

УДК 551.501.724.551 596

О ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ВЕТРОВОГО СНОСА ПРИ НАКЛОННОМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

А. Л. Фабрикант

Рассмотрена возможность взаимной компенсации ветрового сноса и поворота волнового фронта звуковой волны под действием сдвига скорости ветра в методе радиоакустического зондирования. Найдены углы наклонного моностатического зондирования, при которых отраженный радиосигнал фокусируется на передающую антенну.

Развитие метода радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ), основанного на доплеровской радиолокации излучаемой в атмосферу звуковой волны, ограничивается в первую очередь воздействием ветра на распространение акустического волнового пакета [1].

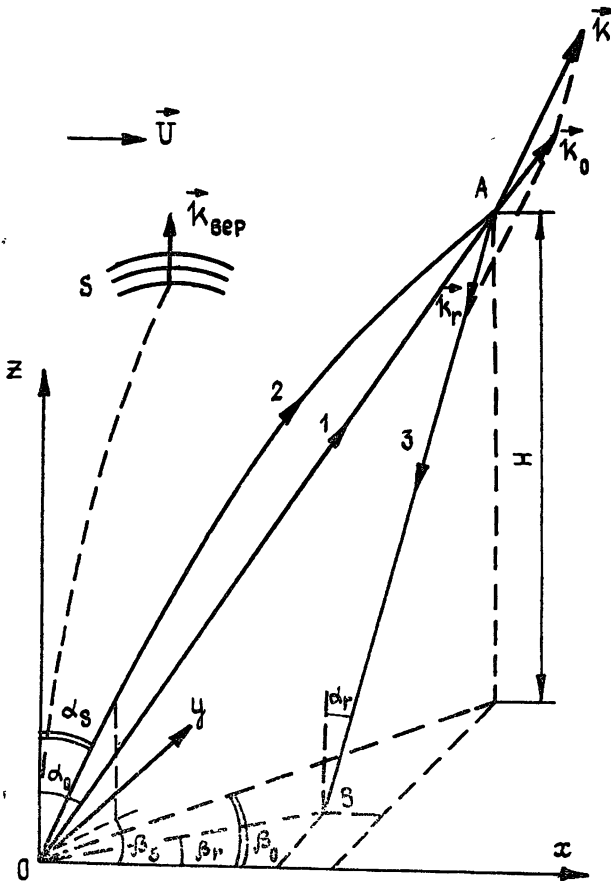


Рис. 1.

Сферическое акустическое «зеркало», отражающее радиоволну, смещается под действием ветрового сноса (\vec{S} — на рис. 1). В результате

положение пятна отраженного радиосигнала, сфокусированного этим «зеркалом» на поверхности Земли при моностатической схеме РАЗ, зависит от скорости ветра и меняется со временем по мере распространения звукового импульса. При этом даже использование бистатической схемы РАЗ оказывается неэффективным: требуется слишком большое число приемных антенн [2] либо передвижная приемная антенна [3], что понижает оперативность метода.

В настоящей работе предлагается способ компенсации ветрового сноса, основанный на использовании наклонного РАЗ и поиске по углу места и азимуту [4]. Если скорость ветра растет с высотой, то при наклонном зондировании происходит одновременно как снос волнового импульса в направлении ветра, так и поворот фазовой скорости звука под действием сдвига скорости ветра. Ниже мы найдем условия, при которых эти два эффекта могут компенсировать друг друга. Для использования такой компенсации в методе РАЗ необходимо осуществлять зондирование под разными углами. Заметим, что известные работы по наклонному РАЗ ограничиваются исследованием возможности зондирования под фиксированными углами [5].

Найдем положение на поверхности пятна радиосигнала, отраженного от звуковой волны, распространяющейся в стационарном сдвиговом течении. В реальных атмосферных условиях можно пренебречь рефракцией звука на неоднородностях температуры по сравнению с ветровой рефракцией, а также рефракцией радиоволн. Дисперсионное уравнение для звуковых волн в однородной движущейся среде имеет вид

$$(\omega - \mathbf{k}\mathbf{U})^2 = c^2 \mathbf{k}^2, \quad (1)$$

где c — скорость звука, ω и \mathbf{k} — частота и волновой вектор акустической волны, $\mathbf{U} = (U_x, U_y, 0)$ — скорость ветра. Поскольку характерный масштаб изменения скорости ветра велик по сравнению с длиной волны звука, используемого при РАЗ, то справедливо приближение геометрической оптики.

Пусть в начале координат излучается направленный радиосигнал под углом α_0 к вертикали и азимутом β_0 (рис. 1). При моностатической схеме РАЗ звуковой сигнал излучается также в начале координат под соответствующими углами α_s и β_s . Звуковой луч будет изогнут под действием ветровой рефракции, в то время как радиолуч представляет собой прямую (прямая OA на рис. 1). Подчеркнем, что звуковой сигнал может быть ненаправленным, и тогда звуковой луч является одним из всевозможных звуковых лучей, вдоль которых излучает источник звука.

Условие пересечения в точке A (рис. 1) радиолуча l и звукового луча 2 с учетом (1) имеет вид

$$\begin{aligned} H \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \beta_0 &= \int_0^H \frac{\partial \omega / \partial k_x}{\partial \omega / \partial k_z} dz = \\ &= \int_0^H \frac{U_x (c - U_x \sin \alpha_s \cos \beta_s - U_y \sin \alpha_s \sin \beta_s) + c^2 \sin \alpha_s \cos \beta_s}{c [(c - U_x \sin \alpha_s \cos \beta_s - U_y \sin \alpha_s \sin \beta_s)^2 - c^2 \sin^2 \alpha_s]^{1/2}} dz, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \beta_0 &= \int_0^H \frac{\partial \omega / \partial k_y}{\partial \omega / \partial k_z} dz = \\ &= \int_0^H \frac{U_y (c - U_x \sin \alpha_s \cos \beta_s - U_y \sin \alpha_s \sin \beta_s) + c^2 \sin \alpha_s \cos \beta_s}{c [(c - U_x \sin \alpha_s \cos \beta_s - U_y \sin \alpha_s \sin \beta_s)^2 - c^2 \sin^2 \alpha_s]^{1/2}} dz, \end{aligned}$$

где $\mathbf{k}_0 = \left(\frac{\omega_0}{c_0} \sin \alpha_0 \cos \beta_0, \frac{\omega_0}{c_0} \sin \alpha_0 \sin \beta_0, \frac{\omega_0}{c_0} \cos \alpha_0 \right)$ и ω_0 — волновой

вектор и частота излучаемой радиоволны, c_0 — скорость света, H — высота зондирования, $\mathbf{k}_s = \left(\frac{\omega}{c} \sin \alpha_s \cos \beta_s, \frac{\omega}{c} \sin \alpha_s \sin \beta_s, \frac{\omega}{c} \cos \alpha_s \right)$ — волновой вектор звука. Поскольку $|U| \ll c$, то условие (2) выполняется при следующем соотношении между углами:

$$\alpha_s - \alpha_0 = - \frac{\langle U_x \rangle \cos \beta_0 + \langle U_y \rangle \sin \beta_0}{c \cos \alpha_0}, \quad (3)$$

$$\beta_s - \beta_0 = \frac{\langle U_x \rangle \sin \beta_0 - \langle U_y \rangle \cos \beta_0}{c \sin \alpha_0},$$

где $\langle U_x \rangle = \frac{1}{H} \int_0^H U_x dz$ и $\langle U_y \rangle = \frac{1}{H} \int_0^H U_y dz$ — компоненты средней по высоте скорости ветра.

В свою очередь направление отраженного из точки A радиолуча Z определяется из условия синхронизма

$$\mathbf{k}_r = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}, \quad (4)$$

где $\mathbf{k}_r = \left(-\frac{\omega_r}{c_0} \sin \alpha_r \cos \beta_r, -\frac{\omega_r}{c_0} \sin \alpha_r \sin \beta_r, -\frac{\omega_r}{c_0} \cos \alpha_r \right)$ — волновой вектор отраженной радиоволны.

С учетом (1) и (3) из условия (4) следует

$$\alpha_r - \alpha_0 = 2(\alpha_s - \alpha_0) + 2 \frac{U_x}{c} \frac{\sin^2 \alpha_0 \cos \beta_0}{\cos \alpha_0} + 2 \frac{U_y}{c} \times \\ \times \frac{\sin^2 \alpha_0 \sin \beta_0}{\cos \alpha_0}, \quad \beta_r - \beta_0 = 2(\beta_s - \beta_0), \quad (5)$$

где U_x и U_y — значения компонент скорости ветра на высоте зондирования H . Выражения (3) и (5) определяют координаты пятна B отраженного радиосигнала на поверхности Земли.

$$x = \frac{2H}{c \cos^3 \alpha_0} \left[\langle U_x \rangle (\cos^2 \beta_0 + \cos^2 \alpha_0 \sin^2 \beta_0) - U_x \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \beta_0 + \right. \\ \left. + \sin^2 \alpha_0 \sin \beta_0 \cos \beta_0 (\langle U_y \rangle - U_y) \right], \quad (6)$$

$$y = \frac{2H}{c \cos^3 \alpha_0} \left[(\langle U_x \rangle - U_x) \sin^2 \alpha_0 \sin \beta_0 \cos \beta_0 + \langle U_y \rangle (\sin^2 \beta_0 + \right. \\ \left. + \cos^2 \alpha_0 \cos^2 \beta_0) - U_y \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \beta_0 \right].$$

Полученное соотношение (6) при $x=0$, $y=0$ определяет условия, при которых пятно отраженного радиосигнала будет иметь те же координаты, что и передающая антенна:

$$\operatorname{tg} \beta_m = \langle U_y \rangle / \langle U_x \rangle, \quad \sin^2 \alpha_m = \frac{\langle U_x \rangle^2 + \langle U_y \rangle^2}{U_x \langle U_x \rangle + U_y \langle U_y \rangle}. \quad (7)$$

Таким образом, при угле места $\alpha_0 = \alpha_m$ и азимуте $\beta_0 = \beta_m$ радиолуча, удовлетворяющих условию (7), эффекты сноса и поворота волнового фронта акустической волны в точке ее пересечения с радиолучом взаимно компенсируются, так что нормаль к акустическому волновому

фронту оказывается направленной вдоль радиолуча. В этом случае эффективное акустическое «зеркало» отражает радиосигнал строго в обратном направлении.

Отметим, что, согласно (7), угол компенсации α_m существует, лишь если $\langle U \rangle^2 / (U \langle U \rangle) < 1$. Это условие выполняется в большинстве практически важных случаев, например, если скорость ветра растет с высотой, не изменяя своего направления. В частности, при $dU/dz = \text{const}$ имеем $\alpha_m = 45^\circ$ — этот частный случай рассмотрен в [6].

Из (7) следует, что действие ветра компенсируется для двух радиолучей под противоположными азимутами $\beta_+ = \beta_m$ и $\beta_- = \beta_m + \pi$.

Доплеровские сдвиги частот отраженных радиоволн относительно излучаемой частоты определяются соотношением

$$\Delta\omega_{\pm} = \frac{2\omega_0}{c_0} (c \pm U_x \sin \alpha_m \cos \beta_m \pm U_y \sin \alpha_m \sin \beta_m). \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) позволяют определить температуру T и компоненты средней скорости ветра:

$$T = \left[\frac{c_0}{4\omega_0 q} (\Delta\omega_{\pm}^+ + \Delta\omega_{\pm}^-) \right]^2, \quad \langle U_x \rangle = \sin \alpha_m \cos \beta_m \frac{\Delta\omega_{\pm}^+ - \Delta\omega_{\pm}^-}{4\omega_0} c_0, \quad (9)$$

$$\langle U_y \rangle = \sin \alpha_m \sin \beta_m \frac{\Delta\omega_{\pm}^+ - \Delta\omega_{\pm}^-}{4\omega_0} c_0,$$

где q — константа в соотношении $c = q\sqrt{T}$.

Для нахождения углов α_m и β_m необходимо обеспечить пересечение радиолуча со звуковым лучом в любом направлении, поэтому направление излучаемых звукового и радиосигнала необходимо менять, чтобы зарегистрировать отраженный радиосигнал с максимальной интенсивностью. При излучении ненаправленного звука поиск облегчается: необходимо менять лишь направление излучения радиосигнала.

Производя зондирование атмосферы рассмотренным выше методом, можно определить вертикальные профили температуры и скорости ветра $\langle U(z) \rangle$, усредненной по высоте. Разность $\langle U(H + \Delta H) \rangle - \langle U(H) \rangle$ дает среднее в интервале $H \div H + \Delta H$ значение локальной скорости ветра на высоте H .

Компенсация ветрового сноса за счет наклонного зондирования под оптимальными углами может повысить дальность РАЗ и ослабить зависимость этого метода дистанционного зондирования от метеословий.

Автор выражает благодарность М. В. Бирюковой за обсуждение и помощь в подготовке текста статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каллистратова М. А., Кон А. И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. — М.: Наука, 1985.
2. Madoka F., Kin-Ichiro A., Yoshihisa M. — Pat. US № 4351188, MKU GO1W, 1/02. 28.09.82.
3. Frankel M. S., Chang J. F., Sanders M. J. // Bull. Am. Met. Soc. 1977. V. 5. № 9. P. 928.
4. А. с. № 1290881 / Фабрикант А. Л. М. кл. G 01 S 13/95 от 24.05.85.
5. Макарова Т. И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. № 5. С. 533.
6. Takahashi T., Masuda Y., Inuki H., Sato T., Tsuda T., Fukao S., Kato S. — In: 5-th Int. Conf. Antennas, 30 march — 2 apr. 1987. Pt. 2. London, 1987. P. 339.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
25 декабря 1987 г.

ON THE COMPENSATION OF A WIND DRIFT IN THE OBLIQUE RADIO-ACOUSTICAL SOUNDING

A. L. Fabrikant

The possibility for mutual compensation of the wind drift and wave front turning due to wind shear is considered for the radio-acoustical sounding method. The method of sounding using this compensation and based on radiation of oblique rays and selection of rays directions is proposed.