

Ю.Г. Даник, д.т.н., проф.

І.В. Пулеко, к.т.н., доц.

М.В. Бугайов, ад'юнкт

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Державного університету телекомунікацій

ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ ТА РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Проблема виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пов'язана з їх низькою помітністю як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль. Перспективним напрямком вирішення даної проблеми є комплексування інформації, що надходить по каналах різної фізичної природи. Оскільки сигнали як в акустичному, так і в радіолокаційному діапазонах модулюються частотою обертання ротора (колінвала) двигуна, то з'являється можливість сумісної обробки цих сигналів. Метою досліджень є розробка методу виявлення БПЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному та радіолокаційному діапазонах. Для виявлення сигналів акустичного випромінювання БПЛА на максимальній відстані необхідно проводити гармонічний аналіз прийнятого сигналу. Для цього побудовано двоканальну кореляційну схему виявлення, в якій як опорний сигнал використано сигнали «гвинтової» модуляції БПЛА. Оскільки акустичний сигнал можна представити у вигляді суми гармонік з кратними частотами і невідомими випадковими початковими фазами, а відбиті від лопатей гвинта радіосигнали через жорсткість структури його елементів мають когерентну структуру, необхідно проводити кореляційну квадратурну обробку. Шум, що надходить на вхід схеми обробки як по радіолокаційному, так і по акустичному каналах, некорельований через свою випадкову природу. Це дає змогу виявляти з високим рівнем ймовірності нерухомі БПЛА за наявності як пасивних перешкод, так і гармонічних акустичних сигналів, не пов'язаних з шумом БПЛА.

Ключові слова: акустичний портрет БПЛА; «гвинтова» модуляція; детектор гармонік; періодограма; двоканальна кореляційна обробка.

Вступ. Постановка проблеми. Проблема виявлення БПЛА від тактичного рівня і нижче пов'язана з їх низькою помітністю, як в електромагнітному так і в акустичному діапазонах довжин хвиль, та особливостями траєкторії – висота польоту може змінюватися від кількох метрів до кількох кілометрів, а швидкості, як правило, не перевищує 200 км/год. БПЛА вертолітного та коптерного типів можуть також зависати в складках місцевості з подальшою зміною траєкторії [5].

Робота наземних радіолокаційних станцій (РЛС) по таких цілях обмежується відбиттями від підстилаючої поверхні. Пасивні перешкоди мають складну часову та просторову структури і можуть маскувати цілі на вході приймача. Оскільки сигнал від пасивної перешкоди завжди набагато потужніший за корисний сигнал і через недостатню стабільність форми зондуючого сигналу (ЗС), робота сучасних імпульсних РЛС по малих цілях, що низько летять, часто обмежується проходженням в канали обробки відбитих від місцевих предметів сигналів, навіть після їх режекції [1].

Все це по-новому висвітлює підходи до створення засобів виявлення таких літальних апаратів. Перспективним є комплексування інформації, що надходить по каналах різної фізичної природи, наприклад акустичному та радіолокаційному. Завдяки бурхливому розвитку пристроїв та алгоритмів цифрової обробки сигналів на характеристики поширення акустичних та відбитих радіолокаційних сигналів від пропелерів літальних апаратів останнім часом проявляють підвищений інтерес [7–9, 11]. Оскільки сигнали як в акустичному, так і в радіолокаційному діапазонах модулюються частотою обертання ротора (колінвала) двигуна, то з'являється можливість сумісної обробки таких сигналів з подальшим їх виділенням як на фоні пасивних перешкод, так і в присутності інших гармонічних сигналів [6].

Метою досліджень є розробка методу виявлення БПЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному та радіолокаційному діапазонах.

Викладення основного матеріалу дослідження. Аналіз спектральної сигнатури «гвинтової» модуляції БПЛА. Спектральна структура відбитого від БПЛА електромагнітного сигналу має частотні складові від фюзеляжу, від валу гвинта, від лопатей гвинта, що наближаються і віддаляються. Найпотужнішу спектральну складову має сигнал, відбитий від фюзеляжу. Спектр «гвинтової» модуляції симетричний (відносно лінії планера) за частотою, але асиметричний за амплітудою, причому характер амплітудної асиметрії залежить від ракурсу спостереження. Для літальних апаратів, що наближаються,

вища інтенсивність складових нижньої бічної смуги, а для тих, що віддаляються – верхньої. Це пояснюється відмінністю форми передньої та задньої кромки лопатей гвинта [7–8, 11].

Спектр «гвинтової» модуляції сигналу БПЛА літакового типу виникає в тому випадку, коли робоча довжина хвилі ЗС λ задовольняє умові:

$$\lambda < \frac{4\pi L \sin \gamma}{N}, \quad (1)$$

а відбитого від лопатей гвинта БПЛА коптерного типу:

$$\lambda < \frac{4\pi L \cos \varepsilon}{N}, \quad (2)$$

де L – довжина лопатей гвинта; γ – ракурс опромінення цілі, що являє собою кут між геометричною віссю цілі в напрямку її польоту і напрямком від неї на РЛС; ε – кут місця цілі; N – кількість лопатей гвинта.

При обертанні лопатей гвинта змінюється як їх положення відносно РЛС, так і ефективна поверхня розсіювання (ЕПР). Причому характер зміни не плавний, а порівняно різкий. Кожна лопать гвинта для конкретного ракурсу спостереження цілі має одне положення в повному оберті, що відповідає максимальному значенню ЕПР лопаті і моменту максимальної амплітуди відбитого від неї сигналу.

Відбитий від прямокутних лопатей гвинта смуговий сигнал можна записати у наступному вигляді [7]:

$$s_L(t) = L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + d_0 \sin \beta] \right\} \left\{ -j \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(2\pi\Omega t + \varphi_0) \right\} \cdot \text{sinc} \left\{ \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(2\pi\Omega t + \varphi_0) \right\}, \quad (3)$$

де R_0 – відстань від РЛС до БПЛА; φ_0 – початковий кут повороту гвинта; d_0 – відстань від центру БПЛА до центру гвинта; β – кут місця для БПЛА вертолітного типу або напрямком польоту БПЛА і перпендикуляром до лінії спостереження РЛС; Ω – частота обертання гвинта; $\text{sinc}(\cdot)$ – sinc функція: $\text{sinc}(x) = 1$ для $x = 0$, і $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ для $x \neq 0$.

Для гвинта з N лопатями кожна лопать може мати N різних початкових кутових положень:

$$\varphi_n = \varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N}. \quad (4)$$

Тоді сумарний прийнятий сигнал запишеться у вигляді:

$$s_\Sigma(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{L_n}(t) = L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_0 + d_0 \sin \beta] \right\} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc} \left\{ \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos \left(2\pi\Omega t + \varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N} \right) \right\} \exp \{ -\Phi_n(t) \}, \quad (5)$$

де фазова функція:

$$\Phi_n(t) = \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos \left(2\pi\Omega t + \varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (6)$$

Оскільки похідна від фазової функції $\Phi_n(t)$ сигналу являє собою миттєве значення частоти сигналу, миттєве значення доплерівського зсуву частоти сигналу, відбитого від n -ої лопаті, можна записати у вигляді:

$$f_n(t) = \frac{d\Phi_n(t)}{dt} = \frac{2\pi L \Omega}{\lambda} \cos \beta \left[-\sin \left(\varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N} \right) \cdot \sin 2\pi\Omega t + \cos \left(\varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N} \right) \cdot \cos 2\pi\Omega t \right] = \frac{2\pi L \Omega}{\lambda} \cos \beta \cos \left(2\pi\Omega t + \varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N} \right). \quad (7)$$

Нехай РЛС працює в X -діапазоні з довжиною хвилі $\lambda = 0,03$ м. Гвинт БПЛА літакового типу має дві лопаті й обертається зі сталою кутовою швидкістю $\Omega = 50$ об./с, а довжина лопаті становить $L = 0,5$ м. БПЛА рухається під кутом $\beta = 10^\circ$ до перпендикуляра лінії спостереження РЛС на відстані $R = 2000$ м. На рисунку 1 наведено часову реалізацію відбитого від лопатей БПЛА сигналу.

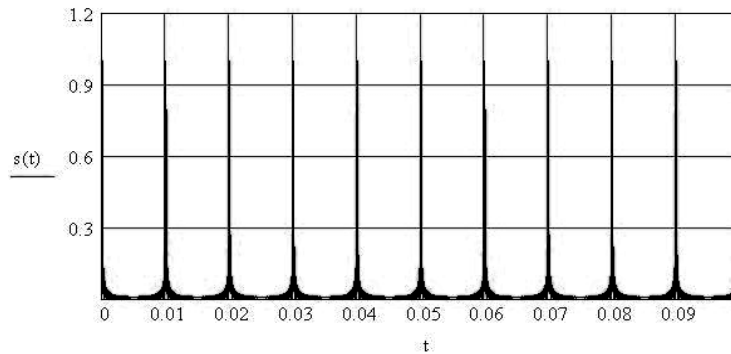


Рис. 1. Часова реалізація відбитого від лопатей гвинта сигналу

Як бачимо, відбитий від системи лопатей, що обертаються, сигнал являє собою послідовність радіоімпульсів (навіть при монохроматичному зондуючому сигналу), причому період повторення максимумів сумарного відбитого сигналу зменшується обернено пропорційно кількості лопатей і визначається як $T = 1/\Omega N$; в даному випадку складає 0,01 с. Когерентність цієї послідовності забезпечується жорсткістю конструкції гвинта [9].

Форма відбитого від лопаті сигналу визначається законом зміни її ЕПР при обертанні, що залежить від ракурсу спостереження, а ефективна тривалість імпульсу – формою і розмірами лопаті і швидкістю обертання вала двигуна. Необхідно зазначити, що форма такого окремого сигналу визначає обвідну і ширину спектра «гвинтової» модуляції.

Спектр сигналу «гвинтової» модуляції у такому випадку являтиме собою набір гармонік на частотах k/T , де $k = 1, 2, \dots, K$. Максимальна частота в спектрі сигналу визначається максимальним значенням доплерівського зсуву частоти лопаті гвинта $f_{D_{\max}} = 2\Omega L \cos \beta / \lambda$. Тоді кількість спектральних ліній становитиме $K = [2L \cos \beta / \lambda]$, де $[\cdot]$ – ціла частина числа. На рисунку 2 представлено спектральну структуру відбитого від лопатей гвинта сигналу. Максимальна частота в спектрі сигналу складає 1600 Гц. Кількість гармонік – 16, що слідує з інтервалом 100 Гц.

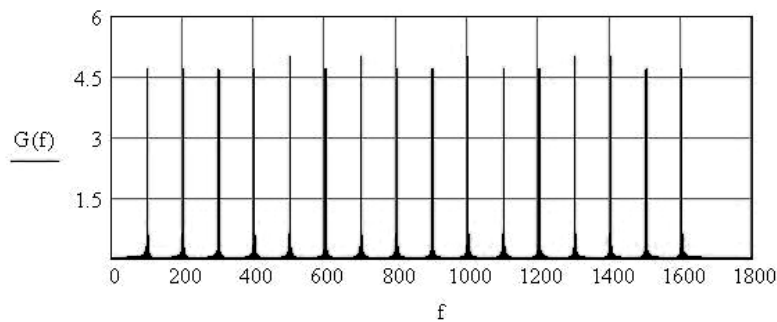


Рис. 2. Спектр відбитого від лопатей гвинта сигналу

Для імпульсно-доплерівської РЛС період повторення імпульсів визначає частоту дискретизації сигналу. Для отримання спектрального портрету з високою якістю мінімальна частота вибірки повинна задовольняти теорему Котельникова для уникнення накладання спектрів. Мінімальна необхідна частота повторення імпульсів $f_s \geq 2f_{D_{\max}}$, де $f_{D_{\max}}$ – максимальне значення частоти у спектрі «гвинтової» модуляції [9].

Аналіз акустичного портрету БПЛА. Дослідженню шумових характеристик БПЛА присвячена низка робіт як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників [2–4, 6, 10].

Сумарний спектр акустичного випромінювання БПЛА зумовлений гармонічними і широкосмуговими складовими. Спектр містить гармонічні складові випромінювання від двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), шуму обертання гвинта, випромінювання механічного походження, високочастотну і низькочастотну складову шуму двигуна з безперервним за частотою спектром.

У шумові силової установки БПЛА, що містить поршневий двигун повітряного охолодження за відсутності у вихлопному тракті двигуна глушника, визначальним джерелом зовнішнього шуму є

поршневий двигун. Сумарний рівень шуму силової установки БПЛА визначається, здебільшого, першими 10-ма гармоніками шуму двигуна і першими 5-ма гармоніками шуму обертання гвинта [10].

Дискретні складові спектра слідує з частотами $f_i = f_0 \cdot i$, що кратні частоті запалювання f_0 , де $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер відповідної гармонічної складової. На високих частотах роль періодичних процесів у формуванні спектра акустичного випромінювання двигуна помітно послаблюється, оскільки більш значну роль в сумарному акустичному випромінюванні починають відігравати процеси випадкового походження. Зокрема, для шуму випуску може виявитися суттєвою вихрова складова. Насправді ж, вихлопний тракт двигуна формує в середовищі послідовність імпульсів тиску, частотний спектр якої, являє собою комбінацію гармонічних і широкосмугових складових.

Типовий спектр акустичного випромінювання при роботі електричного двигуна (ЕД) на крейсерському режимі наведений на рисунку 3.

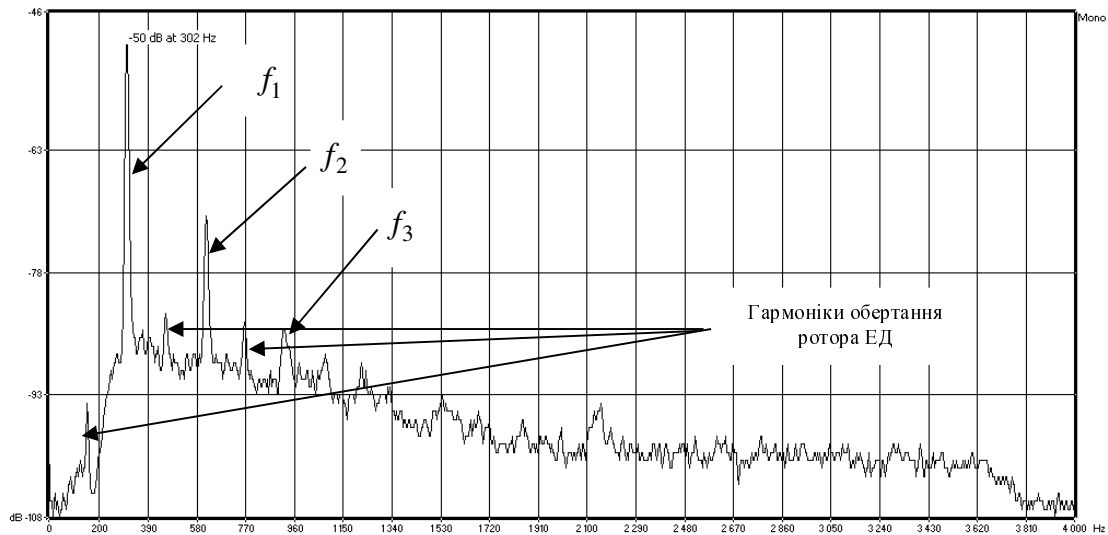


Рис. 3. Типовий спектр акустичного випромінювання БПЛА з електричним двигуном (частота обертання гвинта близько 9000 об./хв.)

Спектр випромінювання містить набір дискретних складових, максимуми обвідних яких розміщуються в області частот 300–900 Гц, тобто перших трьох гармонік. Перша гармоніка знаходиться на частоті $f_1 = 300$ Гц, що для гвинта з двома лопатями відповідає швидкості обертання ротора 150 об./с (9000 об./хв.). Наступні гармоніки слідує з частотами, кратними f_1 . Також в спектрі акустичного випромінювання можна спостерігати незначні за амплітудою гармонічні складові, що слідує з частотами, кратними частоті обертання ротор ЕД. Частоти гармонік шуму вихлопу з парними номерами близькі частотам гармонік шуму гвинта з двома лопатями і вважається, що рівні парних гармонік шуму зумовлені акустичним випромінюванням і гвинта і двигуна.

Таким чином, для ДВЗ спектральний акустичний портрет матиме гармоніки на частотах, що кратні частоті обертання колінвала двигуна. Для електричних двигунів спектр буде аналогічним спектру "гвинтової" модуляції та спектральні лінії будуть на частотах, кратних ΩN .

Фільтрація гармонік акустичного випромінювання БПЛА. Як було показано вище, акустичний шум БПЛА може бути представлений у вигляді суми гармонік з невідомими кратними частотами та випадковими початковими фазами. Припустимо, що виявлення акустичного випромінювання БПЛА здійснюється за допомогою детектора гармонік на фоні білого шуму $N(0, \sigma^2 I)$. Згідно з нульовою гіпотезою, вхідний сигнал містить лише шум. Згідно з альтернативною гіпотезою, вхідний сигнал складається із суми сигналу та білого шуму:

$$\begin{aligned} H_0: & \quad y = n, & y: N(0, \sigma^2 I) \\ H_1: & \quad y = s + n, & y: N(s, \sigma^2 I), \end{aligned} \quad (8)$$

де $s = \mathbf{A}\theta$, $\mathbf{A} = [a(\omega_1) a(\omega_2) \dots a(\omega_L)]$; $\theta = 1$ за наявності сигналу в прийнятій реалізації та $\theta = 0$ – за його відсутності; $a(\omega_i) = [1 \exp(j\omega_i) \dots \exp(j(M-1)\omega_i)]^T$; L – кількість гармонік, що використовується для представлення сигналу; M – кількість мікрофонів в акустичній антенній решітці; σ^2 – дисперсія шуму.

Гіпотеза H_1 відповідно до узагальненого співвідношення правдоподібності буде прийнята, якщо:

$$L(y; \hat{\theta}, \hat{\omega}_i) = \frac{p(y, \hat{\theta}, \hat{\omega}_i | H_1)}{p(y | H_0)} = \max_{\omega_i} \frac{\frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y - \mathbf{A}\hat{\theta})^H (y - \mathbf{A}\hat{\theta})\right]}{\frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} y^H y\right]} > \gamma, \quad (9)$$

де γ – поріг детектування; $N = T/\delta$ – кількість сегментів даних; T – час спостереження; δ – тривалість сегмента акустичного сигналу.

Далі проводиться оцінка θ для максимізації значення $L(y; \theta, \omega_i)$. Беручи похідну від логарифму $p(y, \theta, \omega_i | H_1)$ по θ і прирівнюючи її до нуля, отримаємо оцінку $\hat{\theta} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H y$, де $\hat{\theta} \approx \frac{1}{N} \mathbf{A}^H y$ в припущенні, що $\mathbf{A}^H \mathbf{A} \approx \frac{1}{N} \mathbf{I}$. Підстановка оцінки θ у вираз для $L(y; \hat{\theta}, \hat{\omega}_i)$ дасть:

$$L(y; \hat{\theta}, \hat{\omega}_i) = \max_{\omega_i} \exp\left(\frac{1}{2\sigma^2} \frac{y^H \mathbf{A} \mathbf{A}^H y}{N}\right) > \gamma. \quad (10)$$

Зазначимо, що:

$$\frac{1}{N} y^H \mathbf{A} \mathbf{A}^H y = \sum_{i=1}^L \frac{1}{N} \left| \sum_{t=1}^N y(t) \exp[-j\omega_i t] \right|^2 \quad (11)$$

і тоді періодограму y на частоті ω_i можна представити у вигляді:

$$I(\omega_i) = \frac{1}{N} \left| \sum_{t=1}^N y(t) \exp[-j\omega_i t] \right|^2. \quad (12)$$

Суму періодограм можна записати так:

$$q(\omega_1 \dots \omega_L) = \sum_{i=1}^L I(\omega_i). \quad (13)$$

Тоді

$$\frac{\partial q(\omega_1 \dots \omega_L)}{\partial \omega_i} = I'(\omega_i) \quad (14)$$

і

$$\frac{\partial^2 q(\omega_1 \dots \omega_L)}{\partial \omega_i \partial \omega_v} = I''(\omega_i) \delta_{i,v}. \quad (15)$$

Таким чином, максимальне значення виразу 13 задовольняє умовам $I'(\omega_i) = 0$ і $I''(\omega_i) < 0$ для $i = 1 \dots L$. Це показує, що набір максимальних значень періодограм заданий всіма можливими комбінаціями L елементів. Проте припускається, що сигнал займає смугу частот ширшу, ніж роздільна здатність періодограми, яка визначається виразом:

$$\Delta\omega = \inf_{i \neq v} |\omega_i - \omega_v| > 2\pi/T. \quad (16)$$

У припущенні, що найбільший максимум $q(\omega_1 \dots \omega_L)$ заданий положеннями L найбільших піків $I(\omega)$, узагальнене відношення правдоподібності тоді можна записати як:

$$L(y; \hat{\theta}, \hat{\omega}_i) = \max_{\omega_i} \sum_{i=1}^L I(\omega_i) > \gamma', \quad (17)$$

де $\gamma' = 2 \log \gamma$ і L – кількість піків. Параметр γ' обирається експериментальним шляхом для отримання необхідних показників якості виявлення.

Періодограма $I(\omega_i)$ може також бути записана через сегмент діаграмоутворюючих даних

$$I(\omega_i) = \frac{1}{N} |a^H(\omega_i) \beta(\phi, t)|^2. \quad (18)$$

де $\beta(\phi, t)$ – часовий сегмент акустичного випромінювання тривалістю δ .

Тоді статистика виявлення, відповідно до (17), може бути записана у вигляді:

$$D(\phi, t) = \max_{\omega_i} \sum_{i=1}^L I(\omega_i). \quad (19)$$

Причому, чим більша кількість гармонік додається, тим вища ймовірність виявлення. Детектор гармонік забезпечує вищу ймовірність виявлення, ніж енергетичний детектор, у разі слабких сигналів на фоні сильних перешкод. Проте у більшості практичних випадків частоти слідування гармонік невідомі і необхідно проводити оцінку їх значень для подальшої обробки.

Структурна схема пристрою виявлення. Для виявлення акустичних сигналів БПЛА на максимальній відстані необхідно використовувати гармонічний аналіз прийнятого сигналу. Для цього побудуємо двоканальну кореляційну схему виявлення, в якій як опорний сигнал використаємо сигнали «гвинтової» модуляції БПЛА (рис. 4). Оскільки акустичний сигнал можна представити у вигляді суми гармонік з кратними частотами і невідомими випадковими початковими фазами, а відбиті від лопатей гвинта радіосигнали через жорсткість структури його елементів мають когерентну структуру, тому необхідно проводити кореляційну квадратурну обробку. Ефективність виявлення БПЛА за їх акустичними сигнатурами можна оцінити, окремо розглянувши БПЛА з ЕД та ДВЗ. У таблиці 1 наведені частоти слідування гармонік в акустичному та радіолокаційному спектрах. В таблиці $l=1,2,\dots,L$ – номери гармонік, де L – кількість гармонік, що аналізується. Як бачимо, для БПЛА з ЕД акустична та радіолокаційна сигнатури мають гармоніки, що знаходяться на однакових частотах. В акустичному спектрі БПЛА з ДВЗ збігатимуться лише половина гармонік зі спектром «гвинтової» модуляції для гвинта з двома лопатями. При збільшенні кількості лопатей гвинта, кількість гармонік, що співпадатимуть, буде зменшуватися.

Таблиця 1

Частоти слідування гармонік акустичного та радіолокаційного спектрів

Показник	Акустична сигнатура		Радіолокаційна сигнатура
	електричний двигун	двигун внутрішнього згорання	
Частоти слідування гармонік спектра	$N\Omega_l$	Ω_l	$N\Omega_l$

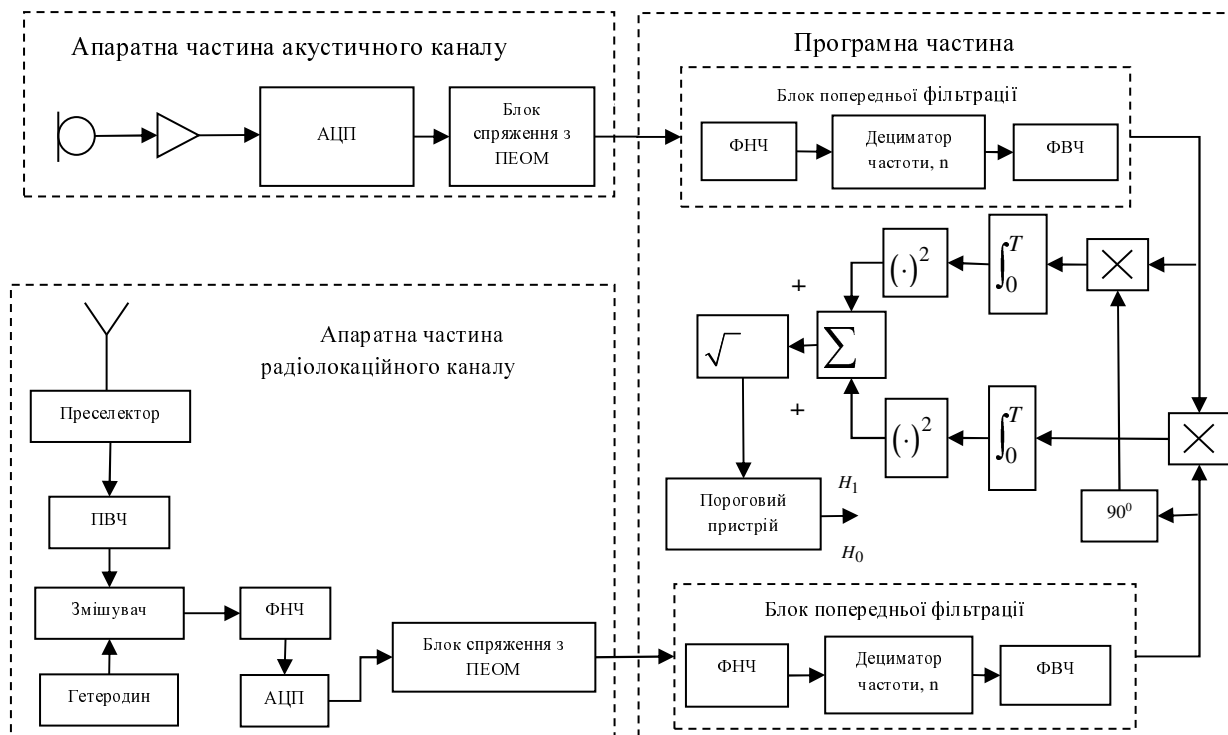


Рис. 4. Структурна схема пристрою виявлення на основі корелятора

Частоти зрізу фільтрів високих частот (ФВЧ) та фільтрів низьких частот (ФНЧ) обираються таким чином, щоб виділити 10 гармонік акустичного випромінювання БПЛА з ДВЗ або 5 гармонік акустичного випромінювання БПЛА з ЕД. Тому за частоти зрізу ФНЧ доцільно обрати значення $f_{\text{дн}} \times 10 \Omega_{\text{max}}$, а ФВЧ – $f_{\text{дв}} = \Omega_{\text{min}}$, де $\Omega_{\text{max}}, \Omega_{\text{min}}$ – максимальна і мінімальна очікувані частоти обертання колінвала (ротора) двигуна відповідно. Після такої фільтрації акустичного сигналу БПЛА як з ЕД, так і з ДВЗ і гвинтом з двома лопастями кореляційній обробці підлягатимуть лише 5 гармонік спектра (рис. 5).

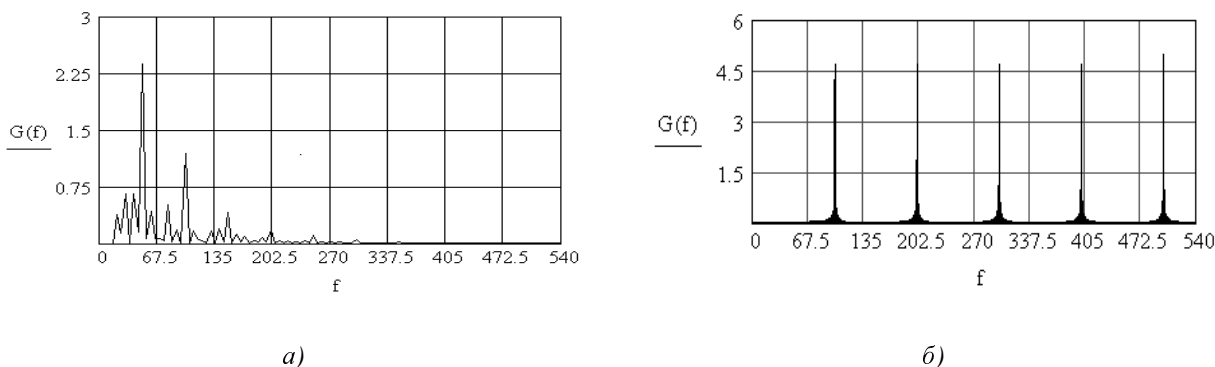


Рис. 5. Перші 10 гармонік акустичного спектра БПЛА з ДВЗ (а) та 5 гармонік спектра «гвинтової» модуляції (б)

Проведемо моделювання процесу виявлення акустичних сигналів відповідно до схеми обробки (рис. 4). Алгоритм обробки сигналів можна записати у наступному вигляді:

$$I(t) = \sqrt{\left(\int_0^{\tau} s(\tau) u_1(\tau-t) d\tau \right)^2 + \left(\int_0^{\tau} s(\tau) u_2(\tau-t) d\tau \right)^2}, \tag{20}$$

де

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \cos(2\pi\Omega_l t + \varphi_l), \tag{21}$$

математичний вираз, що описує акустичний сигнал від БПЛА з ДВЗ; φ_l – випадкова початкова фаза l -ої гармоніки, розподілена за рівномірним законом:

$$u_1(t) = \sum_{l=1}^{L_1} \cos(2\pi\Omega l N t), \quad u_2(t) = \sum_{l=1}^{L_1} \sin(2\pi\Omega l N t), \quad (22)$$

синфазна та квадратурна складові сигналу "гвинтової" модуляції; $L_1 = [L/2]$ – кількість складових спектра «гвинтової» модуляції, що підлягають аналізу.

На рисунку 6 представлено графіки функції $I(t)$ для кількості гармонік акустичного випромінювання ДВЗ, що обробляються, $L = 3, L = 6, L = 10$.

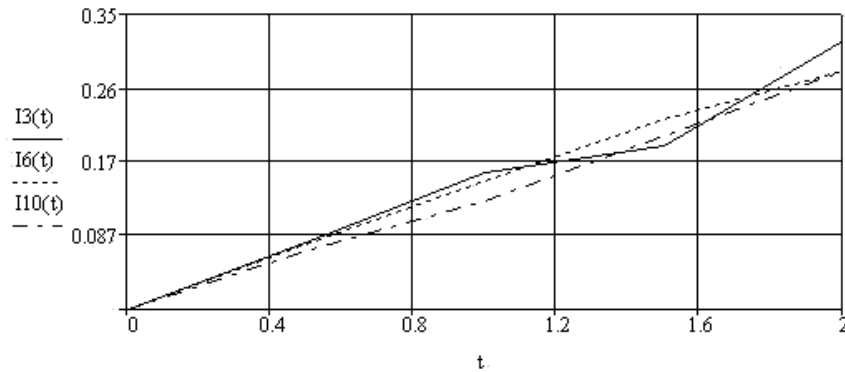


Рис. 6. Кореляційні інтеграли для різної кількості гармонік

Як бачимо, при збільшенні кількості гармонік (розширенні смуги аналізу), значення кореляційного інтегралу майже не змінюється. Це пояснюється тим, що зі збільшенням частоти гармонічної складової акустичного випромінювання БПЛА її амплітуда зменшується, а також через сильніше згасання акустичних коливань вищих частот при поширенні в атмосфері. При аналізі трьох складових спектра акустичного сигналу БПЛА з ДВЗ аналізу підлягатиме лише одна спектральна лінія «гвинтової» модуляції. Тому для виявлення БПЛА можна збільшити частоту зрізу ФВЧ і зменшити частоту зрізу ФНЧ таким чином, щоб на схему кореляційної обробки надходила лише перша спектральна лінія «гвинтової» модуляції.

Збільшуючи час спостереження, можна досягти високих ймовірностей правильного виявлення, тобто виявляти сигнали, що знаходяться набагато нижче рівня як власних шумів приймача, так і зовнішніх шумів. Це стає можливим через некорельованість шумів, що надходять на вхід приймача по акустичному та радіолокаційному каналах.

Вплив ефекту Доплера на ефективність роботи схеми виявлення. Спектр акустичного сигналу БПЛА визначається, в основному, гармоніками з частотами, кратними частоті обертання пропелера. Частота прийнятого сигналу $f_i(t)$ відрізняється від частоти акустичного сигналу нерухомого БПЛА на величину доплерівського зсуву і в разі стаціонарних мікрофонів визначається виразом [6]:

$$f_i(t) = \frac{f_a c^2}{c^2 - v^2} \left[1 - \frac{v^2 (t + h/c)}{\sqrt{v^2 c^2 (t + h/c)^2 - h^2 (v^2 - c^2)}} \right], \quad (23)$$

де f_a – частота акустичного сигналу; c – швидкість звуку; v – швидкість БПЛА (дозвукова); h – висота польоту БПЛА.

Залежно від швидкості БПЛА, доплерівський зсув частоти гармоніки визначатиметься виразом:

$$\Delta f = f_i [1 \pm k(v)], \quad k(v) = \frac{c^2}{c^2 - v^2} \left[1 - \frac{v^2 (t + h/c)}{\sqrt{v^2 c^2 (t + h/c)^2 - h^2 (v^2 - c^2)}} \right]. \quad (24)$$

У радіолокаційному діапазоні доплерівський зсув частоти прийнятого сигналу за рахунок переміщення БПЛА визначається виразом:

$$\Delta f = f_0 \frac{v_R}{1.5 \cdot 10^8} = f_0 g(v_R), \quad (24)$$

де f_0 – частота ЗС; v_R – радіальна швидкість цілі.

Графіки функцій, що визначають доплерівський зсув в частках несучої частоти в акустичному $1-k(v)$ та радіолокаційному $g(v)$ діапазонах, представлені на рисунку 7.

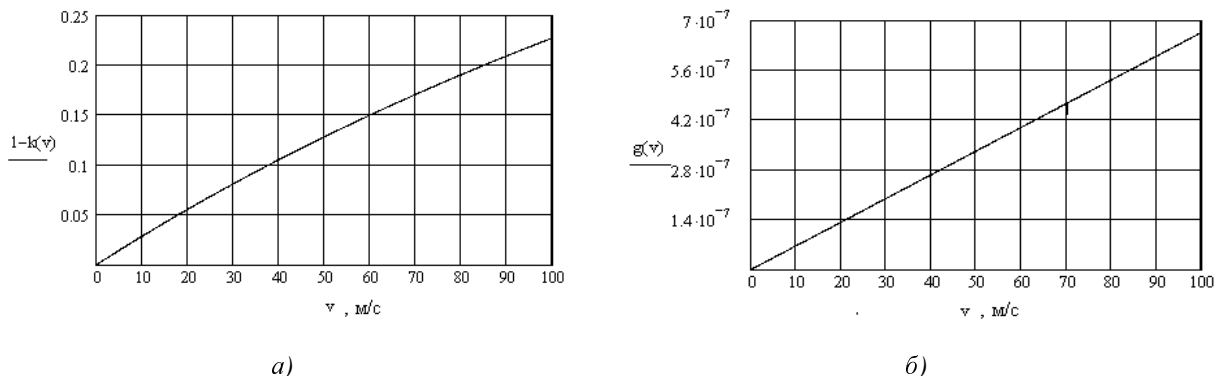


Рис. 7. Доплерівський зсув в долях несучої частоти: в акустичному (а) та радіолокаційному (б) діапазонах

Для БПЛА, що рухається зі швидкістю 20 м/с $1-k(v)=0,056$ і $g(v)=1,33 \cdot 10^{-7}$. Тоді гармоніка акустичного сигналу на частоті 100 Гц зсунеться на 5,6 Гц, а спектр гвинтової модуляції радіосигналу при частоті несучої 10 ГГц – на 1,33 кГц. Тобто навіть малі швидкості переміщення БПЛА призведуть до декореляції сигналів по акустичному та радіолокаційному каналах.

Висновки. Гармоніки в спектрах акустичного випромінювання БПЛА і «гвинтової» модуляції в радіолокаційному діапазоні слідує на частотах, що кратні частоті обертання колінвала ДВЗ або ротора ЕД. Шум, що надходить на вхід схеми обробки як по радіолокаційному, так і по акустичному каналах, некорельований через свою випадкову природу. Корисний сигнал в обох діапазонах промодульований частотою обертання колінвала (ротора гвинта), що дає змогу виявляти з високим рівнем ймовірності нерухомі БПЛА за наявності як пасивних перешкод, так і гармонічних акустичних сигналів, не пов'язаних з шумом БПЛА.

Список використаної літератури:

1. Billingsley J. Barrie. Low angle radar land clutter : measurements and empirical models / J.B. Billingsley. – William Andrew Publishing, 2002. – 719 p.
2. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L.Marino // 16-th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. University “La Sapienza”, Rome, 00184, Italy. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2010. – P. 1–14.
3. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K.Massey, R.Gaeta // Georgia Inst. of Technology/GTRI/ATAS, Atlanta. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2010. – P. 1–16.
4. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – Vol. 5417. – 2004. – P. 24–29.
5. Reg Austin. Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment / R.Austin. – John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 365 p.
6. 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. – Vol 51, № 3, july. – 2001. – P. 279–283.
7. Victor C. Chen. The Micro-Doppler Effect in Radar / V.C. Chen. – Artech house, 2011. – 309 p.
8. Victor C. Chen. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis / V.C. Chen, Hao Ling. – Artech house, 2002. – 233 p.
9. Гейстер С.П. Адаптивное обнаружение распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С.П. Гейстер. – Минск : Военная академия РБ, 2000. – 172 с.
10. Самохин В.Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, П.А. Мошков // Труды МАИ. – Вып. № 70. – С. 1–24.
11. Слюсарь Н.М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами : монография / Н.М. Слюсарь. – Смоленск : ВА ВПВО СВ РФ, 2006. – 172 с.

ДАНИК Юрій Григорович – доктор технічних наук, професор, начальник Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

- національна безпека;
- європейська та євроатлантична інтеграція України.

ПУЛЕКО Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

- групове управління в роботизованих системах;
- обробка вимірювальної інформації.

БУГАЙОВ Микола Вікторович – ад'юнкт наукового центру Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

- математичні та алгоритмічні методи обробки сигналів;
- виявлення малопомітних цілей.

E-mail: karunen@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2014

Даник Ю.Г., Пулеко І.В., Бугайов М.В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів

Даник Ю.Г., Пулеко І.В., Бугаєв Н.В. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа акустических и радиолокационных сигналов

Danyk Y.G., Puleko I.V., Bougaiov M.V. Unmanned aerial vehicles detection based on analysis of acoustic and radar signals

УДК 621.396.96

Обнаружение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа акустических и радиолокационных сигналов / Ю.Г. Даник, И.В. Пулеко, Н.В. Бугаев

Проблема обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) связана с их низкой заметностью как в электромагнитном, так и в акустическом диапазонах длин волн. Перспективным направлением решения данной проблемы есть комплексирование информации, приходящей по каналам разной физической природы. Поскольку сигналы как в акустическом так и в радиолокационном диапазонах модулируются частотой вращения ротора (коленчатого вала) двигателя, то появляется возможность совместной обработки этих сигналов. Цель исследований – разработка метода обнаружения БПЛА на основе анализа их сигнатур в акустическом и радиолокационном диапазонах. Для обнаружения сигналов акустического излучения БПЛА на максимальной дальности необходимо проводить гармонический анализ принятого сигнала. Для этого разработана двуканальная корреляционная схема обнаружения, в которой в качестве опорного сигнала использованы сигналы «винтовой» модуляции БПЛА. Поскольку акустический сигнал можно представить в виде суммы гармоник с кратными частотами и неизвестными случайными начальными фазами, а отраженные от лопастей винта радиосигналы из-за жесткости структуры его элементов имеют когерентную структуру, необходимо проводить корреляционную квадратурную обработку. Шум, проходящий на вход системы обработки как по радиолокационному, так и по акустическому каналам, некоррелированный по причине своей случайной природы. Это дает возможность с высоким уровнем вероятности обнаруживать неподвижные БПЛА при наличии как пассивных помех, так и гармонических акустических сигналов, не связанных с шумом БПЛА.

Ключевые слова: акустический портрет БПЛА; «винтовая» модуляция; детектор гармоник; периодограмма; двуканальная корреляционная обработка.

УДК 621.396.96

Unmanned aerial vehicles detection based on analysis of acoustic and radar signals / Y.G. Danyk, I. V. Puleko M.V. Bougaiov

Problem of unmanned aerial vehicles (UAV) detection is connected with its low electromagnetic and acoustical signatures. Combined processing of information coming on different physical channels is perspective direction of solving this problem. Radar and acoustic signals are modulated by the rotating frequency of UAV's rotor (crankshaft) and we have possibility for joint processing of these signals. The goal of our research is to develop method of UAV detection based on the analysis of its acoustic and micro-Doppler signatures. For the detection of UAV's acoustic emission on the maximal distance the harmonic analysis of received signals is necessary. For this purpose two channel correlation detection scheme was developed. This scheme uses signals modulated according to micro-Doppler effect as heterodyne. Acoustic signal may be represented as a sum of sinusoids with unknown frequency and unknown initial phase while micro-Doppler signatures have coherent structure. That's why we must apply quadrature processing. Noise in acoustic and radar channels is uncorrelated due to its stochastic nature. This gives opportunity to detect hovering UAVs in clutter and in presence of other acoustic signals.

Keywords: acoustic signature of UAV; harmonicas detector; micro-Doppler effect; periodogram; two channel correlation processing.