

**АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОГО СТАНУ
АТМОСФЕРНОГО ПРИКОРДОННОГО ШАРУ****Вступ**

За останній час з'явилась велика кількість робіт, присвячених дослідженню прикордонного шару атмосфери, але характеристики турбулентності досліджені ще недостатньо. Турбулентність і вертикальні рухи повітря – це головні механізми, що визначають взаємодію підстилаючої поверхні і вільної атмосфери і формують структуру прикордонного шару. Відомості про турбулентність необхідні при розробці локальних прогнозів таких метеорологічних параметрів як місцеві вітри, зони болтанки літаків, умов поширення різноманітних домішок, що забруднюють атмосферу, а також для забезпечення будівництва, авіації, вітровоенергетики, сільського господарства і т.ін. [1].

Вивчення атмосферної турбулентності в прикордонному шарі традиційно проводилось за допомогою аеростатичного, літакового зондування, а також шаропілотних спостережень. Останнім часом почали застосовуватись радіолокаційні та акустичні методи.

Атмосферна турбулентність проявляється у вигляді пульсацій в горизонтальній і вертикальній площинах.

Основною характеристикою турбулентного стану повітряного потоку є пульсації швидкості вітру, які добре визначаються при зондуванні атмосфери акустичними хвилями. На кафедрі Медіаінженерії і радіоелектронних систем Харківського національного університету радіоелектроніки протягом багатьох років розробляються методи дистанційного зондування, тому дослідження, яке описане в цій роботі, базується на добре розробленому фундаменті.

**Обґрунтування можливостей вимірювання характеристик атмосферної
турбулентності методом акустичного зондування**

Як відомо [2], параметри розсіяного акустичного сигналу залежать від становища середовища поширення набагато сильніше, ніж параметри радіосигналу.

Атмосферу для акустичної хвилі можна розглядати як велику кількість елементарних відбивачів, які знаходяться в об'ємі розсіювання просторового зондуючого сигналу. При цьому в точку приймання надходить безліч розсіяних атмосферною неоднорідністю сигналів, а обвідну сумарного розсіяного вхідного сигналу E слід розглядати як випадкову величину, що змінюється в часі. В залежності від стану розсіюючого середовища обвідна вхідного сигналу описується законом розподілу імовірностей. Знаючи цей закон, можна визначити стан турбулентності атмосфери. В прикордонному шарі повітря постійно відбуваються процеси зміни розмірів турбулентних вихорів. Інтенсивні відбиті акустичні сигнали виникають при достатньо великій спектральній густині температурних флуктуацій, масштаб яких дорівнює половині довжини падаючої звукової хвилі.

Оскільки пульсації температури і пульсації вітру корельовані, відбитий акустичний сигнал несе інформацію про атмосферну турбулентність, інтенсивність якої може бути визначена за вимірюваними характеристиками цього сигналу. При цьому великомасштабна турбулентність викликає лише додатковий зсув всього спектра доплерівських частот відбитого сигналу по частотній вісі. Дрібномасштабні вихори і температурні пульсації, які мають приблизно однакові розміри з розміром розсіюючого об'єму і довжиною хвилі акустичного локатора, виникають флуктуації обвідної сигналу і розширення його спектра.

Миттєве значення сигналу акустичного локатора

$$e(t) = E_0 \cos(\omega t - \varphi) + \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega t - \varphi_i), \quad (1)$$

де E_0 – амплітуда регулярної складової вхідного сигналу, E_i – амплітуди випадкових складових вхідного сигналу, φ – фаза регулярної складової вхідного сигналу, φ_i – фази випадкових складових вхідного сигналу.

Оскільки в точці приймання фаза регулярної складової практично постійна і рівномірна в інтервалі $0..2\pi$, для зручності подальших перетворень можна покласти $\varphi = 0$.

Якщо результуючу амплітуду суми випадкових складових позначити через E_Σ , а фазу – через φ_Σ , то вираз (1) прийме вигляд

$$e(t) = E_0 \cos \omega t + E_\Sigma \cos(\omega t - \varphi_\Sigma). \quad (2)$$

Розсіяні хвилі підсумовуються в точці приймання з випадковими відносними фазами, рівномірно розподіленими на інтервалі $0..2\pi$, тому амплітуда сумарного розсіяного сигналу випадкова, а фаза ψ розподілена рівномірно з густиною $1/2\pi$. Аналіз амплітуди результуючого сигналу може бути виконаний згідно з методикою, застосованою при вивченні вузькосмугових випадкових процесів [3], відбитих радіолокаційних сигналів [4], сигналів у тропосферних та іоносферних лініях зв'язку.

У содарах (акустичних локаторах) частіше реєструється амплітуда прийнятого сигналу E , яку й потрібно вимірювати й аналізувати. Можна показати, що густина імовірності акустичних ехо-сигналів E описується узагальненим законом Релея (законом Райса):

$$w(E) = \frac{E}{2\pi \cdot \sigma_E^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) I_0\left(\frac{E_0 E}{\sigma_E^2}\right), \quad (3)$$

де $I_0\left(\frac{E_0 E}{\sigma_E^2}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp\left(\frac{E_0 E}{\sigma_E^2} \cos \varphi\right) d\varphi$ – функція Бесселя нульового порядку.

За результатами вимірювань обвідної E акустичних ехо-сигналів можуть бути визначені значення \bar{E} , \bar{E}^2 та \bar{E}^2 .

Однак для співставлення експериментальних даних з теоретичними кривими необхідно мати значення регулярної компоненти сигналу E_0 і середнього квадрата суми розсіяних компонент σ_E , пов'язаних між собою параметром $k = \frac{E_0}{\sigma_E}$.

Величини E_0 і σ_E визначимо таким чином. Використовуючи вираз (3) знайдемо середній квадрат \bar{E}^2 і середнє значення \bar{E} :

$$\begin{aligned} \overline{E^2} &= \int_0^\infty w(E) E^2 dE = \int_0^\infty E^2 \frac{E}{\sigma_E^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) I_0\left(\frac{E_0 E}{\sigma_E^2}\right) dE = 2\sigma_E^2 \left(1 + \frac{E_0^2}{\sigma_E^2}\right) = 2\sigma_E^2 (1 + k^2). \quad (4) \\ \bar{E} &= \int_0^\infty w(E) E dE = \int_0^\infty E \frac{E}{\sigma_E^2} \exp\left(-\frac{E^2 + E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) I_0\left(\frac{E_0 E}{\sigma_E^2}\right) dE = \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_E \exp\left(-\frac{E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) \left[\left(1 + \frac{E_0^2}{\sigma_E^2}\right) I_0\left(\frac{E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) + \frac{E_0^2}{\sigma_E^2} I_1\left(\frac{E_0^2}{2\sigma_E^2}\right) \right] = \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_E \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right) \left[(1 + k^2) I_0\left(\frac{k^2}{2}\right) + k^2 I_1\left(\frac{k^2}{2}\right) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

де I_0 і I_1 – функції Бесселя нульового і першого порядків.

Із формул (4) і (5) можна знайти

$$\frac{\overline{E^2}}{\overline{E}^2} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1+k^2) \cdot \exp(k^2/2)}{\left[(1+k^2) \cdot I_0(k^2/2) + k^2 \cdot I_1(k^2/2) \right]^2} \quad (6)$$

При наявності в розсіючому об'ємі стійкої горизонтальної стратифікації зростає регулярна складова і зменшується сума розсіяних складових відбитого сигналу, в результаті параметр k збільшується. При руйнуванні горизонтальної стратифікації і зростанні інтенсивності турбулентності стрімко падає регулярна складова і величина k зменшується, прагнучи до нуля.

Результат обчислення за формулою (6) подано на рис. 1 у вигляді графіку залежності параметра $K = 20 \lg k$ від відношення $\overline{E^2}/\overline{E}^2$. Представлення параметра k в логарифмічному вигляді зменшує динамічний діапазон цього параметру і є більш зручним.

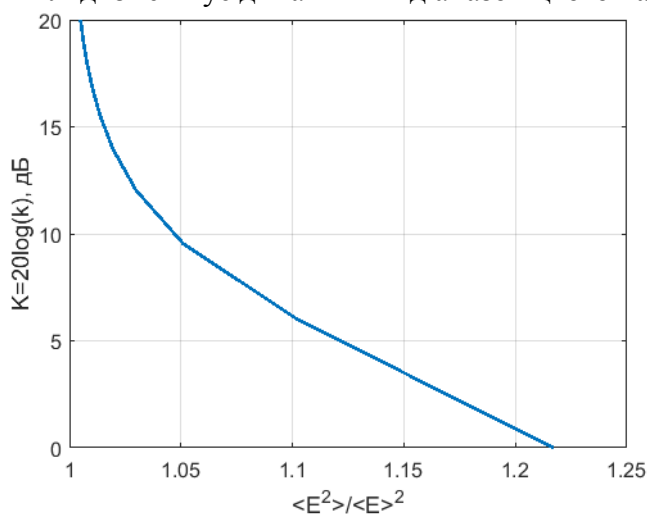


Рис. 1

Атмосферна турбулентність за ступенем впливу на літальні апарати розділяється на чотири класи і може бути кількісно описана середньоквадратичними значеннями пульсацій вертикальної складової швидкості вітру.

В табл. 1 наведено кількісні критерії поділу інтенсивності турбулентності на класи за значеннями середньоквадратичних пульсацій вертикального вітру і відповідним їм значенням параметра $K = 20 \lg k$.

Обґрунтування технічних параметрів необхідної експериментальної системи акустичного зондування згідно з розробленою і описаною вище методикою вимірювань турбулентності атмосферного прикордонного

шару можна використовувати акустолокатори, побудовані на моностатичній або бістатичній схемі. При моностатичній схемі використовується одна комотована спільна антена в режимах передавання і приймання, при бістатичному режимі необхідно використовувати дві різні антени.

Таблиця 1

Інтенсивність турбулентності	Середньоквадратичне значення пульсацій вітру, σ_g , м/с	K , дБ
Слабка	$\sigma_g \leq 0,5$	$K \geq 16$
Помірна	$0,5 < \sigma_g \leq 2,5$	$16 > K \geq 8$
Сильна	$2,5 < \sigma_g \leq 4,0$	$8 > K \geq 0$
Штормова	$\sigma_g > 4$	$K < 0$

Для вимірювання характеристик турбулентності атмосферного прикордонного шару в содарах використовуються досить високі частоти зондування. Це дає ряд переваг при моностатичному зондуванні: меншу протяжність "мертвої зони" (5 – 20 м) і більше просторове усереднення. В роботі [2] показано, що в умовах слабкої турбулентності структурна постійна флуктуацій температури $C_T^2 \approx 10^{-4}$ град.²·м^{-2/3}. Це означає, що ефективна площа зворотного розсіювання мала і необхідно застосовувати досить потужні генератори акустичних сигналів і приймачі з чутливістю не гірше 1 мкВ.

Значення температури і швидкості вітру в атмосфері мають випадковий характер як у часі, так і у просторі. Це означає, що поодинокі вимірювання будуть давати різні значення. Для поліпшення результативності вимірювань і підвищення їх достовірності необхідно виконувати усереднення за обрані і обґрунтовані періоди спостережень. Таким чином, велике значення має період усереднення даних T_0 . Величезний діапазон часових масштабів атмосферної турбулентності складає 10 порядків: від декількох секунд до однієї години, тому однозначно визначити необхідний період усереднення даних, який задовольняє великомасштабним і дрібномасштабним турбулентностям, неможливо. Тому звичайно період усереднення характеристик поля швидкості вітру і флуктуацій цієї швидкості обирають в інтервалі від однієї хвилини до однієї години. Важливо відзначити, що в метеорології прийнято усереднювати результати вимірювань на інтервалі часу $T_0 \gg 10$ хв., тому що на інтервал часу $10 \text{ хв.} \leq T_0 \leq 1 \text{ год.}$ припадає плаский мінімум в спектрі періодів турбулентних пульсацій швидкості вітру і температури повітря [5].

Апробація метода класифікації турбулентності з використанням експериментальних даних акустичного локатора ХНУРЕ

Протягом літніх місяців 2011 і 2012 років був отриманий великий обсяг експериментальних даних у вигляді цифрових ехограм [7, 8]. Ці записи були обрані тому, що в літній період температурний режим визначається перш за все прогріванням поверхні землі і залежить від інтенсивності турбулентного обміну [1]. В цих експериментах зондування виконувалось вертикально догори, період повторення вимірювань $T = 1$ с, тривалість запису кожної реалізації $T_p = 1$ год. В табл. 2 наведені основні параметри акустичного локатора ХНУРЕ [7, 8].

Таблиця 2

Параметр	Значення
Робоча частота	5000 Гц
Потужність випромінювання електрична	160 Вт
Тривалість зондуючого імпульса	3 мс
Період повторення імпульсів	1 с
Випромінююча антена	Фазована 16-елементна решітка
Приймальна антена	Рефлекторно-параболічна $D=0,8$ м

Протягом доби проводились 8 – 10 сеансів в залежності від погодних умов. В результаті одного сеансу зондування формувалась матриця розміром m на n цифрових відліків ехосигналів $S_{i,j}$, де $i = 1..m$, $j = 1..n$, причому стовпці матриці являють собою вертикальні одиночні профілі ехо-сигналів $S_j(t)$, а кожна строка матриці – це ряд дискретних відліків ехо-сигналів для даної висоти $h = \Delta h \cdot I$, де Δh – дискретний крок висоти.

Отриманий вихідний матеріал класифікувався за принципом відповідності ехо-сигналів [6] у флуктуючому шарі, у збуреному шарі, повністю збуреному приземному шарі.

Записи отримано при майже однакових погодних умовах, а саме – майже однакових температурах повітря і швидкості вітру до 1 м/с. Загальною характеристикою отриманих даних є їх відмінність за ступенем збудженості повітряного середовища, незважаючи на практично однотипні погодні умови.

Було проведено аналіз обвідної ехо-сигналів (рис. 2) і побудовано закони розподілу імовірностей значень обвідної (рис. 3). З використанням отриманих експериментальних даних побудовано гістограми розподілу імовірностей значень обвідних ехо-сигналів, виконувалась апроксимація очікуваного теоретичного закону розподілу для кожної вибірки методом найменших квадратів з метою отримання найкращого узгодження з законом Райса. Ступінь розбіжності теоретичного і експериментального законів розподілу оцінювалось з використанням критерія хі-квадрат Пірсона. Чисельні оцінки показали, що у всіх випадках на виборках обся-

гом більше 20 хвилин (1200 відліків) величина $P(\chi^2) \approx 5\%$ і не зменшується зі збільшенням часу спостереження. Більш чітко наближення експериментального закону розподілу амплітуд ехо-сигналів до узагальненого закону Релея (близько 10 хв) спостерігається в записах ехо-сигналів з малих висот (приблизно 50 м). Це, напевно, можна пояснити великим відношенням сигнал-шум на малих висотах.

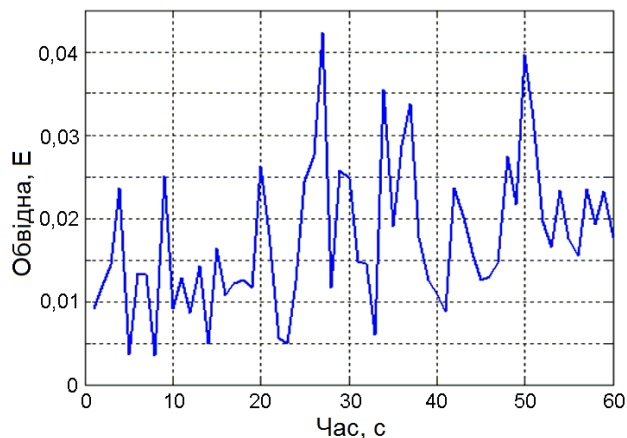


Рис. 2

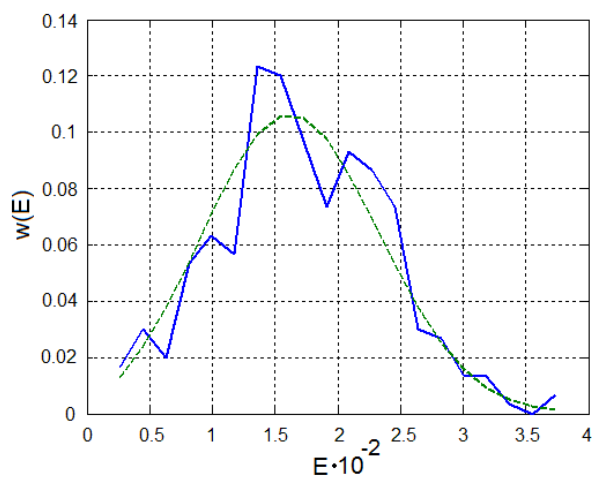


Рис. 3

Висновки

Запропоновано і теоретично обґрунтовано модель розсіювання акустичних хвиль на турбулентних неоднорідностях атмосферного прикордонного шару.

Наведено вимоги до апаратури для експериментальних досліджень і виконано аналіз експериментальних даних, отриманих відповідним цим вимогам акустичним локатором ХНУРЕ.

Експериментально доведено адекватність теоретичної моделі розсіювання акустичних хвиль на турбулентних неоднорідностях і можливість класифікації стану турбулентності за результатами вимірювань обвідної ехо-сигналів.

Список літератури:

1. Воронцов П.А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. 296 с.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск : Водолей, 2001. 278 с.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва : Высш. шк., 2000. 462с.
4. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. Москва : Академия, 2018. 592 с.
5. Патент України на корисну модель G01S 13/95 (2006.01), G01W 1/06 (2006.01). Акустичний пристрій для визначення параметрів турбулентності в атмосферному прикордонному шарі / В.М. Карташов, Г.І. Сідоров, С.О. Шейко, А.С. Полонська. № u201706157; заявл. 19.06.2017; опубл. 27.11.2017, бюл. № 22.
6. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Влияние времени усреднения на качество восстановления характеристик мелкомасштабной ветровой турбулентности при акустическом зондировании // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 10. С. 28-31.
7. Леонидов В.И. Статистические характеристики эхосигналов акустического зондирования в зоне мегаполиса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. 6/4 (60). С. 46-50.
8. Семенец В.В., Леонидов В.И. Акустическое зондирование атмосферы в проблеме изучения процессов теплообмена в зоне мегаполиса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. 6/8 (54). С. 45-49.