может оказаться пригодным для зондирования не только атмосферы, но и других природных сред, а также в лабораторных условиях. Например, используя амплитудную модуляцию лазерного излучения и одновременно излучая звуковые импульсы, можно осуществить измерения профиля температуры приповерхностного слоя океана. Глубина, доступная для такого метода зондирования, определяется масштабом затухания лазерного излучения, распространяющегося вглубь океана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каллистратова М. А., Кон А. И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. - М.: Наука, 1985.
2. Зиничев В. А., Рапопорт В. О. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. н.12. С. 76.

3. Роджерс Р. Р. Краткий курс физики облаков. - Л.: Гидрометеиздат, 1979.
4. Долин Л. С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1977. Т.13. N.10. С.1025.
5. Фабрикант А. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т.31. N.10. С.1160.
6. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. - Л.: Гидрометеиздат, 1978.
7. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1969.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
2 июля 1990 г.

RADIO-ACOUSTIC SOUNDING METHOD  
USING THE AMPLITUDE-MODULATED RADIO WAVES

A.L.Fabrikant

A possibility of using millimeter radio waves for radio-acoustic sounding of the atmosphere is considered. Radio waves are scattered by natural inhomogeneities (drops, aerosol particles) which concentration oscillates in the acoustic wave field. If the amplitude of radiated radio wave is modulated then the modulation frequency of a scattered radio wave is shifted due to Doppler effect. Measuring the modulation frequency shift one can determine the sound velocity in the scattering volume.