

УДК 621.396.9:551.508.859

**Карташов В.М., Сідоров Г. І., Колендовська М.М., Шейко С.О., Шаповалов С.В.**  
Харківський національний університет радіоелектроніки

### **РАДІОАКУСТИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ ШВИДКОСТІ ВІТРУ У АТМОСФЕРНОМУ ПРИКОРДОННОМУ ШАРІ**

*В цій роботі пропонується радіоакустичний вимірювач швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі при випромінюванні імпульсного акустичного і безперервного радіосигналів співісними антенами тільки в вертикальному напрямку. Створення математичної моделі радіоакустичного вимірювача швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі при зондуванні в одному вертикальному напрямку для метеорологічного забезпечення авіації необхідно вимірювати швидкість вітру на різних висотах. Для вирішення цих завдань ефективним є використання систем дистанційного дослідження атмосферного прикордонного шару на основі акустичного і радіоакустичного методів.*

**Ключові слова:** *радіоакустичний вимірювач, антена, передавач, швидкість вітру, висота, акустична система, доплерівська радіоакустична система*

У зв'язку з необхідністю забезпечення енергетичної безпеки в багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні, ведуться розробки альтернативних поновлюваних джерел енергії, до яких належать і високоефективні вітроенергетичні установки, які розміщуються на щоглах висотою до 100 метрів. Розміщення вітроенергетичних установок доцільно тільки в місцевостях з інтенсивними вітрами, тому при їх проектуванні та експлуатації необхідні дослідження вітрової обстановки в передбачуваних місцях розміщення. Для метеорологічного забезпечення авіації необхідно вимірювати швидкість вітру на висотах 30, 60 і 90 метрів над злітно-посадковою смугою. Для вирішення цих завдань ефективним є використання систем дистанційного дослідження атмосферного прикордонного шару на основі акустичного і радіоакустичного методів.

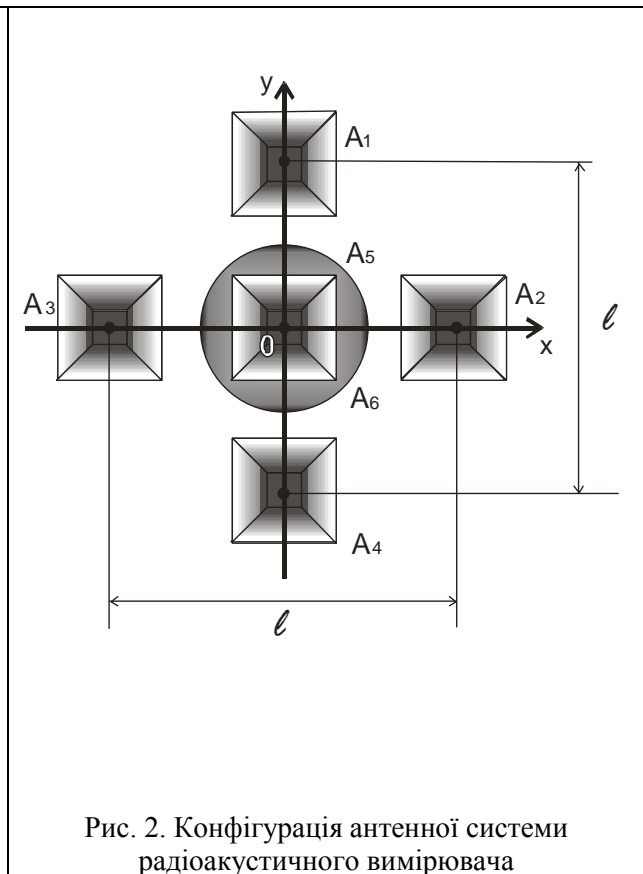
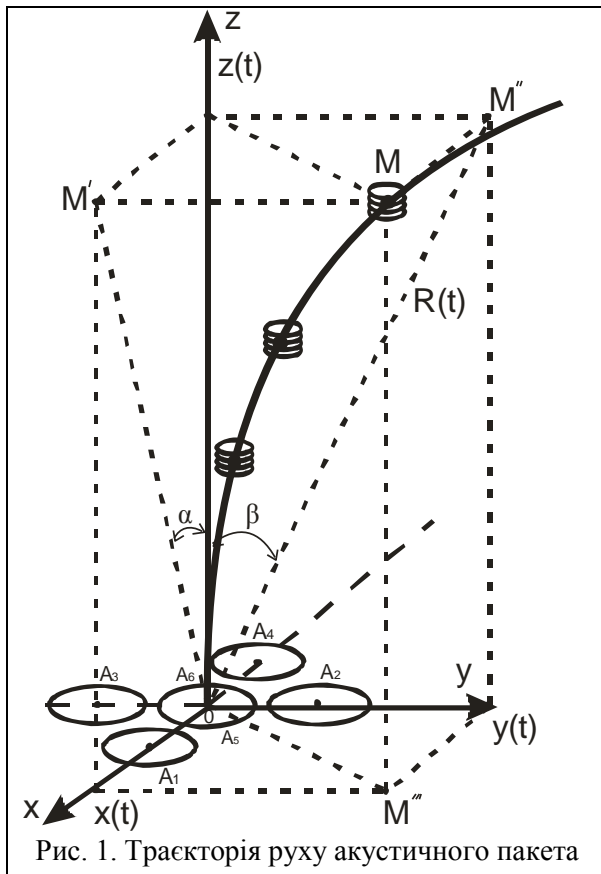
У літературі описані застосовувані для цих цілей доплерівські радіоакустичні системи [1, 2, 3]. Недоліком всіх цих систем є необхідність зондування в декількох напрямках, в результаті чого утворюються поверхні вертикального або похилого конуса з досить великим тілесним кутом, що забезпечується або сукупністю кількох радіоакустичного каналів, постійно орієнтованих в обраних напрямках, або одним каналом, при цьому діаграми спрямованості переміщуються в межах обраного конуса зондування. [4, 5, 6, 7, 8]

Нами пропонується радіоакустичний вимірювач швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі при випромінюванні імпульсного акустичного і безперервного радіосигналів співісними антенами тільки в вертикальному напрямку. Прийом відбитих від рухомої акустичної хвилі радіосигналів здійснюється чотирма приймальними антенами, розташованими в горизонтальній площині навколо передавальної антени.

Ця конфігурація радіоакустичного вимірювача запатентована одним з авторів статті Сідоровим Г.І. [8].

Метою дослідження є створення математичної моделі радіоакустичного вимірювача швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі при зондуванні в одному вертикальному напрямку. Необхідно досліджувати метод відстеження траєкторії руху акустичного пакета під впливом вітрових потоків, вимірювання на підставі цього швидкості переміщення повітряних мас. Завданням також є дослідження застосовності методу фазової радіопеленгації у вимірювачі, оцінка похибки вимірювання швидкості вітру на кожній з висот при обраних технічних характеристиках пристроїв, що входять до складу вимірювача.

У статті викладені результати дослідження можливостей радіоакустичного вимірювача по виміру повного вектора швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі, проаналізовано похибки вимірювання на різних висотах над поверхнею Землі. На рис. 1 представлена траєкторія руху випроміненого акустичного пакета з урахуванням зносу вітровими потоками, на рис. 2. представлена конфігурація розміщення передавальних і приймальних антен вимірювача на поверхні Землі.



Траекторія руху випроміненого вертикально вгору акустичного пакета під дією повітряних потоків може бути описана як переміщення кінця радіус-вектора  $R(t)$ , що з'єднує точку випромінювання (початок координат) з поточним місцем розташування акустичного пакета. Довжина радіус-вектора, що змінюється в часі, може бути представлена у вигляді [9].

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

А його проекції на вісі координат

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

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

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

де

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

З огляду на прямолінійність поширення радіохвиль довжина радіус-вектора  $R(t)$  може бути обчислена за вимірюваним значенням радіальної швидкості руху пакета

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

де  $V_R(t)$  - радіальна швидкість поширення акустичного пакета,  $\lambda_e$  - довжина радіохвилі,  $F_D(t)$  - доплерівській зсув частоти відбитого сигналу.

Поточні значення кутів  $\alpha(t)$  та  $\beta(t)$  які характеризують кутове положення радіус-вектора  $R(t)$  в площинах  $XOZ$  і  $YOZ$ , містяться в сигналах, що формуються взаємопов'язаними приймальними антенами  $A1, A2, A3, A4$  внаслідок співвісного опромінення безперервним радіосигналом акустичного імпульсу, що випромінює вертикально вгору.

Передавальна радіоантена  $A5$  і акустична антена  $A6$  використовують один загальний параболічний відбивач і співвісні випромінювачі, розміщені в фокусі спільного параболічного дзеркала, проекція яких на площину  $XOY$  збігається з початком координат, а електричні вісі - з напрямком осі  $OZ$ . Приймальні антени  $A1-A4$  розташовані таким чином, що їх геометричні центри знаходяться на координатних вісях  $OX$  та  $OY$  ( $A1$  і  $A4$  на вісі  $OY$ ,  $A2$  та  $A3$  на вісі  $OX$ ) на рівних відстанях від початку координат ( $OA1=OA2=OA3=OA4=l/2$ , де  $l$  – база пеленгатора в складі радіоакустичного вимірювача).

Величина  $l$  є одним з найбільш істотних параметрів системи, оскільки вона визначає крутизну її пеленгаційної характеристики (точність визначення кута), а також неоднозначність вимірювань, викликану набігом фази, кратним  $2\pi$ . Тому можна стверджувати, що мінімальна величина бази  $l$  обмежена розмірами  $d_t$  суміщених дзеркальних акустичної та радіопередавальної антен ( $l > l_{\min} = d_t$ ), а максимальна її величина обмежена відстанню, при якому ще забезпечується однозначність вимірювань  $l < l_{\max}$ . Величина  $l_{\max}$  в площині  $XOY$  [10]:

$$l_{\max} = \frac{\Delta\varphi\lambda_e}{2\pi \sin \alpha_{\min}}, \quad (7)$$

при  $\Delta\varphi = 2\pi$

$$l_{\max} = \lambda_e / \sin \alpha_{\min}. \quad (8)$$

Звідси видно, що при заданій довжині хвилі  $\lambda_e$  величина  $l_{\max}$  визначається мінімальним вимірюваним кутом  $\alpha_{\min}$ . У разі радіоакустичного зондування величина  $\alpha_{\max}$  – це максимально можливе відхилення центру акустичного пакета за рахунок знесення його горизонтальним вітром. Шляхом нескладних геометричних побудов можна визначити, що навіть при дуже сильному вітрі  $30 \text{ м / с}$  ( $108 \text{ км / ч}$ ), постійному по висоті зондування, відхилення пакету в одній площині не перевищить  $6$  градусів ( $\alpha \approx \text{tg}\alpha = V_x / V_s \approx 0,1 \text{ rad} \approx 6^\circ$ ).

В цьому випадку  $l_{\max} = 10\lambda_e$ . При значенні  $V_x = 5 \text{ м/с}$   $l_{\max} = 60\lambda_e$ .

Діаметр відбивачів радіопередавальної та акустичної дзеркальних антен визначається перш за все необхідною шириною діаграми спрямованості на рівні  $\theta_{0,5}$  половинної потужності. Необхідно, щоб навіть при максимальному знесенні пакета вітром центр його завжди знаходився в межах ширини діаграми спрямованості передавальної радіоантени і завжди опромінювався електромагнітної енергією. Логічно тому покласти, що  $\theta_{0,5e} = 2\alpha_{\max} \approx 12^\circ$ .

При використанні одного і того ж параболічного відбивача для передавальної акустичної антени  $\theta_{0,5a} = 6^\circ$ . Таке співвідношення між діаграмами спрямованості акустичної та радіо антен вибрано з метою максимальної концентрації енергії. Виходячи зі співвідношення

$$\theta_{0,5e} \approx 60\lambda_e / d_t. \quad (9)$$

Отримаємо:

$$d_t \approx 60\lambda_e / \theta_{0,5e} = 60\lambda_e / 12 = 5\lambda_e.$$

Ширина діаграм спрямованості приймальних радіоантен не є суттєвим параметром, оскільки при фазовому методі пеленгації спрямовані властивості антен не використовуються для отримання пеленгаційної характеристики. Ідентичні діаграми спрямованості приймальних антен повинні перекривати робочу зону системи, а також забезпечувати мінімальну мертву зону на початковій ділянці траєкторії акустичного пакета.

При ширині діаграм спрямованості приймальних антен 30 градусів протяжність мертвої зони дорівнює  $20d_t = 10\lambda_e$ . При цьому діаметри дзеркальних приймальних антен дорівнюватимуть  $d_t = 2\lambda_e$ .

Виміряні значення  $F_D(t)$ ,  $\alpha(t)$  та  $\beta(t)$  надходять в обчислювальний блок, де обчислюються складові швидкості горизонтального вітру за формулами:

$$V_x(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\left[ \frac{\lambda_e}{2} \int_0^t F_D(t) dt \right] \cdot \operatorname{tg} \alpha(t)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(t) + \operatorname{tg}^2 \beta(t)}} \right), \quad (10)$$

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

Цікавим є оцінка похибки вимірювань описаним радіоакустичним вимірником. Відповідно до теорії непрямих вимірювань, якщо вимірювана величина  $Y$  є функція багатьох змінних  $X_i$ , то середньоквадратична помилка може бути обчислена за формулою [11]:

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}, \quad (12)$$

В даному випадку середньоквадратичне похибка вимірювання швидкості вітру

$$\sigma_V = \sqrt{\left( \frac{\partial V}{\partial \lambda_e} \right)^2 \sigma_{\lambda_e}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial F_D} \right)^2 \sigma_{F_D}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_{\beta}^2}, \quad (13)$$

З урахуванням (10, 11) середньоквадратична похибка вимірювання складових швидкості  $V_x$  та  $V_y$

$$\sigma_{V_x} = \sqrt{\frac{F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{\lambda_e}^2 + \frac{\lambda_e^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{F_D}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \beta)^2}{4 \cos^4 \alpha (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cos^4 \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\beta}^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_{V_y} = \sqrt{\frac{F_D^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{\lambda_e}^2 + \frac{\lambda_e^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)} \cdot \sigma_{F_D}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cos^4 \alpha (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\alpha}^2 + \frac{\lambda_e^2 F_D^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)^2}{4 \cos^4 \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta)^3} \cdot \sigma_{\beta}^2}, \quad (15)$$

Потенційна сумарна середньоквадратична похибка вимірювань визначається потенційними середньоквадратичними похибками вимірювань кутів  $\alpha$  та  $\beta$ , доплерівської частоти  $F_D$  і стабільності довжини електричної хвилі  $\lambda_e$ . Значення цих похибок є функціями вимірюваних величин і співвідношення сигнал / шум. В роботі [1] наведені значення

потенційних похибок  $\sigma_{F_D}$  та  $\sigma_{\lambda_e}$ , які реалізуються в різних системах радіоакустичного зондування:  $\sigma_{F_D}^2 = 10^{-4} \Gamma\mu^2$ ,  $\sigma_{\lambda_e}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Потенційна середньоквадратична помилка вимірювання кутових координат фазовим методом [10], наприклад для кута  $\alpha$

$$\sigma_{P\alpha} = \frac{\lambda_e}{2\pi l \cos \alpha \sqrt{q}}, \quad (16)$$

де  $q$  – відношення сигнал / шум по потужності.

Визначимо значення середньоквадратичних помилок для випадків мінімального і максимального відхилень траєкторії руху акустичного пакета від вертикалі при мінімальному і максимальному значеннях горизонтального вітру (1 ... 30 м / с), тоді  $\alpha_{\min} = 0,003 \text{ рад}$ ,  $\alpha_{\max} = 0,09 \text{ рад}$ . приймаємо значення  $l / \lambda_e = 50$ ,  $q = 25$ . В цьому випадку

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

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

Значення похибок вимірювань постійні у всій робочій зоні і не залежать від кутових координат положення пакету в робочій зоні.

Для прикладу задавши значення довжини хвилі  $\lambda_e = 0,5 \text{ м}$ , доплерівського зсуву частоти  $F_D = 1368 \text{ Гц}$ , кутів зносу пакету в площинах  $XOZ$  та  $YOZ$   $\alpha = \beta = 2^\circ$  з урахуванням раніше обчислених значень потенційних похибок  $\sigma_{\lambda_e}$ ,  $\sigma_{F_D}$ ,  $\sigma_{\alpha}$ ,  $\sigma_{\beta}$  отримаємо

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

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

Цікавим є аналіз сумарних потенційних похибок вимірювання складових швидкості горизонтального вітру в усьому досліджуваному діапазоні висот від 10 м до 380 м. Для цього спочатку необхідно дослідити залежність співвідношення сигнал / шум від дальності зондування (висоти підйому акустичного пакета).

У радіолокаційних системах фазовий фронт хвилі, опромінюючої об'єкт, приймається пласким в межах відстаней, на яких формується відбитий сигнал. Вимога плаского фазового фронту хвилі в радіолокації визначає синфазність збудження вторинних джерел на поверхні об'єкта, що спостерігається, а в системах радіоакустичного зондування виконання такої вимоги забезпечується геометричним розташуванням акустичної та радіоантен в безпосередній близькості одна від одної, а в нашому випадку загальним рефлектором. В результаті сферичні фронти акустичної та радіохвиль практично збігаються і фактично виконуються вимоги, що пред'являються в радіолокації при опроміненні точкових об'єктів.

В якості вихідного співвідношення, за допомогою якого може бути обчислено співвідношення сигнал / шум, використовуємо формулу для потужності прийнятого сигналу  $P_r$  [2]:

$$P_r = G_t \cdot G_r \cdot G_s \cdot B \cdot N^2 \cdot P_e \cdot P_s \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2 \cdot \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{-0,1 \cdot \delta \cdot R}}{R^2}, \quad (17)$$

де  $P_r$  – потужність прийнятого радіосигналу, Вт;  $P_s$  – випромінювана акустична потужність, Вт;  $N$  – число довжин хвиль в акустичному пакеті;  $\theta$  – найменший з кутів розкриття діаграм спрямованості акустичної та радіо антен, град;  $R$  – дальність зондування, м;  $\delta$  – коефіцієнт ослаблення (по потужності) акустичної хвилі, дБ/м;  $B$  – коефіцієнт, який визначається точністю виконання умови Брегга в межах пакету, в граничному випадку  $B = 1$ ;  $G_t$  – коефіцієнт

підсилення передавальної радіоантени;  $G_r$  – коефіцієнт підсилення приймальної радіоантени;  $G_s$  – коефіцієнт підсилення акустичного випромінювача.

Коефіцієнт класичного поглинання звуку, обумовленого в'язкістю і теплопровідністю повітря, визначається формулою

$$\alpha_s = \frac{53,54 \cdot \eta \cdot f_s^2}{p \cdot C_s}, \text{ м}^{-1}, \quad (18)$$

де  $\eta$  – в'язкість повітря;  $p$  – атмосферний тиск;  $C_s$  – швидкість звуку;  $f_s$  – частота звуку.

Для звичайних атмосферних умов кількісна оцінка коефіцієнта поглинання може бути отримана з наступного співвідношення:

$$\alpha_s \approx 4,24 \cdot 10^{-11} f_s^2, \text{ м}^{-1}, \quad (19)$$

де  $f_s = c_s / \lambda_s$ ,  $c_s = 332 \text{ м/с}$ ,  $\lambda_s = 0,25 \text{ м}$ ,  $f_s = 1328 \text{ Гц}$ .

Величина погонного загасання акустичної хвилі  $\delta$  (дБ/м) може бути отримана з формули:

$$\delta = 10\alpha_s \lg e. \quad (20)$$

Для високоточних вимірювань параметрів відбитого радіосигналу необхідно мати співвідношення сигнал / шум на вході приймача не менше 30 ... 40 дБ. Потужність шумів в приймачі визначається за формулою:

$$P_n = k \cdot T \cdot \Delta f (K_n - 1) \cdot k_R. \quad (21)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт шуму приймача;  $\Delta f$  – ефективна ширина смуги пропускання;  $T$  – робоча температура;  $k_R$  – коефіцієнт запасу;  $k$  – постійна Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ .

При  $K_n = 3$ ,  $k_R = 5$ ,  $T = 300 \text{ К}$  отримаємо  $P_n = 4,14 \cdot 10^{-19} \text{ Вт}$ .

Коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен визначаються за формулою

$$G_t = G_r = G_s = \frac{25000}{\theta^\circ}, \quad (22)$$

де  $\theta$  – кут розкриття антени в градусах.

За вищенаведеними формулами виконані оціночні розрахунки енергетичного потенціалу системи радіоакустичного зондування при наступних технічних характеристиках системи:

$N = 30$ ,  $B = 1$ ,  $\theta_q = 6^\circ$ ,  $\theta_e = 12^\circ$ ,  $r = 30, 60 \dots 300 \text{ м}$ ,  $P_e = 5 \text{ Вт}$ ,  $P_s = 25 \text{ Вт}$ ,

$G_t = 25000 / 12^\circ = 2083,333$ ,  $G_r = 25000 / 20^\circ = 1250$ ,

$G_s = 25000 / 6^\circ = 4166,667$ . Розрахуємо  $\alpha_s$  та  $\delta$  згідно (21) і (22):

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

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

Результати розрахунків відношення сигнал / шум, яке позначимо як  $q = P_r / P_n$ . На рис. 3 наведені результати аналізу середньоквадратичної похибки вимірювання швидкості вітру в діапазоні висот 0 ... 100 м, розрахованої за формулами (14-15).

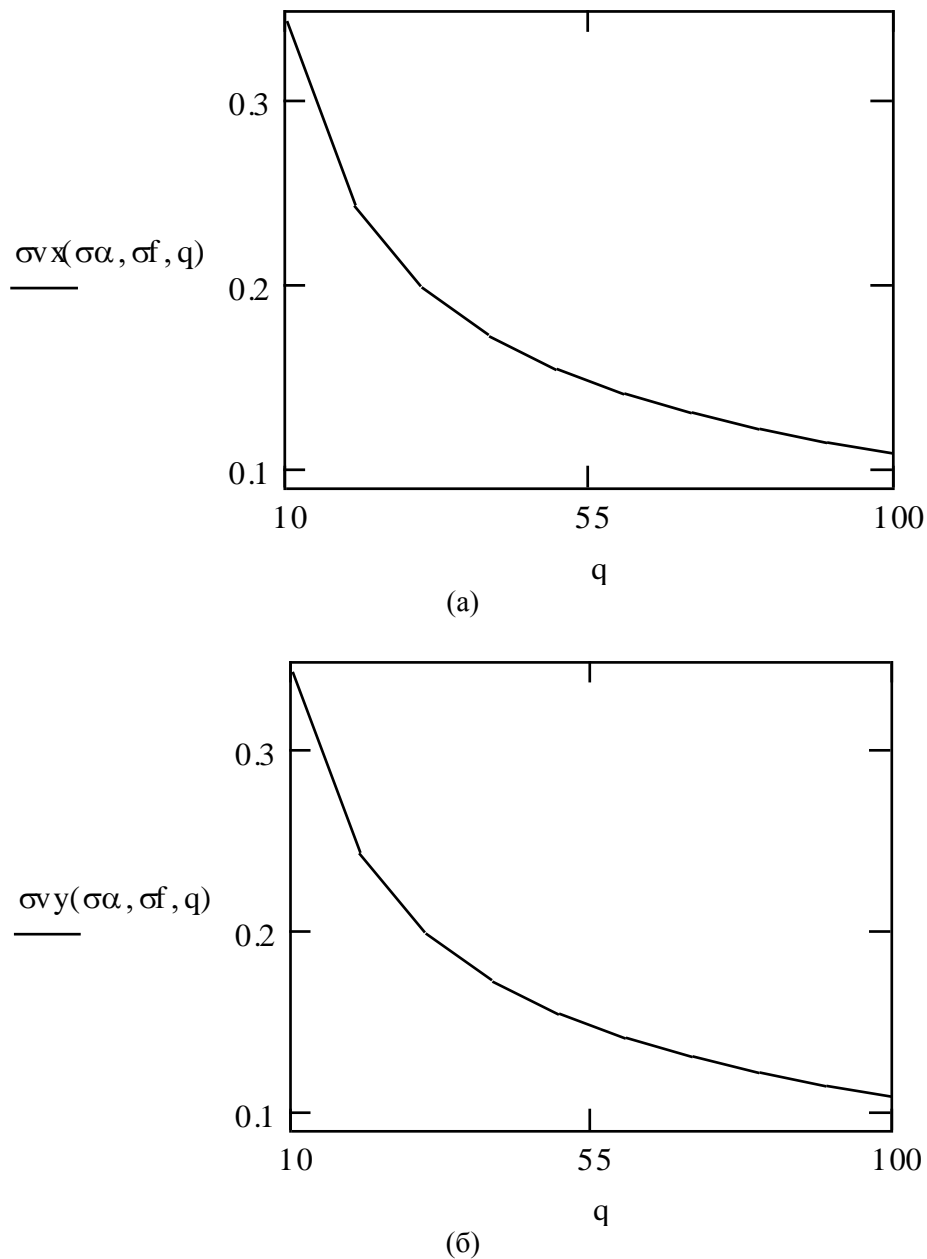


Рис. 3. Залежності  $\sigma_{v_x}$  (а) та  $\sigma_{v_y}$  (б) від відносини сигнал / шум

Аналіз отриманих залежностей показує, що даний радіоакустичного вимірювач швидкості вітру в атмосферному приземному шарі задовольняє вимогам автоматизованих систем управління повітряним рухом в зоні аеропорту, забезпечуючи вимірювання горизонтального вітру з допустимими похибками.

Аналіз отриманих залежностей показує, що запропонований спосіб визначення зсуву горизонтальних складових швидкості вітру при вертикальному радіоакустичного зондуванні при обумовлених вище технічних параметрах забезпечує допустимі значення потенційних середньоквадратичних похибок у разі одноразового зондування при співвідношеннях сигнал / шум не менше 20, що відповідає висотам до 62 м. Для забезпечення вимірювань до висот 100 м при малих відносинах сигнал / шум необхідно проводити багаторазове зондування і, вважаючи розподіл помилок вимірювань нормальним, усереднювати отримані результати. При цьому, як відомо, середньоквадратична похибка вимірювань зменшується в, N разів де N - кількість вимірювань. Як видно із зіставлення малюнків 3 і 4, для вимірювань на висоті 100 м кількість зондувань повинно бути не менше 6.

Отже, розглянута радіоакустична система вертикального зондування задовольняє вимогам автоматизованих систем управління повітряним рухом в зоні аеропорту, забезпечуючи вимірювання горизонтального вітру і його вертикального зсуву з допустимими похибками.

У статті авторами сформульовані і вирішені такі наукові завдання:

1. Розроблено математичні моделі антенного блоку радіоакустичного вимірювача. Обґрунтовано технічні характеристики передавальної і приймальної антен, що забезпечують вимірювання координат акустичного пакета в зоні спостереження.

2. Розроблено методику вимірювання координат акустичного пакету, що рухається вгору і переміщується під дією вітру у всій зоні спостереження, і обчислення з використанням цих даних компонент швидкості вітру.

3. Запропоновано методику обчислення сумарної середньоквадратичної похибки вимірювань компонент вектора швидкості вітру з урахуванням зміни і технічних характеристик вимірювача, а також нестабільності метеорологічних характеристик атмосферного приземного шару.

4. За отриманими формулами виконані розрахунки відносних середньоквадратичних похибок вимірювання горизонтального вітру і залежність похибок від висоти досліджуваного шару. Наведено графіки залежностей. Показано, що до висот 100 метрів вимірювання можуть бути виконані з задовільними похибками.

### Література

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, 2002. – С. 49-100.

2. Каллистратова, М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы [Текст] / М.А. Каллистратова, А.И. Кон. – М.: «Наука», 1985. –187 с.

3. Angevine, W.M. Improved radio acoustic sounding techniques [Text]/ W.M. Angevine, W.L. Ecklund, D.A. Carter, K.S. Gage, K.P. Moran // J. of Atmos. Oceanic Technol. - 1994. - Vol.11, №2. – P.121-127.

4. Vaisala AviMet® Automated Weather Observing System [Electronic resource] // Vaisala. – Electronic data. – [S. l.], 2016. – URL: <http://www.vaisala.com/en/products/aviationweathersystems/Pages/icaoawos.aspx> (access date: 01.08.2016).

5. Humidity sensor HIH-4206-A/C [Electronic resource] // Honeywell. – Electronic data. – Minneapolis, 2007. – URL: [http://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=51480](http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=51480) (access date: 01.08.2016).

6. Balis D.S. An update on the dynamically induced episodes of extreme low ozone values over the northern middle latitudes // Int. J. Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, No. 24. – P. 9197–9205.

7. Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated, and Calibrated. MPXV4115V Series Integrated pressure sensor [Electronic resource] : technical data // NXP. – Electronic data. – Eindhoven, 2012. – URL: [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MPXV4115V.pdf](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV4115V.pdf) (access date: 01.08.2016).

8. Авторское свидетельство СССР №1689899 от 8 июля 1991 г. «Радиоакустическое устройство для измерения сдвига ветра». Авторы: Сидоров Г.И. и др

9. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

10. Белоцерковский, Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства [Текст] / Г.Б. Белоцерковский. – М.: «Сов. радио», 1975. – 336 с.

11. Зейдель, А. Н. Ошибки измерения физических величин [Текст] / А. Н. Зейдель. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

**Карташов В.М., Сидоров Г.И., Колендовская М.М., Шейко С.А., Шаповалов С.В.**  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### РАДИОАКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ВЕТРА В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ



*В этой работе предлагается радиоакустического измеритель скорости ветра в атмосферном пограничном слое при излучении импульсного акустического и непрерывного радиосигналов соосными антеннами только в вертикальном направлении. Створення математической модели радиоакустического измерителя скорости ветра в атмосферном пограничном слое при зондировании в одном вертикальном направлении для метеорологического обеспечения авиации необходимо измерять скорость ветра на различных высотах. Для решения этих задач эффективным является использование систем дистанционного исследования атмосферного пограничного слоя на основе акустического и радиоакустического методов.*

**Ключевые слова:** радиоакустического измеритель, антенна, передатчик, скорость ветра, высота, акустическая система, доплеровская радиоакустического система

**Kartashov V.M, Sidorov G.I., Kolendovska M.M, Sheiko S.O, Shapovalov S.V.**  
Kharkiv National University of Radioelectronics

### **RADIOACOUSTIC DEVISE FOR MEASURING WIND SPEED IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER**

*This work offers radioacoustic devise for measuring wind speed in the atmospheric boundary layer by radiating pulsed acoustic and continuous radiosignal of co-existing aerals only in the vertical direction. The creating of a mathematical model of radioacoustic devise for measuring wind speed in the atmospheric boundary layer by searching in one vertical direction for meteorological support of aviation is necessary to measure the wind speed at different heights. To solve these problems, it is effective to use systems of remote study of the atmospheric boundary layer on the basis of acoustic and radioacoustic methods.*

**Keywords:** radioacoustic devise, aerial, transfer, wind speed, height, acoustic system, doppler radioacoustic system.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2018