

ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті запропоновано моделі акустичного випромінювання тактичних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), сформульовано вимоги до частотно-часового розподілу (ЧЧР) багатокомпонентних нестационарних сигналів та описано проведену адаптацію ядра розподілу для аналізу акустичних сигналів. Показано, що за ЧЧР доцільно обрати зміщену спектрограму з попередньою обробкою сигналу вікном Дольфа – Чебишева.

Постановка проблеми. У зв'язку з тим, що двигуни більшості тактичних БПЛА досить малі для використання глушників і зменшення в такий спосіб акустичної помітності, у відкритих джерелах значну кількість робіт присвячено розробці та використанню пристроїв акустичного виявлення БПЛА [1–13]. Шум поля бою робить виявлення безпілотників за їх акустичними портретами досить складним. Але оскільки БПЛА мають малі інфрачервоні та радіолокаційні сигнатури, порівняно з пілотованою авіацією, то актуальним стає використання акустичних систем. Акустичні сенсори дозволяють проводити пошук БПЛА в пасивному режимі, зменшуючи таким чином імовірність виявлення противником власних позицій. Модифікація існуючих акустичних систем або розробка нових може забезпечити надійний метод виявлення та вимірювання координат БПЛА [7].

Останнім часом спостерігається підвищена зацікавленість новими системами, сконструйованими спеціально для виявлення та розпізнавання вертольотів, літаків, БПЛА, що низько летять. Такі системи уже з'явилися на озброєнні сухопутних військ провідних держав світу: американська система MANRAC-100, французька BACH, ізраїльські HELISPOT і ROAD та японська система виявлення мультикоптерів Alsok. Принцип дії таких систем ґрунтується на тому, що при надходженні акустичного випромінювання від лопастей літального апарата (ЛА) в зону дії акустичних датчиків система миттєво звіряє його з базою даних, де зібрані зразки звуків різних типів ЛА, проводить ідентифікацію та визначає напрямок польоту. Проте даний підхід не дозволяє проводити розпізнавання ЛА, акустичні портрети яких відсутні в базі даних, оскільки не використовує модельний опис акустичних сигналів можливих об'єктів, що є важливою особливістю сучасних методів обробки сигналів [14]. Також при такому підході буде ускладненим розділення сигналів від кількох БПЛА як у часовій, так і в частотній областях.

Огляд останніх досліджень і публікацій. На характеристики сигналів акустичного випромінювання тактичних БПЛА останнім часом звертають підвищену увагу через бурхливий розвиток пристроїв та алгоритмів цифрової обробки сигналів, що дає змогу простіше та надійніше проводити їх виявлення порівняно з аналоговою обробкою [1–6, 8–13].

Проте на даний час відсутній вичерпний математичний апарат, що дозволяв би з високою ефективністю аналізувати акустичне випромінювання кількох БПЛА на фоні

перешкод та проводити на основі цього вимірювання координат і класифікацію даних ЛА. Більшість дослідників використовують аналіз Фур'є [11–13] або, у кращому випадку, спектрограму [1–2, 4, 9], не беручи до уваги нестационарність та багатокомпонентність акустичних сигналів БПЛА. Тому в даній роботі зроблено спробу створення комплексного підходу до вирішення завдання аналізу акустичних сигналів БПЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою даної статті є проведення частотно-часового аналізу (ЧЧА) акустичного випромінювання тактичних БПЛА на основі адаптації параметрів ЧЧР відповідно до параметрів даних сигналів.

Виклад основного матеріалу

1. Модель акустичного випромінювання тактичних БПЛА. Шум повітряного гвинта утворюється, в основному, у результаті силової взаємодії його лопатей з навколишнім середовищем у процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. Генерація акустичного випромінювання може також відбуватися і при аеродинамічній взаємодії лопатей з турбулентними утвореннями в набігаючому потоці. Відповідно до цього шум малонавантаженого гвинта поділяють на шум обертання і широкосмуговий шум.

До точки спостереження будуть доходити імпульси, викликані проходженням кожної лопаті, що збурює повітря. Дані збурення відбуваються стільки разів, скільки лопатей M має гвинт. Оскільки шум обертання має визначену частоту, то про шум гвинта можна говорити як про звук певного тембру, тобто в ньому будуть існувати гармоніки [15–16].

Порівняно з наземною технікою гармоніки акустичного випромінювання БПЛА більш стаціонарні. Проте дані гармоніки стають суттєво нестационарними під час виконання маневру ЛА або зміни режиму роботи його силової установки (рис. 1). Причому, як видно з даної спектрограми, потужність нестационарних частотно-модульованих (ЧМ) акустичних сигналів набагато вища, ніж немодульованих.

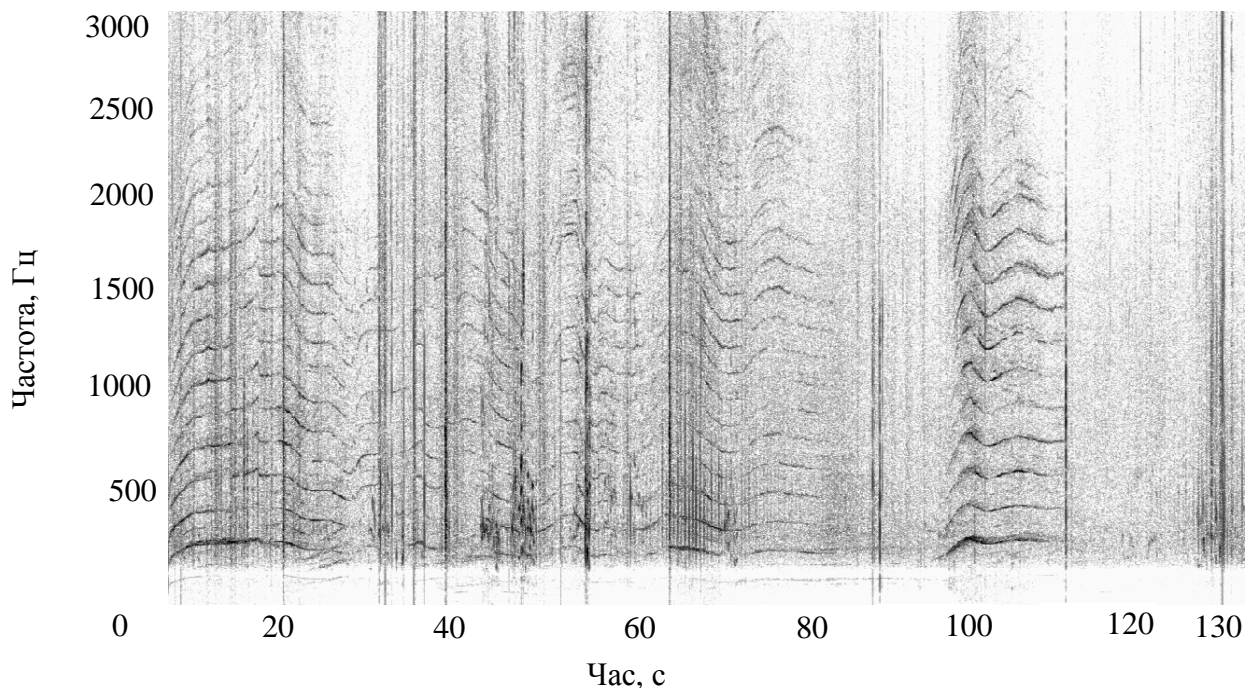


Рис. 1. Спектрограма акустичного випромінювання тактичного БПЛА літакового типу (довжина швидкого перетворення Фур'є – 4096 точок, вікно Блекмана – Харіса)

Акустичний сигнал БПЛА є сумою гармонік з частотами, кратними частоті обертання ротора або колінвала двигуна F . Амплітуди гармонік зменшуються зі збільшенням частоти. Причому в режимі рівномірного польоту (прямолінійний рух, двигун працює в одному режимі) амплітуда кожної наступної гармоніки при збільшенні її частоти менша за амплітуду попередньої гармоніки. У загальному ж випадку амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими за рівномірним законом. Оскільки основним джерелом акустичного шуму БПЛА з електричним двигуном (ЕД) є шум гвинта, то математична модель акустичного випромінювання БПЛА може бути подана в такому вигляді:

$$s_{ED}(t) = s_{GB}(t) = \sum_{i=1}^{M_{GB}} A_i \cos(2\pi M F \cdot i \cdot t + \varphi_i), \quad (1)$$

де M_{GB} – кількість гармонік акустичного випромінювання, що розглядають (визначають за смугою частот аналізу);

A_i – амплітуда i -ї гармоніки;

φ_i – фаза i -ї гармоніки.

Основним джерелом шуму БПЛА з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) є сам двигун. Другорядним джерелом шуму виступає повітряний гвинт. Модель такого акустичного сигналу можна записати в такому вигляді:

$$s_{ДВЗ}(t) = s_{ДВ}(t) + s_{GB}(t), \quad (2)$$

де

$$s_{ДВ}(t) = \sum_{i=1}^{M \cdot M_{GB}} A_i \cos(2\pi F \cdot i \cdot t + \varphi_i). \quad (3)$$

З підвищенням частоти гармоніки відбувається розширення спектральних ліній акустичного випромінювання двигунів обох типів, оскільки починають проявлятися шуми випадкового походження.

Акустичне випромінювання БПЛА мультироторного типу від одного гвинта описують аналогічно БПЛА з ЕД (ДВЗ на БПЛА такого типу, як правило, не використовують). Зазвичай частоти кожного з двигунів не збігаються, а відрізняються на деяку незначну величину, що залежить від динаміки руху БПЛА. Через дану різницю частот обертання гвинтів спектральні лінії акустичного випромінювання БПЛА мультироторного типу будуть розширеними порівняно зі спектральними лініями акустичного випромінювання БПЛА літакового типу (з одним гвинтом).

Під час зміни режиму роботи двигуна або виконання маневру змінюється частота акустичного випромінювання, що зумовлено ефектом Доплера. Також при виконанні маневру занає змін орієнтація БПЛА відносно точки спостереження і через спрямованість акустичного випромінювання змінюється інтенсивність акустичного поля в точці прийому. За таких умов амплітуди деяких вищих гармонік можуть перевищувати амплітуди низькочастотних гармонік (у переважній же більшості випадків перша

гармоніка має найбільшу амплітуду). Модель такого ЧМ сигналу акустичного випромінювання ДВЗ та повітряного гвинта БПЛА літакового типу можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} s_{ДВ} (t) &= \sum_{i=1}^{M \cdot M_{ГВ}} A_i \sin \left\{ 2\pi \left[F + A_{m_i} \sin (2\pi F_m t) \right] it + \varphi_i \right\}; \\ s_{ГВ} (t) &= \sum_{i=1}^{M_{ГВ}} A_i \sin \left\{ 2\pi M \left[F + A_{m_i} \sin (2\pi F_m t) \right] it + \varphi_i \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де A_{m_i} – індекс частотної модуляції акустичного сигналу, що виникає внаслідок зміни режиму роботи двигуна або виконання маневру;

F_m – частота модуляції, викликана вказаними ефектами.

Крім білого адитивного шуму, акустичні сигнали можуть прийматися на фоні інших сигналів, характерних для поля бою: шум двигунів бронетехніки, постріли зі стрілецької зброї, мінометів та артилерії. Модель першого виду шумів має гармонічний характер, аналогічний до акустичного випромінювання БПЛА з ДВЗ. Відмінність полягає в значно меншій частоті першої гармоніки акустичного випромінювання.

Через багатокomпонентність та нестационарність акустичного випромінювання тактичних БПЛА його аналіз як в часовій, так і в частотній областях є досить ускладненим. Більш інформативним буде дослідження таких сигналів у частотно-часовому просторі.

2. Формулювання вимог до ЧЧР. ЧЧР є ефективним інструментом для виділення інформації з нестационарних сигналів, такої як: кількість складових, їх відносні амплітуди, тривалість і ширина смуги частот і закони зміни миттєвої частоти (МЧ). Ефективність ЧЧР залежить від типу аналізованого сигналу [17].

Правильний вибір ЧЧР для аналізу багатокomпонентних нестационарних сигналів, до яких належить і акустичне випромінювання тактичних БПЛА, є досить складним завданням. Загальні підходи до його вирішення описані в роботах [18–21]. Ще більше ускладнює дане завдання ситуація, коли необхідно провести одночасне розділення складових сигналів, які належать кільком БПЛА.

Вибір ЧЧР можна проводити на основі візуального спостереження результатів ЧЧА тестового багатокomпонентного сигналу. Оптимальним вважатиметься той ЧЧР, результат якого дає найвищу концентрацію енергії складових сигналу й найефективніше подавлення комбінаційних складових (у разі використання нелінійних ЧЧР), а також дозволяє отримати найкращі оцінки закону зміни МЧ складових.

Для багатокomпонентних ЧМ сигналів ефективність застосування ЧЧР можна виразити через такі показники:

концентрація ЧЧР навколо очікуваної МЧ кожної складової сигналу;

розділення сигналів, що вимірюється роздільною здатністю за частотою головних пелюсток, включаючи ефект комбінаційних складових.

3. Адаптація параметрів ядра ЧЧР для аналізу акустичного випромінювання тактичних БПЛА. Оскільки обробку сигналів на даний час у переважній більшості випадків здійснюють у цифровій формі, то виконаємо перехід від неперервних величин

(час, частота, часова затримка, зсув частоти) до дискретних аналогів: $t \rightarrow n, f \rightarrow k, \tau \rightarrow m, \nu \rightarrow l$.

Найбільш стандартним підходом до аналізу сигналів зі змінною в часі частотою вважається розбиття сигналу в часовій області на сегменти з подальшим перетворенням Фур'є (ПФ) кожного з цих сегментів. Дане віконне ПФ (ВПФ) можна виразити в такому вигляді [17, 22]:

$$\mathcal{F}_x^w [n, k] = STFT [n, k] = \sum_{m=0}^{N-1} x[n+m] w[m] e^{-j2\pi \frac{mk}{N}}, \quad (5)$$

де N – кількість відліків сигналу;

$x[n]$ – відліки дискретного вхідного сигналу;

$w[m]$ – відліки дискретної віконної функції.

З виразу (5) випливає, що ВПФ є ПФ сигналу $x[n]$, зваженого вікном $w[m]$ і центрованого в момент часу n . З такого подання чітко видно, що ВПФ задовольняє властивості лінійності.

Результат ВПФ можна інтерпретувати як проєкції функції $x[m]$ на базис $w^*[m-n] \exp\{j2\pi km/N\}$ з параметрами n і k . Оскільки тривалість даного базису скінченна, то з'являється можливість спостереження частотного спектра сигналу як функції часу.

Визначення ВПФ можна також записати в частотній області:

$$\mathcal{F}_x^w [n, k] = \sum_{l=0}^{N-1} X[l] W[k-l] e^{j2\pi \frac{ln}{N}}, \quad (6)$$

де $X[k]$ і $W[k]$ – ПФ від $x[n]$ і $w[n]$ відповідно.

З виразів (5) і (6) випливає, що частотно-часове зображення сигналу можна отримати за допомогою рухомих вікон у часі або за частотою. Таким чином, роздільна здатність у часі обмежена тривалістю вікна $w[n]$. Аналогічно розділення за частотою обмежується шириною частотного вікна $W[k]$. Оскільки ширина вікон у часовій та частотній областях обернено пропорційна, то вузьке вікно спричиняє покращення розділення в часовій області та його погіршення в частотній, що є наслідком нерівності Габора – Гейзенберга.

Очевидно, що вибір віконної функції відіграє вирішальну роль при локалізації сигналу на частотно-часовій площині, оскільки реєстрація або безпосередня обробка сигналів є процесом, що має скінченну тривалість. Крім того, вид віконної функції $w[n]$ становить компромісне рішення між рівнем бічних пелюсток та шириною головної пелюстки. Особливо гостро проблема вибору даної функції постає тоді, коли необхідно отримати високу роздільну здатність за частотою в широкому динамічному діапазоні значень амплітуд сигналів. Оскільки спектральні лінії акустичного випромінювання кількох БПЛА рознесені одна від одної на досить малі частотні інтервали, а їх амплітуди

можуть змінюватися в досить широкому динамічному діапазоні, то необхідно обрати таке вікно, що має мінімальні рівень бічних пелюсток та ширину основної пелюстки. Даній вимозі відповідає вікно Дольфа – Чебишева, яке при заданому рівні бічних пелюсток має мінімальну ширину основної пелюстки серед решти віконних функцій [23].

Якщо описати багатокomпонентний сигнал $x[n]$ у вигляді суми P складових $x_p[n]$:

$$x[n] = \sum_{p=1}^P x_p[n] = \sum_{p=1}^P A_p[n] e^{j\phi_p[n]}, - \quad (7)$$

то ВПФ даного сигналу дорівнює сумі ВПФ кожної з них:

$$STFT[n, k] = \sum_{p=1}^P STFT_p[n, k], - \quad (8)$$

що відповідає ЧЧР без комбінаційних складових. Дана властивість втрачається при використанні квадратичних ЧЧР та ЧЧР вищих порядків для аналізу багатокomпонентних сигналів.

Спектрограму багатокomпонентного сигналу можна записати як квадрат модуля ВПФ:

$$SP[n, k] = |STFT[n, k]|^2 = \sum_{p=1}^P |STFT_p[n, k]|^2, - \quad (9)$$

що виконується лише для випадку, коли ВПФ складових багатокomпонентного сигналу $STFT_p[n, k]$, $p = 1, 2, \dots, P \leq$, не накладаються в частотно-часовій площині, тобто

$$STFT_p[n, k] STFT_d^*[n, k] = 0 \text{ для } \forall(n, k), \text{ якщо } p \neq d. \quad (10)$$

У загальному випадку

$$SP[n, k] = \sum_{p=1}^P |STFT_p[n, k]|^2 + \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq p}}^P STFT_p[n, k] STFT_d^*[n, k], \quad (11)$$

де другий доданок у правій частині рівняння описує результат взаємодії двох компонент сигналу (комбінаційна складова). Комбінаційні складові є небажаними і виникають внаслідок нелінійної структури спектрограми. У даному випадку вони виникають лише тоді, коли ЧЧР складових накладаються в частотно-часовій площині. Для інших квадратичних ЧЧР комбінаційні складові можуть виникати навіть тоді, якщо компоненти сигналу не накладаються.

Спектрограму дуже просто отримати, проте вона забезпечує низьке частотно-часове розділення. Кращу локалізацію спектральних складових у часі можна отримати шляхом використання квадратичних ЧЧР. Найбільш простим серед них є розподіл Вігнера – Віля WV (РВВ) [17], для якого характерна найкраща роздільна здатність серед решти квадратичних розподілів. Проте на практиці його майже не використовують через появу

значно виражених небажаних комбінаційних складових при аналізі багатокomпонентних сигналів.

Шляхом зважування РВВ ядром час-часова затримка $G[n, m]$ можна отримати узагальнений квадратичний ЧЧР (прототип):

$$\rho_z[n, k] = \sum_{m=0}^{N-1} G[n, m]_n^* z[n+m] z^*[n-m] e^{-j4\pi k \frac{m}{N}} = \sum_{m=0}^{N-1} G[n, m]_n^* W_{V_z}[n, k], \quad (12)$$

де $z[n]$ – аналітичний сигнал.

У загальному випадку ЧЧР, що застосовують для аналізу безперервних сигналів, можна розділити на: лінійні (ВПФ, перетворення Габора) та нелінійні (РВВ, розподіли Борна – Жордана, Зао – Атласа – Маркса, Чої – Вільямса, Пейджа, Ріхачека, Маргенау – Хілла та їхні псевдо- і згладжені версії) [17]. Особливостями застосування даних розподілів для аналізу акустичного випромінювання тактичних БПЛА є те, що лінійні розподіли мають невисоку роздільну здатність за частотою і не утворюють комбінаційних складових; нелінійні ж володіють високим розділенням за частотою, проте утворюють значні комбінаційні складові. Для згладжених версій нелінійних ЧЧР широке вікно ядра призводить до зменшення рівня комбінаційних складових і в той же час погіршує розділення складових сигналів.

Для уникнення протиріч частотно-часового відображення багатокomпонентних сигналів і покращення роздільної здатності як за часом, так і за частотою було запропоновано принцип зміщення [24]. Він може бути застосованим для значної кількості ядер ЧЧР.

Аналіз виразу (12) показує, що $G[n-m, k-l]$ обмежує частотно-часову область в околі точки $[n, k]$, усередині якого проводиться зважене усереднення значень РВВ. Ключова ідея зміщення полягає в тому, що ці значення необов'язково повинні бути симетрично розподілені навколо точки $[n, k]$, що є геометричним центром області. Крім того, це середнє значення може бути зміщене з геометричного центру області в її центр мас, що буде більш наочним щодо локального розподілу енергії.

Локальні центроїди тоді можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{n}_z[n, k] &= \frac{1}{\rho_z[n, k]} \mathcal{F}_{m \rightarrow k} \mathcal{F}_{l \rightarrow n} \{m \cdot W_{V_z}[m, l] G[n-m, k-l]\}; \\ \hat{k}_z[n, k] &= \frac{1}{\rho_z[n, k]} \mathcal{F}_{m \rightarrow k} \mathcal{F}_{l \rightarrow n} \{k \cdot W_{V_z}[m, l] G[n-m, k-l]\}, - \end{aligned} \quad (13)$$

а відповідний зміщений розподіл може бути записаний як

$$\check{\rho}_z[n, k] = \mathcal{F}_{m \rightarrow k} \mathcal{F}_{l \rightarrow n} \left\{ \rho_z[m, l] \delta[n - \hat{n}_z[m, l]] \delta[k - \hat{k}_z[m, l]] \right\}. \quad (14)$$

З теоретичної точки зору зміщене відображення ЧЧР не належить до квадратичних. Однією з найважливіших властивостей принципу зміщення є те, що застосування виразів

(13)–(14) до будь-якого ЧЧР спричиняє найкращу локалізацію розподілів для сигналів з лінійною ЧМ, а також гармонічних та імпульсних сигналів. Під час аналізу багатокомпонентних сигналів зміщення розподілів певною мірою усуває протиріччя між рівнем комбінаційних складових і роздільною здатністю.

4. ЧЧА акустичного випромінювання тактичних БПЛА. ЧЧА акустичного випромінювання тактичних БПЛА проведемо в середовищі математичного моделювання Matlab. Загальний підхід до проведення подібного аналізу нестационарних багатокомпонентних сигналів викладено в [25].

На основі виразів (1–4) створимо такі тестові сигнали, що можуть описувати реальні акустичні сигнали випромінювання тактичних БПЛА на полі бою:

модель № 1 – сума немодульованих гармонік;

модель № 2 – сума немодульованих гармонік та імпульсних сигналів;

модель № 3 – сума ЧМ гармонік;

модель № 4 – сума немодульованих гармонік, ЧМ та імпульсних сигналів.

Амплітуди гармонік для моделювання сигналів акустичного випромінювання БПЛА оберемо рівними амплітудам гармонік реального сигналу БПЛА з ДВЗ (табл. 1).

Таблиця 1

Амплітуди гармонік акустичного випромінювання тактичного БПЛА

Номер гармоніки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота, Гц	172	343	515	690	858	1033	1201	1380	1555	1730
Нормована амплітуда	1,00	0,14	0,2	0,08	0,083	0,032	0,07	0,043	0,026	0,034

Довжину сигналу для моделювання – кількість вибірок N – оберемо рівною $N = 512$. Тоді при частоті дискретизації $f_{\delta} = 8$ кГц (що відповідає теоремі Котельникова) нормована частота першої гармоніки становитиме

$$f_{\text{норм1}} = \frac{f_1}{f_{\delta}} = \frac{343}{8000} \approx 0,043 \text{ або } k = 0,043 \cdot N \approx 22 \text{ бін.} \quad (15)$$

ЧЧА сигналу моделі № 1 показав, що задовільні результати як щодо відображення змін МЧ сигналу, так і за рівнем комбінаційних складових дають зміщена спектрограма та розподіл Зао – Атласа – Маркса (рис. 2). Спектрограма порівняно зі своєю зміщеною версією має гіршу роздільну здатність за частотою. Зміщений згладжений псевдорозподіл Вігнера – Віля утворює комбінаційні складові та не відображає характеру зміни частоти вищих гармонік. Зміщений псевдорозподіл Маргенау – Хілла утворює значні комбінаційні складові для нижчих гармонік на початку і в кінці інтервалу аналізу та володіє погіршеною роздільною здатністю при відображенні вищих гармонік. Подібні властивості мають розподіли Ріхачека та Пейджа. Згладжений псевдорозподіл Чої – Вільямса (подібний до розподілу Борна – Жордана) утворює значні комбінаційні складові, паралельні осі частот. Довжина вікон як в часовій, так і в частотній областях становила $N = 512$, тип вікон – Дольфа – Чебишева, рівень бічних пелюсток – 60 дБ.

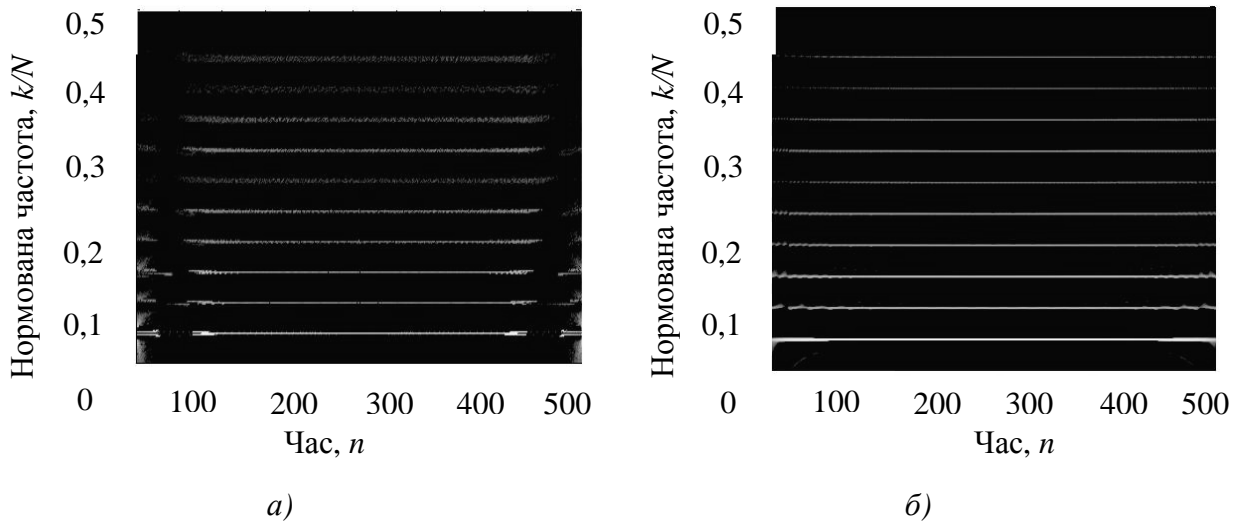


Рис. 2. ЧЧР сигналу моделі № 1: а) зміщена спектрограма; б) розподіл Зао – Атласа – Маркса

Дана модель сигналу є найбільш простою, тому ЧЧР, що не задовольняють вимоги за роздільною здатністю, здатністю відображення закону зміни МЧ та рівнем комбінаційних складових, на більш складних моделях сигналів матимуть ще гірші показники.

Параметри моделі № 2: амплітуда імпульсних перешкод – 10; часове положення імпульсів $n_1 = N/3$ і $n_2 = 2N/3$; нормована частота заповнення – $F = f_{норм1}$; форма – експоненціальна; тривалість – $5/f_{норм1}$. Задовільне відображення складових сигналу надає лише зміщена спектрограма. При цьому довжина вікна обиралася рівною $N = 128$, оскільки при більшій довжині імпульсні перешкоди потрапляють в одне вікно для обробки, що призводить до утворення значних комбінаційних складових (рис. 3б). У свою чергу, зменшення довжини вікна призводить до погіршення розділення за частотою. Розподіл Зао – Атласа – Маркса незадовільно відображає даний сигнал на частотно-часовій площині через значний рівень комбінаційних складових.

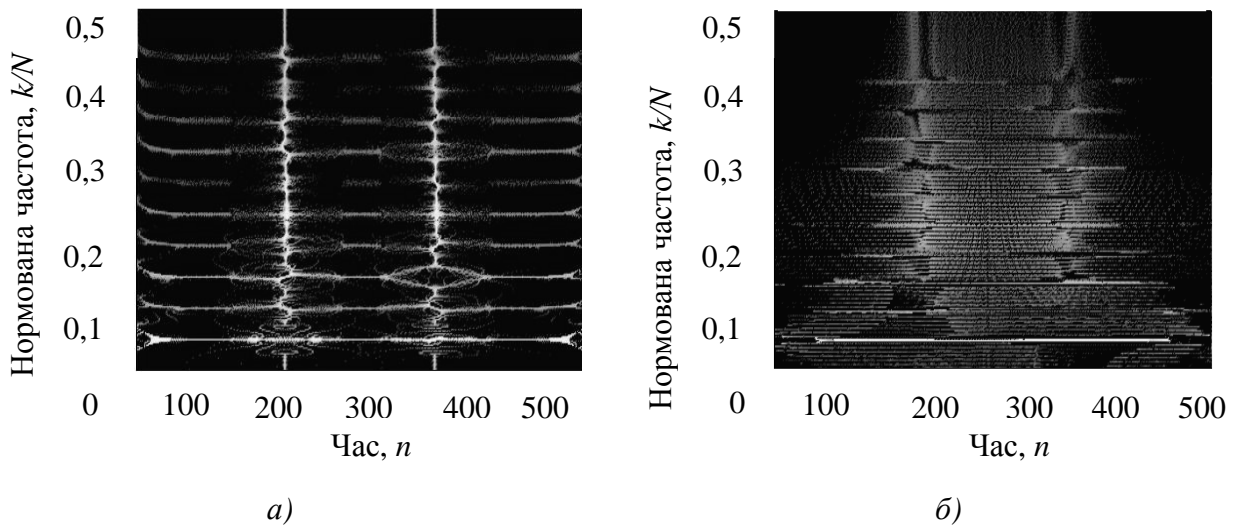


Рис. 3. ЧЧР сигналу моделі № 2: а) зміщена спектрограма, $N1=128$; б) зміщена спектрограма, $N1=512$

Параметри моделі № 3: період модуляції $T = 5N/6$; кількість складових – 8; нормована девіація частоти – 0,05. Параметри моделі № 4: сума 5 немодульованих гармонік з основною нормованою частотою 0,08, сума 8 ЧМ гармонік модель (№ 3) та імпульсні перешкоди. Як видно з рис. 4, проведення аналізу даних сигналів як в часовій, так і в частотній областях є досить складним.

Більш інформативним буде відображення даних сигналів в частотно-часовій області (рис. 5). Зміщена спектрограма досить добре відображає зміну МЧ багатоконпонентного ЧМ сигналу (рис. 5а). При цьому довжина вікна повинна бути близькою до четверті періоду модуляції сигналу. Якщо обрати більш коротке вікно, то це призведе до погіршення роздільної здатності за частотою, якщо більш довге – відбуватиметься згладжування вздовж осі частот і досить складно буде відслідкувати зміну частоти сигналу. Значна кількість близькорозташованих складових сигналів з різними законами ЧМ на фоні імпульсних перешкод призводить до спотворення відображення МЧ (особливо вищих гармонік) (рис. 5б). Це пояснюється зміщенням МЧ складової з меншою амплітудою вбік найближчої складової з більшою амплітудою.

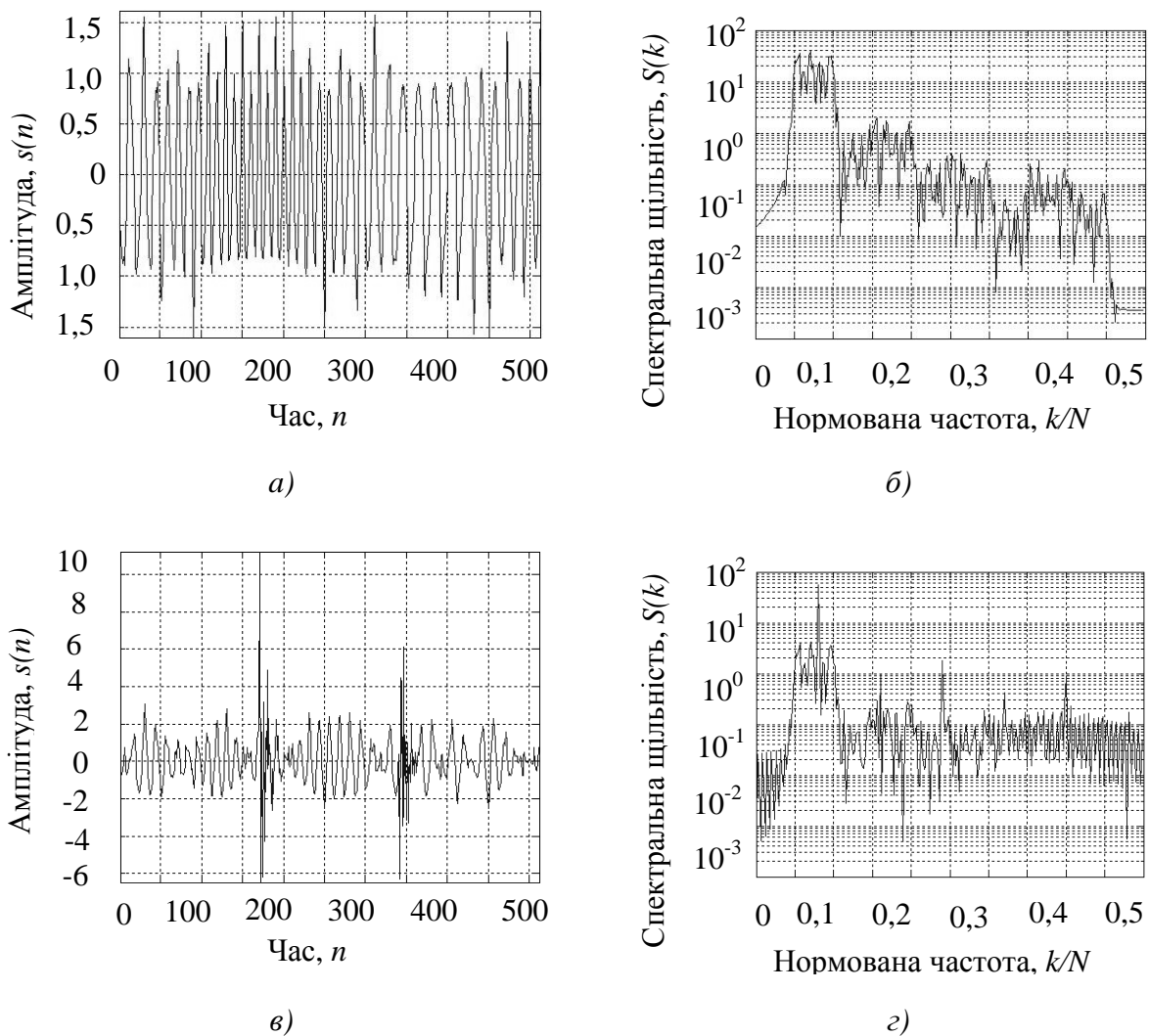


Рис. 4. Часові реалізації (а, в) та спектри (б, г) сигналів, заданих моделями № 3 та № 4

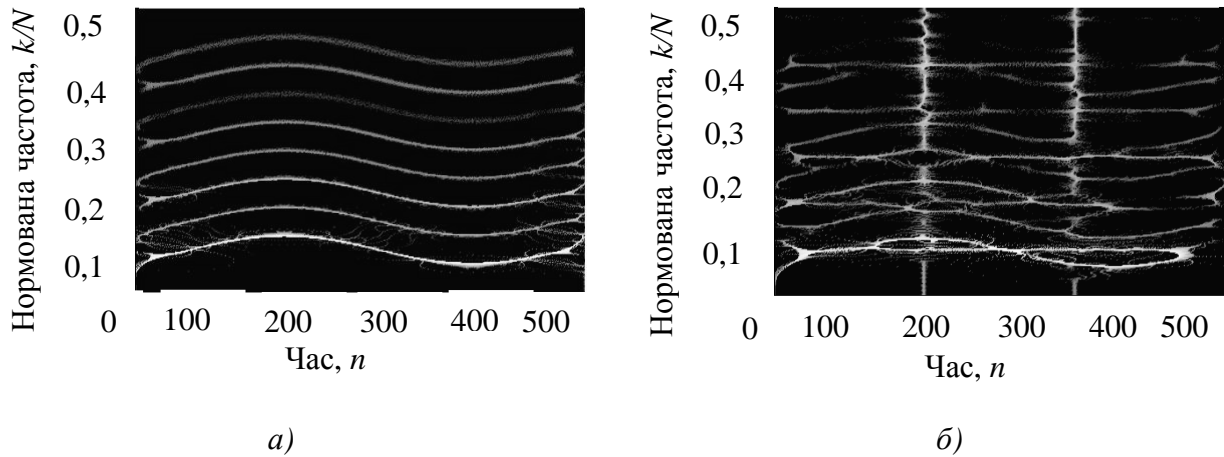


Рис. 5. Зміщена спектрограма сигналів, заданих моделями № 3 (а) та № 4 (б)

Висновки. Акустичне випромінювання тактичних БПЛА в загальному випадку має нестационарний характер і багатокомпонентну гармонічну структуру. В умовах невизначеності щодо кількості тактичних БПЛА, динаміки їх руху та режиму роботи двигунів завдання розділення акустичних сигналів як в часовій, так і в частотній областях стає досить складним. Для його більш простого вирішення необхідно проводити частотно-часову обробку прийнятих акустичних сигналів. За ЧЧР доцільно обрати зміщену спектрограму з попередньою обробкою сигналу вікном Дольфа – Чебишева. Подальшу обробку отриманої спектрограми можна проводити на основі перетворення Хафа, що при лінійній апроксимації законів зміни МЧ на коротких проміжках часу дасть змогу виявляти сигнали акустичного випромінювання тактичних БПЛА при малих відношеннях сигнал/шум.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ferguson B. G. Application of the short-time Fourier transform and the Wigner-Ville distribution to the acoustic localization of aircraft / B. G. Ferguson, B. G. Quinn // J. Acoust. Soc. Am. – 1994. – Vol. 96, № 2. – P. 821–827.
2. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol 51, № 3. – P. 279–283.
3. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5417. – P. 24–29.
4. Zelnio A. M. Detection of small aircraft Using an acoustic array. Thesis. B.S / A. M. Zelnio. – Electrical Engineering, Wright State University, 2007. – 55 p.
5. Зінченко С. А. Пасивна акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів / С. А. Зінченко, В. Ф. Свіжевський // Тези доп. наук.-тех. конф. [Інформаційна безпека України], (Київ, 12–13 березня 2015 р.). – К. : КНУ, 2015. – С. 74–75.
6. Minas B. Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array / B. Minas, G. H Goldman. – Adelphi, MD 20783–1138, ARL-TR-7086 Report, 2014. – 34 p.
7. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models / J. J. Beel. – Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. – P. 36–46.

8. Sinibaldi G. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV / G. Sinibaldi, L. Marino // *Applied Acoustics*. – 2013. – № 74. – P. 79–88.
9. Saravanakumar A. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor / A. Saravanakumar, K. Senthilkumar // *Defence Science Journal*. – March 2014. – Vol. 64, №. 2. – P. 95–98.
10. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым двигателем в толкающей компоновке / В. Ф. Самохин, С. П. Остроухов, П. А. Мошков // *Труды МАИ : электронный журнал*. – 2012. – Вып. № 70. – С. 1–24.
11. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // *16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference, 2010*. – P. 1–16.
12. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // *16th AIAA 2010-3854/CEAS Aeroacoustics Conference, 2010*. – P. 1–14.
13. Соловйов О. В. Експериментальні дослідження рівня шуму БПЛА «Стрепет-М» / О. В. Соловйов // *Зб. наук. праць Харківського ун-ту Повітряних Сил*. –Х. : ХУПС, 2010. – Вип. 2 (24). – С. 36–39.
14. Ганеев Р. М. Математические модели в задачах обработки сигналов / Р. М. Ганеев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – С. 30.
15. Александров В. Л. Воздушные винты / В. Л. Александров. – М. : Гос. изд-во оборонной промышленности, 1951. – С. 376–377.
16. Джонсон У. Теория вертолета : в 2 кн. / У. Джонсон ; пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – Кн. 1. Авиационная и ракетно-космическая техника. – С. 322–327.
17. Boashash B. Time Frequency Signal Analysis and Processing. A Comprehensive Reference / B. Boashash. – ELSEVIER Ltd, 2003. – P. 235.
18. Hussain Z. Design of time-frequency distributions for amplitude and IF estimation of multicomponent signals / Z. Hussain, B. Boashash. – *Proc IEEE ISSPA, 2001*. – P. 339–342.
19. Choi H. Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels / H. Choi, W. Williams // *IEEE Trans. Signal Processing*, 1989. – Vol. 37. – P. 862–871.
20. Hussain Z. Adaptive instantaneous frequency estimation of multicomponent FM signals using quadratic time-frequency distributions / Z. Hussain, B. Boashash // *IEEE Trans. Signal Processing*. – 2002. – Vol. 50 (8). – P. 1866–1876.
21. Lerga J. An Efficient Algorithm for Instantaneous Frequency Estimation of Nonstationary Multicomponent Signals in Low SNR / J. Lerga, V. Sucic, B. Boashash // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing «Recent Advances in Theory and Methods for Nonstationary Signal Analysis»*. – Hindawi Publishing Corporation, 2011. – P. 1–16.
22. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : в 2 т. / Ж. Макс ; пер. с франц. – М. : Мир, 1983. – Т. 2. – С. 212.
23. Prabhu K. M. M. Window functions and their applications in signal processing / K. M. M. Prabhu. – Taylor & Francis Group, LLC, 2014. – P. 106.
24. Kodera K. A new method for the numerical analysis of nonstationary signals / K. Kodera, C. de Villedary // *Gendrin Physics of the Earth, Planetary Interiors*. – 2001. – Vol. 12. – P. 142–150.
25. Time-Frequency Toolbox: For Use with Scilab / H. Nahrstaedt, F. Auger, P. Flandrin et al. – France, Centre National de la Recherche Scientifique, 1996. – 152 p.

Подано 03.09.2015

Ю. Г. Даник, Н. В. Бугаёв

**ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ТАКТИЧЕСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

В статье предложена модель акустического излучения тактических беспилотных летательных аппаратов. Сформулированы требования к частотно-временному распределению, описана проведенная адаптация ядра для анализа акустических сигналов. Показано, что в качестве частотно-временного распределения целесообразно использовать смещенную спектрограмму с предварительной обработкой сигнала окном Дольфа – Чебышева.

Y. G. Danyk, M. V. Bougaiov

**TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF TACTICAL UNMANNED AERIAL VEHICLES
ACOUSTIC EMISSION**

Model of tactical unmanned aerial vehicles acoustic emission is built. Requirements for time-frequency distribution are given and adaptation of kernel for acoustic signal analysis is performed. Shown, that it's reasonable to use reassigned spectrogram with previous Dolph – Chebyshev window signal processing.