

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

В настоящее время для метеорологического обеспечения авиации используются результаты измерений сдвига ветра с помощью контактных датчиков, 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, а только на расстоянии нескольких километров от нее на высотах не более 40 – 50 м с пространственно-временной экстраполяцией результатов. Получаемые результаты только приблизительно соответствуют параметрам атмосферы над ВПП, а наиболее опасные атмосферные вихри диаметром 50 – 100 м вообще не обнаруживаются.

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

В работе [5] приведено описание структурной схемы радиоакустического устройства для измерения вертикального сдвига горизонтального ветра при зондировании атмосферы в одном вертикальном направлении. Представляет интерес анализ технических и метрологических характеристик такого устройства на этапе проектирования, что и является темой данной статьи.

На рис. 1 представлены траектория движения акустического пакета под действием ветровых потоков и конфигурация антенного блока радиоакустического измерителя. Траектория движения излученного вертикально вверх 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 [6]:

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

а 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 α и β – углы между проекциями радиус-вектора R на плоскостях XOZ и YOZ и осью координат OZ ,

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

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

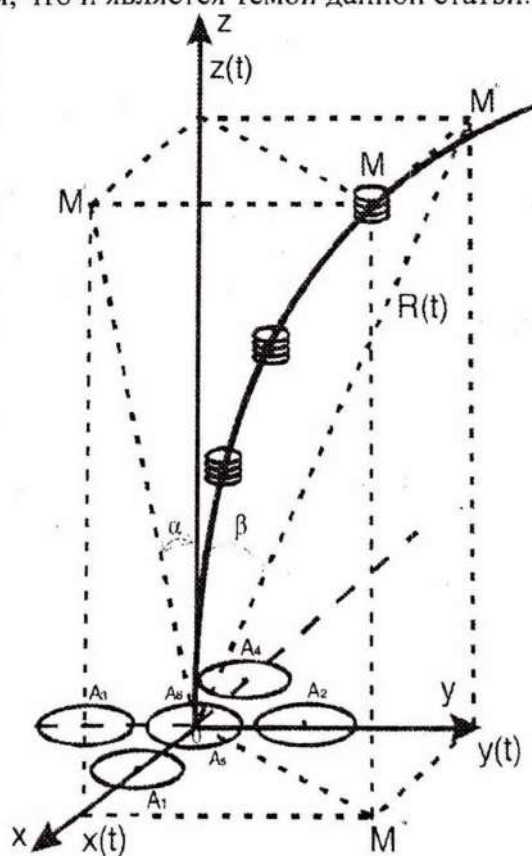


Рис 1. Траектория движения акустического пакета

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

где $V_R(t)$ – радиальная скорость распространения акустического пакета, λ_e – длина радиоволны, $F_D(t)$ – доплеровский сдвиг частоты отраженного радиосигнала.

Текущие значения углов $\alpha(t)$ и $\beta(t)$, характеризующих угловое положение радиус-вектора $R(t)$ в плоскостях XOZ , YOZ , содержатся в сигналах, формируемых взаимосвязанными приемными антеннами A_1, A_2, A_3, A_4 в результате соосного облучения радиосигналом акустического импульса, излученного вертикально вверх, и рассеяния на нем. Обработка сигналов осуществляется фазовым методом радиопеленгации.

На рис. 2 дано расположение антенн системы радиоакустического зондирования.

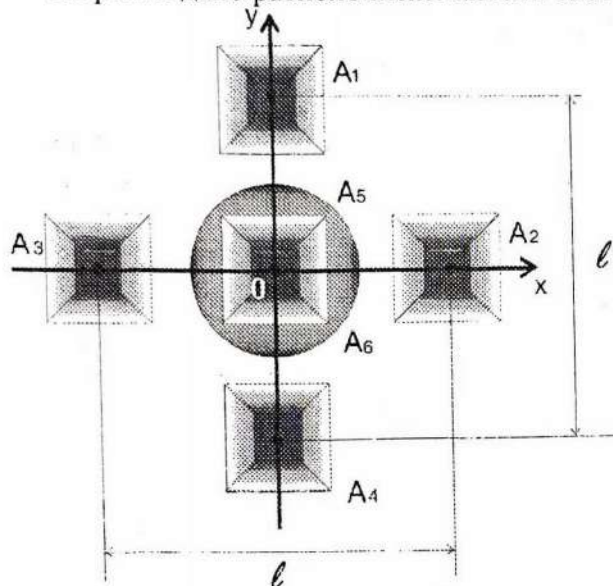


Рис. 2. Конфигурация антенного блока системы радиоакустического зондирования

Передающая радиоантенна A_5 и акустическая антенна A_6 расположены соосно и их центры совпадают с началом координат O , а электрические оси – с направлением оси OZ . Приемные антенны A_1 – A_4 расположены таким образом, что их геометрические центры находятся на координатных осях OX и OY (A_1 и A_4 на оси OX , A_2 и A_3 на оси OY) на равных расстояниях от начала координат:

$$O(OA_1=OA_2=OA_3=OA_4=\ell/2,$$

где ℓ – база пеленгатора).

Величина ℓ является одним из наиболее существенных параметров системы, поскольку она определяет крутизну пеленгационной характеристики системы (точность определения угла), а также неоднозначность измерений, вызванную набегом фазы, кратным π .

Пеленгационная характеристика фазового пеленгатора [7], построенная для малых углов отклонения направления на цель от нормали к базе, например в плоскости XOZ , когда $\sin\alpha \approx \alpha$

$$U_{\text{вых}} = k \cdot \sin\left(\frac{2\pi\ell}{\lambda_e} \alpha\right). \quad (6)$$

Отсюда видно, что однозначные показания пеленгатора $\alpha_{\text{одн}}$ получаются, если угол $2\pi\ell\alpha/\lambda_e$ не выходит за пределы π (от $-\pi/2$ до $+\pi/2$), что соответствует

$$\alpha_{\text{одн}} = \frac{\pi\lambda_e}{2\pi\ell} = \frac{\lambda_e}{2\ell}. \quad (7)$$

Из соотношений (6) и (7) видно, что в фазовых пеленгаторах имеется противоречие между точностью измерений и пределами однозначных показаний: для повышения точности нужно увеличивать базу ℓ , а для расширения пределов однозначных измерений пеленга цели – уменьшать ℓ .

В нашем случае построения системы вертикального радиоакустического зондирования минимальная величина базы ℓ ограничена поперечными размерами $d_{\text{нпр}}$ совмещенной акустической и радиопередающей антенн и $d_{\text{пр}}$ приемной радиоантенны

$$\ell_{\text{min}} = d_{\text{нпр}} - 0,5d_{\text{нпр}} - 0,5d_{\text{нпр}} = d_{\text{нпр}} - d_{\text{пр}}. \quad (8)$$

В общем случае величина базы ℓ определяется требуемым диапазоном однозначно измеряемых углов $\alpha_{\text{одн}}$ по формуле

$$\ell \leq \frac{\lambda_e}{2\alpha_{\text{одн}}}. \quad (9)$$

При радиоакустическом зондировании максимально возможное угловое отклонение центра акустического пакета от вертикали за счет сноса его горизонтальным ветром составляет $\alpha_{\max}$. Путем несложных геометрических построений можно определить, что даже при очень сильном ветре 30 м/с (108 км/ч), постоянном по высоте зондирования, отклонение пакета в одной плоскости не превысит 6 градусов $\left(\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{V_x}{V_{30}} \approx 0,1 \text{ рад} \approx 6^\circ \right)$.

В этом случае $\ell_{\max} = 5\lambda_e$. При значении $V_x = 15 \text{ м/с}$ $\ell_{\max} = 10\lambda_e$.

Диаметр радиопередающей и акустической антенн определяется необходимой шириной диаграммы направленности на уровне $\theta_{0,5}$ половинной мощности. Необходимо, чтобы даже при максимальном сносе пакета горизонтальным ветром в любом направлении центр его всегда находился в пределах ширины диаграммы направленности $\theta_{0,5e}$ передающей радиоантенны и всегда облучался электромагнитной энергией. Логично положить, что

$$\theta_{0,5e} = 2\alpha_{\max} \approx 12^\circ.$$

При использовании одного и того же параболического отражателя с учетом соотношения $\lambda_e = 2\lambda_a$ при радиоакустическом зондировании ширина диаграммы направленности передающей акустической антенны и, следовательно, угловой размер акустического пакета составляет $\theta_{0,5s} = 6^\circ$.

Оценим значения диаметра передающей антенны:

$$\theta_{0,5e} \approx 60\lambda_e / d_{\text{пер}}, \quad (10)$$

$$\text{получим } d_{\text{пер}} \approx 60\lambda_e / \theta_{0,5e} = \frac{60\lambda_e}{12} = 5\lambda_e.$$

Ширина диаграмм направленности приемных радиоантенн не является существенным параметром, поскольку при фазовом методе пеленгации направленные свойства антенн не используются для получения пеленгационной характеристики. Идентичные диаграммы направленности приемных антенн должны перекрывать рабочую зону системы, а также обеспечивать минимальную мертвую зону на начальном участке траектории акустического пакета.

При ширине диаграмм направленности приемных антенн 30 градусов протяженность мертвой зоны $20d_{\text{пр}} = 10\lambda_e$. При этом диаметры зеркальных приемных антенн:

$$d_{\text{пр}} = 2\lambda_e.$$

Измеренные значения $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и четыре значения $F_{D_i}(t)$, полученные в каждом из четырех приемных каналов, поступают в вычислительный блок, в котором вычисляется среднее значение

$$F_D(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 F_{D_i}(t).$$

Составляющие горизонтального ветра вычисляются в соответствии с формулами:

$$V_x(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\lambda_e}{2} \int_0^t \frac{F_D(t) \cdot \operatorname{tg} \alpha(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}} dt \right), \quad (11)$$

$$V_y(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\lambda_e}{2} \int_0^t \frac{F_D(t) \cdot \operatorname{tg} \beta(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}} dt \right). \quad (12)$$

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

$$g(j-i) = |V_R(t_j)| - |V_R(t_i)| = \sqrt{[V_x(t_j)]^2 + [V_y(t_j)]^2} - \sqrt{[V_x(t_i)]^2 + [V_y(t_i)]^2}. \quad (13)$$

Направление сдвига горизонтального ветра вычисляется по формуле

$$\Delta\gamma_{(j-i)} = \gamma_j - \gamma_i = \arctg \frac{V_y(t_j)}{V_x(t_j)} - \arctg \frac{V_y(t_i)}{V_x(t_i)}. \quad (14)$$

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 [8]:

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (15)$$

В данном случае среднеквадратичная погрешность измерения скорости ветра

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \lambda_e} \right)^2 \sigma_{\lambda_e}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial F_D} \right)^2 \sigma_{F_D}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_{\beta}^2}. \quad (16)$$

С учетом (10,11) среднеквадратичная погрешность измерения составляющих скорости V_x и V_y

$$\sigma_{V_x} = \sqrt{\frac{F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4(1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{\lambda_e}^2 + \frac{\lambda_e^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4(1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{F_D}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 (1+\operatorname{tg}^2 \beta)^2}{4 \cos^4 \alpha (1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cos^4 \beta (1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\beta}^2}, \quad (17)$$

$$\sigma_{V_y} = \sqrt{\frac{F_D^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{4(1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{\lambda_e}^2 + \frac{\lambda_e^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{4(1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{F_D}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cos^4 \alpha (1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 (1+\operatorname{tg}^2 \alpha)^2}{4 \cos^4 \beta (1+\operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\beta}^2}.$$

Потенциальная суммарная среднеквадратичная погрешность измерений определяется потенциальными среднеквадратичными погрешностями измерений углов α и β , доплеровской частоты F_D и длины электрической волны λ_e . Значения этих погрешностей являются функциями измеряемых величин и соотношения сигнал/шум. В работе [1] приведены значения потенциальных погрешностей σ_{F_D} и σ_{λ_e} , которые реализуются в различных системах радиоакустического зондирования:

$$\sigma_{F_D}^2 = 10^{-4} \Gamma \eta^2; \quad \sigma_{\lambda_e}^2 = 10^{-4} M^2.$$

Потенциальная среднеквадратичная ошибка измерения угловых координат фазовым методом [7], например для угла α

$$\sigma_{\alpha \text{ пот}} = \frac{\lambda_e}{2\pi \cdot \ell \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{q}}, \quad (18)$$

где q – отношение сигнал/шум по мощности.

Определим значение среднеквадратических ошибок для случаев минимального и максимального отклонений траектории движения акустического пакета от вертикали при минимальном и максимальном значениях горизонтального ветра (1...30 м/с). ($\alpha_{\min} = 0,003 \text{ рад}$; $\alpha_{\max} = 0,09 \text{ рад}$). Принимаем значения $\frac{l}{\lambda_e} = 50$; $q = 25$. Тогда

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,9998 \cdot \sqrt{25}} \approx 0,0006 \text{ рад} \approx 0,036^\circ; \quad \sigma_{\beta} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,9942 \cdot \sqrt{25}} \approx 0,0006 \text{ рад} \approx 0,036^\circ.$$

Для примера, задавшись значениями длины волны $\lambda_e=0,5$ м, доплеровского сдвига частоты $F_d=1368$ Гц, углов сноса пакета в плоскостях XOZ и YOZ $\alpha = \beta = 2^\circ$, с учетом ранее вычисленных значений потенциальных погрешностей $c_{\lambda_e}, c_{F_d}, c_{\alpha}, c_{\beta}$ получим

$$\sigma_{V_x} = \sqrt{5,68 \cdot 10^{-6} + 7,6022 \cdot 10^{-9} + 0,0419728 + 0,061956 \cdot 10^{-6}} = 0,20488 \text{ м/с},$$

$$\sigma_{V_y} = \sqrt{5,68 \cdot 10^{-6} + 7,6022 \cdot 10^{-9} + 0,061956 \cdot 10^{-6} + 0,0419728} = 0,20488 \text{ м/с}.$$

Представляет интерес анализ суммарных потенциальных погрешностей составляющих скорости горизонтального ветра во всем исследуемом диапазоне высот от 10 до 300 м. Для этого сначала необходимо исследовать зависимость соотношения сигнал/шум от дальности зондирования (высоты подъема акустического пакета).

В радиолокационных системах фазовый фронт волны, облучающей объект, принимается плоским в пределах дальностей, на которых формируется отраженный сигнал. Требование плоского фазового фронта волны в радиолокации определяет синфазность возбуждения вторичных источников на поверхности наблюдаемого объекта, а в системах РАЗ выполнение такого требования обеспечивается геометрическим расположением акустической и радиоантенн в непосредственной близости друг от друга. В результате сферические фронты акустической и радиоволн практически совпадают и фактически выполняются требования, предъявляемые в радиолокации при облучении точечных объектов.

В качестве исходного соотношения, с помощью которого может быть решена поставленная задача, используем формулу для мощности принятого сигнала P_r [2]:

$$P_r = G_t \cdot G_r \cdot G_s \cdot B \cdot N^2 \cdot P_e \cdot P_s \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-0,1\delta \cdot R}}{R^2}, \quad (19)$$

где P_r – мощность принятого радиосигнала, Вт; P_s – излучаемая акустическая мощность, Вт; N – число длин волн в акустическом пакете; θ – наименьший из углов раскрытия диаграмм направленности звуковой и радио- антенн, град; R – средняя дальность зондирования, м; δ – коэффициент ослабления (по мощности) акустической волны, дБ/м; B – коэффициент, определяемый точностью выполнения условия Брэгга в пределах пакета, в предельном случае $B = 1$; G_t – коэффициент усиления передающей радиоантенны; G_r – коэффициент усиления приемной радиоантенны; G_s – коэффициент усиления акустического излучателя.

Коэффициент классического поглощения звука, обусловленного вязкостью и теплопроводностью воздуха, определяется формулой

$$\alpha_{\Pi} = \frac{53,54 \cdot \eta \cdot f_s^2}{p \cdot c_s}, \text{ м}^{-1}, \quad (20)$$

где η – вязкость воздуха; p – атмосферное давление; c_s – скорость звука; f_s – частота звука.

Для обычных атмосферных условий количественная оценка коэффициента поглощения может быть получена из соотношения

$$\alpha_{\Pi} \approx 4,24 \cdot 10^{-11} f_s^2, \text{ м}^{-1}. \quad (21)$$

Величина погонного затухания акустической волны δ (дБ/м) может быть получена из формулы

$$\delta = 10 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot \lg e. \quad (22)$$

Для высокоточных измерений параметров отраженного радиосигнала необходимо иметь соотношение сигнал/шум на входе приемника не менее 30...40 дБ. Мощность шумов в приемнике определяется по формуле

$$P_{\text{ш}} = k \times T \times \Delta f (K_{\text{ш}} - 1) \cdot k_{\Pi}, \quad (23)$$

где $K_{ш}$ – коэффициент шума; $k_{л}$ – коэффициент потерь; Δf – эффективная ширина полосы пропускания, k – постоянная Больцмана.

$K_{ш} = 3$; $k_{л} = 5$; $T = 300$ К; $\Delta f = 10$ Гц, получим $P_{ш} = 4,14 \cdot 10^{-19}$ Вт

Коэффициенты усиления передающей и приемной антенн вычисляются по формуле

$$G_t = G_r = G_s = \frac{25000}{\theta^\circ}, \quad (24)$$

где θ° – угол раскрыва антенны в градусах.

$$\delta = 10 \cdot 7,47 \cdot 10^{-5} \cdot 0,43 = 3,32 \cdot 10^{-4} (\text{дБ/м}).$$

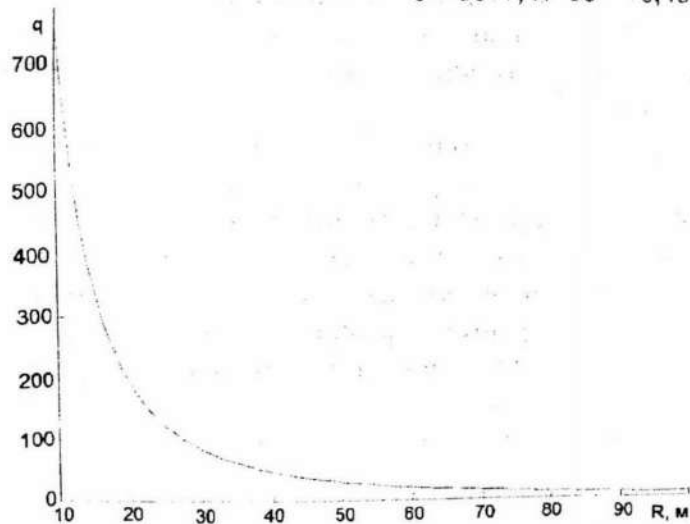


Рис. 3. График зависимости отношения сигнал/шум от дальности

Результаты расчетов отношения сигнал/шум, которое обозначим $q = P_r/P_{ш}$ приведены на рис. 3.

По приведенным формулам выполнены оценочные расчеты энергетического потенциала системы радиоакустического зондирования при следующих технических характеристиках системы:

$N = 30$; $B = 1$; $\theta = 6^\circ$; $R = 10, 20 \dots 330$ м;

$P_e = 5$ Вт; $P_s = 25$ Вт;

$G_t = 25000/12 = 2083,333$;

$G_r = 25000/20 = 1250$;

$G_s = 25000/6 = 4166,667$;

$\alpha = 4,24 \cdot 10^{-11} \cdot 1328^2 = 7,47 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$;

$$\delta = 10 \cdot 7,47 \cdot 10^{-5} \cdot 0,43 = 3,32 \cdot 10^{-4} (\text{дБ/м}).$$

В соответствии с рекомендациями [9] необходимо измерять скорость ветра на высотах 30, 60 и 90 м над ВПП, следовательно необходимо исследовать зависимость суммарной погрешности измерений от соотношения сигнал/шум по формулам (16), (17). Результаты расчетов приведены на рис. 4.

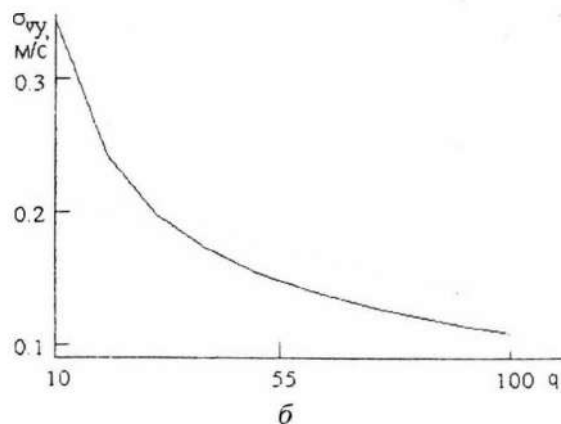
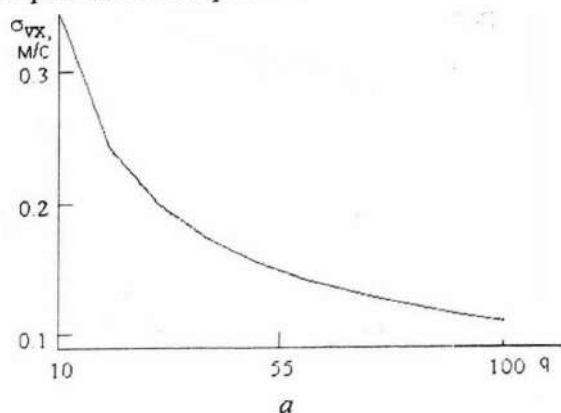


Рис. 4. Графики зависимости σ_{V_x} и σ_{V_y} от q

Анализ полученных зависимостей показывает, что предложенный способ определения сдвига горизонтальных составляющих скорости ветра при вертикальном радиоакустическом зондировании при оговоренных выше технических параметрах обеспечивает допустимые значения потенциальных среднеквадратичных погрешностей в случае однократного зондирования при соотношениях сигнал/шум не менее 20, что соответствует высотам до 62 м. Для обеспечения измерений до высот 100 м при малых отношениях сигнал/шум необходимо производить многократное зондирование и, считая распределение ошибок измерений нормальным, усреднять полученные результаты. При этом, как известно, среднеквадратичная

погрешность измерений уменьшается в $\sqrt{n}$, где n – количество измерений. Как видно из сопоставления рис. 3 и 4, для измерений на высоте 100 м количество зондирований должно быть не менее 6.

Следовательно, рассматриваемая радиоакустическая система вертикального зондирования удовлетворяет требованиям автоматизированных систем управления воздушным движением в зоне аэропорта, обеспечивая измерения горизонтального ветра и его вертикального сдвига с допустимыми погрешностями.

Литература. 1. *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли* / Под ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Гл. 2. Радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы. Харьков, ХНУРЭ. 2002. С.49-100. 2. *Каллистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 187 с. 3. *Красненко Н. П.* Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с. 4. *Angevine W.M., Ecklund W.L., Carter D. A., Zage K.S., Moran K. P.* Improved radio acoustic sounding techniques // J. of Atmos. Oceanic Technol. 1994. Vol.11, №2. P.121-127. 5. *Авторское свидетельство СССР №1689899* от 8 июля 1991 г. «Радиоакустическое устройство для измерения сдвига ветра» / Г.И. Сидоров и др. 6. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с. 7. *Белоцерковский Г. Б.* Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Сов. радио, 1975. 336 с. 8. *Зайдель А. Н.* Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с. 9. *Баранов А. М.* Авиационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат. 1981. 384с.

Сарьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.02.2009