

## РАДИОАКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И СДВИГА ВЕТРА В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Зубков О.В., Сидоров Г.И., Величко С.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. Радиоэлектронных систем, тел. (057) 702-15-87,  
E-mail: res@kture.kharkov.ua, тел. (8057) 340-66-08

The results presented in this paper concern the possibility to develop a radio acoustic system for vertical sounding of atmosphere boundary layer in order to measure horizontal wind speed and wind shear above runway. The objective is to provide aircrafts takeoff/landing with meteorological data. Antennas placement scheme and their parameters are shown, the movement process of acoustic wave packet sent out vertically has been described, as well as its displacement caused by horizontal wind. Then, it has been explained the technique of acoustic packet current coordinates measurement, determination of horizontal wind speed vector components and wind vertical shear. The results of metrological performance studying of the radio acoustic measurer are given.

В настоящее время для метеорологического обеспечения авиации используются результаты вычислений сдвига ветра по измерениям скорости и направления ветра контактными датчиками, расположенными на разных уровнях высотных сооружений в зоне аэродрома. Недостатком этого способа является то, что он не позволяет измерять метеопараметры в 300-метровом слое непосредственно над самой взлетно-посадочной полосой (ВПП), а только на расстоянии нескольких километров от нее на высотах не более 40 – 50 метров с пространственно-временной экстраполяцией результатов. Получаемые результаты только приблизительно соответствуют параметрам атмосферы на ВПП, а наиболее опасные атмосферные вихри диаметром 50 – 100 м над ВПП вообще не обнаруживаются.

Сдвиг ветра может быть вычислен по результатам измерения скорости ветра доплеровскими системами акустического или радиоакустического зондирования [1,2,3,4]. Недостатками этих методов является необходимость зондирования в нескольких направлениях внутри выбранного пространства конуса с достаточно большим телесным углом.

В работе предложено радиоакустическое устройство для измерения скорости горизонтального ветра при зондировании атмосферы в одном вертикальном направлении.

На рис. 1 представлены траектория движения акустического пакета под действием ветровых потоков и конфигурация антенной системы радиоакустического измерителя.

Траектории движения акустического пакета под действием воздушных потоков (рис. 1) может быть описана, как перемещение конца радиус – вектора  $R(t)$ , соединяющего точку излучения (начало координат) с текущим местоположением акустического пакета. Длина радиус – вектора, изменяющегося во времени, может быть представлена в виде:

$$R(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t) + Z^2(t)}, \quad (1)$$

и его проекции на оси координат:

$$Z(t) = \frac{R(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}, \quad (2)$$

$$X(t) = \frac{R(t) \operatorname{tg} \alpha(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}, \quad (3)$$

$$Y(t) = \frac{R(t) \operatorname{tg} \beta(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}}, \quad (4)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha(t) = \frac{X(t)}{Z(t)}, \quad \operatorname{tg} \beta(t) = \frac{Y(t)}{Z(t)}. \quad (5)$$

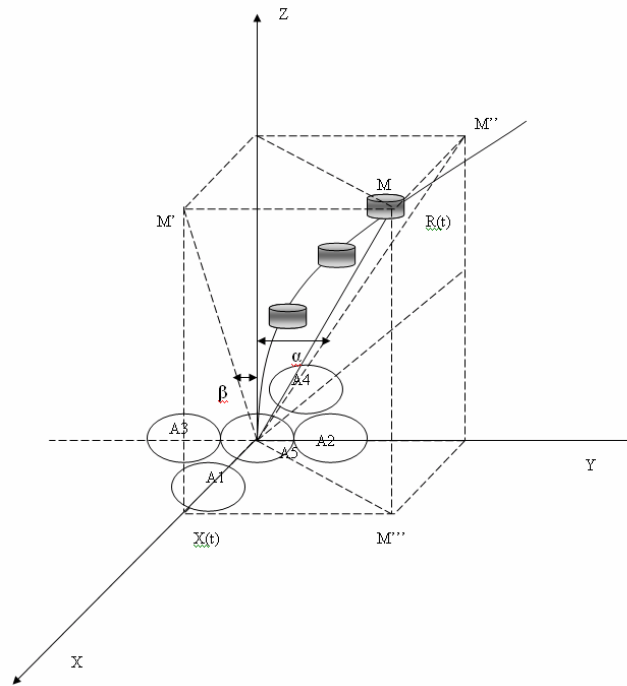


Рис. 1. Траектория движения акустического пакета

Ввиду прямолинейности распространения радиоволн длина вектора  $R(t)$  может быть вычислена по измеренному значению радиальной скорости движения пакета

$$R(t) = \int_0^t V_R(t) dt = \frac{\lambda_e}{2} \int_0^t F_D(t) dt, \quad (6)$$

где  $V_R(t)$  – радиальная скорость распространения акустического пакета,  $\lambda_e$  – длина радиоволны.

Текущие значения углов  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$ , характеризующих угловое положение радиус – вектора  $R(t)$ , содержатся в сигналах, формируемых взаимосвязанными приемными антеннами  $A1, A2, A3, A4$ .

Измеренные значения  $F_D(t)$ ,  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$  поступают в вычислительный блок, где вычисляются составляющие скорости горизонтального ветра по формулам:

$$V_x(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\left[ \frac{\lambda_e}{2} \int_0^t F_D(t) dt \right] \operatorname{tg} \alpha(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}} \right\}, \quad (7)$$

$$V_y(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\left[ \frac{\lambda_e}{2} \int_0^t F_D(t) dt \right] \operatorname{tg} \beta(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}} \right\}. \quad (8)$$

При этом модуль сдвига горизонтального ветра на высотах  $Z_j$  и  $Z_i$  вычисляется по формуле:

$$g_{(j-i)} = |V_r(t_j)| - |V_r(t_i)| = \sqrt{[V_x(t_j)]^2 + [V_y(t_j)]^2} - \sqrt{[V_x(t_i)]^2 + [V_y(t_i)]^2}. \quad (9)$$

Направление сдвига горизонтального ветра вычисляется по формуле

$$\Delta\gamma_{(j-i)} = \gamma_j - \gamma_i = \arctg \frac{V_y(t_j)}{V_x(t_j)} - \arctg \frac{V_y(t_i)}{V_x(t_i)}. \quad (10)$$

Представляет интерес оценка погрешности измерений описанным радиоакустическим измерителем. Согласно теории косвенных измерений, если измеряемая величина  $Y$  есть функция многих переменных  $x_i$ , то среднеквадратичная ошибка может быть вычислена по формуле

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (11)$$

В данном случае среднеквадратичная погрешность измерения скорости ветра

$$\sigma_V = \sqrt{\left( \frac{\partial V}{\partial \lambda_e} \right)^2 \sigma_{\lambda_e}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial F_0} \right)^2 \sigma_{F_0}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_{\beta}^2}. \quad (12)$$

С учетом (7) среднеквадратичная погрешность измерения составляющей скорости  $V_x$

$$\sigma_{V_x} = \sqrt{\frac{F_0^2 tg^2 \alpha}{4(1+tg^2 \alpha + tg^2 \beta)} \cdot \sigma_{\lambda}^2 + \frac{\lambda_e^2 tg^2 \alpha}{4(1+tg^2 \alpha + tg^2 \beta)} \cdot \sigma_{F_0}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_0^2 (1+tg^2 \beta)^2}{4 \cos^4 \alpha (1+tg^2 \alpha + tg^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_0^2 tg^2 \alpha tg^2 \beta}{4 \cos^4 \beta (1+tg^2 \alpha + tg^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\beta}^2}. \quad (13)$$

Аналогично оценивается среднеквадратичная погрешность измерения  $V_y$ .

Результаты математического моделирования, базирующиеся на выведенных математических зависимостях показали, что в диапазоне отношений сигнал/шум от 10 до 100 абсолютная среднеквадратичная погрешность измерения составляющих скорости ветра  $V_x$  и  $V_y$  находится в пределах от 0,34 м/с до 0,11 м/с. Среднеквадратичная погрешность оценки вертикальной составляющей скорости ветра не превышает 0,08 м/с. Данный результат полностью удовлетворяет требования автоматизированных систем управления воздушным движением в зоне аэропортов.

Представленный радиоакустический измеритель обеспечивает измерения мгновенных профилей горизонтального ветра в атмосферном пограничном слое и его вертикального сдвига при вертикальном зондировании.

#### Литература

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли. Под ред. Б.Л.Кашеева, Е.Г.Прошкина, М.Ф.Лагутина. Глава 2. Радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы. Харьков, ХНУРЭ: 2002г.стр.49-100.
2. М.А.Каллистратова, А.И.Кон. Радиоакустическое зондирование атмосферы, М. «Наука»: 1985г. –187с.
3. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. - Новосибирск: Наука, 1986. - 167 с.
4. Angevine W.M., Ecklund W.L., Carter D.A., Gage K.S., Moran K.P. Improved radio acoustic sounding techniques // J. of Atmos. Oceanic Technol. - 1994. - Vol.11, №2. – P.121-127.