

АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

(Представлено д.т.н. Манойловим В.П.)

Розроблено алгоритм для виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі аналізу сигналів акустичного випромінювання. Показано, що акустичний сигнал БПЛА являє собою суму гармонік з кратними частотами. У зв'язку з цим, як критерій надійного виявлення таких сигналів обрано наявність в реалізації прийнятого сигналу як мінімум трьох гармонічних складових з кратними частотами. Для виділення спектральних складових сигналу було використано періодограму. Порогова обробка в частотній області здійснюється відповідно до розробленого алгоритму і використовує показник статистичної якості отриманої спектральної оцінки. Відповідно до даного алгоритму при високих відношеннях сигнал–шум (ВСШ) значення порогу розраховується за характеристиками самого сигналу, а при низьких – за значенням подальших етапів обробки частотних відліків. Працездатність розробленого моделювання виявлення акустичних сигналів було перевірено за методом статистичного моделювання. Показано, що при зниженні значення ВСШ ймовірність виявлення можна підвищити за рахунок підвищення ймовірності хибної тривоги або послаблення вимог до критерію виявлення.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; акустичний сигнал; періодограма; порогова обробка; показник статистичної якості; кратність частот.*

Вступ. Постановка проблеми. Протягом останніх десяти років для виконання завдань дистанційного спостереження за об'єктами, що становлять інтерес як у цивільній, так і у військовій сферах, почали широко використовуватися БПЛА. Як такі літальні апарати здебільшого використовують малорозмірні БПЛА літакового або мультироторного типів (коптери), що оснащені електричним двигуном (ЕД). Через малі розміри та малу контрастність в електромагнітному діапазоні такі об'єкти будуть становити досить серйозну загрозу, оскільки збір необхідної інформації зможуть проводити, залишаючись непоміченими [1]. Тому для виявлення таких БПЛА на незначних відстанях за демаскуючу ознаку можна використовувати шум повітряного гвинта.

Дослідженню характеристик сигналів акустичного випромінювання повітряного гвинта БПЛА присвячена значна кількість робіт як вітчизняних [2, 3], так і закордонних [4–9] дослідників. У цих роботах для аналізу акустичних сигналів використовують їх представлення в частотній (за допомогою перетворення Фур'є) або частотно-часовій (з використанням спектрограми) областях. Вказується, що такі сигнали мають багатокомпонентну гармонічну структуру, причому частоти гармонічних складових є кратними числами. Проте в даних дослідженнях не розглядалося питання впливу шумів на показники якості виявлення акустичних сигналів БПЛА, а в алгоритмах виявлення цих сигналів не використовують ознаку кратності частот. Оскільки прийом акустичних сигналів здебільшого практично важливих випадків проводять на фоні шумів, розробка стійких алгоритмів виявлення акустичних сигналів БПЛА є досить актуальним завданням сьогодення.

Метою досліджень є розробка та дослідження роботи алгоритму виявлення акустичних сигналів БПЛА на фоні шумів.

Викладення основного матеріалу дослідження. *Спектральні характеристики акустичних сигналів БПЛА та перешкод.* Розглянемо БПЛА літакового типу з ЕД. Основним джерелом шуму в ньому є повітряний гвинт. Акустичний шум утворюється, в основному, в результаті силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім середовищем у процесі створення тяги і при витісненні повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. До точки спостереження будуть доходити імпульси, що викликані проходженням кожної лопаті, що збурує повітря.

Ці 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 [10, 11].

Таким чином, акустичний сигнал БПЛА є сумою гармонік з частотами, що кратні частоті обертання ротора двигуна F . Амплітуди гармонік, як правило, зменшуються зі збільшенням частоти. У загальному випадку амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази гармонік також є випадковими величинами, що розподілені за рівномірним законом. Математична модель акустичного випромінювання повітряного гвинта БПЛА може бути подана у такому вигляді:

$$s(t) = \sum_{i=1}^K A_i \cos(2\pi MF \cdot i \cdot t + \varphi_i), \quad (1)$$

де K – кількість гармонік акустичного випромінювання, що розглядають; A_i – амплітуда i -ої гармоніки; φ_i – фаза i -ої гармоніки.

На коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні і для їх аналізу використовувати методи спектрального оцінювання. Оскільки точна структура сигналу та ВСШ при роботі акустичних датчиків є невідомими, то серед значної кількості методів спектрального аналізу [12, 13] для отримання спектральної щільності потужності (СЦП) було обрано періодограму, що належить до непараметричних методів і не вимагає знання порядку моделі сигналу, що дає змогу уникнути багатьох негативних факторів, пов'язаних з цим.

Розглянемо запис акустичного сигналу БПЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопатями. Частота дискретизації сигналу $f_s = 8$ кГц, довжина послідовності $N = 512$, що становить 0,064 с. Часова реалізація та періодограма даної послідовності відліків наведені на рисунку 1 відповідно. ВСШ становить близько 10–12 дБ. З періодограми добре видно, що смуга частот, в якій спостерігаються гармонічні складові акустичного випромінювання БПЛА, обмежується верхньою частотою близько 3,4 кГц.

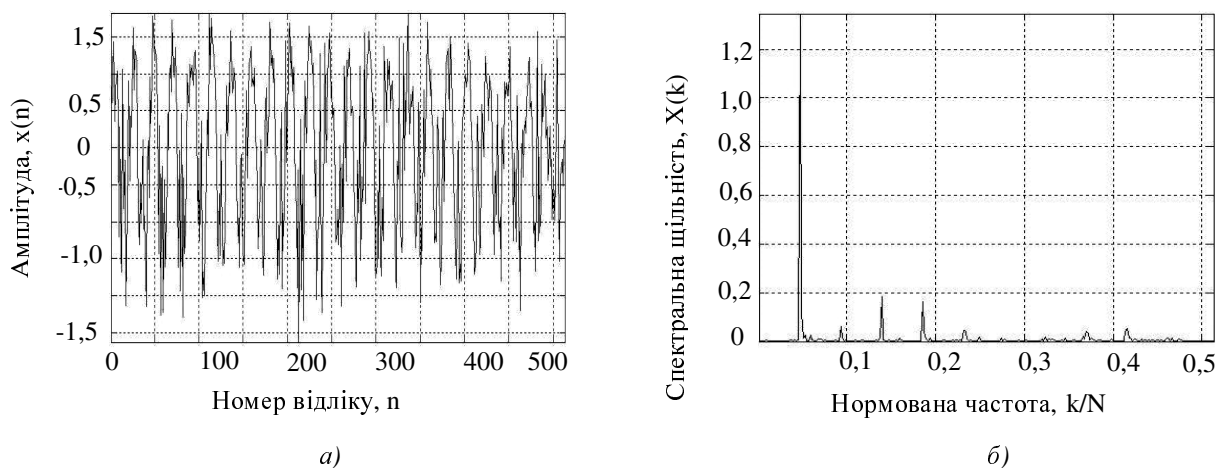


Рис. 1. Часова реалізація (а) та періодограма акустичного сигналу (б)

Найбільш чітко багатокомпонентна гармонічна структура акустичного сигналу простежується для БПЛА літакового типу. Для БПЛА мультироторного типу дуже важко виділити лінії гармонік, оскільки вони згруповані в досить широкі багатопікові максимуми спектральної щільності. Причому зі збільшенням кількості гвинтів (6 і більше) спектр сигналу БПЛА мультироторного типу стає шумоподібним, в якому практично неможливо виділити гармонічні складові.

Характерною особливістю акустичного випромінювання вертольота є наявність кількох гармонік на низьких частотах (менше 100 Гц), що відповідають частоті обертання несучого гвинта, і гармонічних складових на частотах близько 2 кГц. Дані складові нижчі за потужністю на 20–30 дБ від основних і відповідають частоті обертання хвостового гвинта. Основна частина енергії акустичного випромінювання реактивного літака зосереджена в смузі частот 100–500 Гц з численними максимумами без явно вираженого домінуючого. Гвинтомоторний літак має подібний спектр в смузі частот близько 60–300 Гц з кількома вираженими гармоніками, що пов'язані з частотою обертання гвинта. Спектр акустичного випромінювання вантажного автомобіля та танка зумовлений шумами механічного походження. В їхніх спектрах чітко простежується одна гармонічна складова, з частотою для автомобіля близько 30 Гц і для танка – 140 Гц.

Під час ведення звукометричної розвідки одним із основних джерел шуму, що перешкоджає прийому акустичних сигналів, є вітер. Основна частина енергії в спектрі шуму вітру зосереджена в межах частот нижче 80–100 Гц з явним вираженим максимумом на частотах 30–40 Гц. На частотах вище 100 Гц швидкість спадання спектральної щільності потужності складає близько 10 дБ на октаву, а починаючи з частот вище 2 кГц, спектр можна розглядати як рівномірний.

При невеликій силі вітру його негативний вплив на результати спостереження можна зменшити шляхом попередньої низькочастотної фільтрації прийнятого сигналу (сигнали акустичного випромінювання тактичних БПЛА знаходяться, як правило, вище цих частот). Проте слабкі сигнали від БПЛА можуть маскуватися шумом вітру. Для їх виявлення необхідно розглядати взаємно-кореляційні властивості сигналів БПЛА та шуму вітру на коротких проміжках часу (у вікнах аналізу).

Спектр шуму дощу, порівняно зі спектром вітру, є більш рівномірним зі значною кількістю локальних максимумів спектральної щільності. З підвищенням частоти спектральна щільність зменшується зі швидкістю близько 10 дБ на декаду. Виявлення акустичних сигналів БПЛА на фоні шуму дощу буде більш ускладненим, оскільки через значну ширину смуги частот даного шуму фільтрація в частотній області буде неефективною. Для вирішення цього завдання, як і у попередньому випадку, необхідно розглядати взаємно-кореляційні властивості сигналу та шуму у вікнах аналізу.

Таким чином, аналіз спектральних характеристик сигналів акустичного випромінювання БПЛА, інших зразків військової техніки та шумів природного походження дає змогу зробити висновок, що для виділення акустичних сигналів БПЛА із прийнятої реалізації необхідно проводити її смугову фільтрацію з нижньою частотою зрізу фільтру близько 150 або 500 Гц за наявності перешкод штучного походження. Значення верхньої частоти зрізу фільтру доцільно обрати в межах 3,5 кГц.

Створення алгоритму визначення порогу. Які критерій виявлення БПЛА оберемо наступну умову: виділення трьох гармонік з кратними частотами. Додаткова умова відповідності гармонік акустичним сигналам БПЛА – значення частотного розносу між ними. Якщо припустити, що мінімальна частота обертання ротора БПЛА з ЕД становить 6000 об./хв., що відповідатиме частотному розносу в 100 Гц, а максимальна – 11000 об./хв., що для гвинта з двома лопатями відповідатиме частотному розносу в 360 Гц, то для частоти дискретизації 8 кГц і довжині послідовності аналізу 512 вибірок діапазон частотного розносу в бінах становитиме $\Delta k = [k_{min}; k_{max}] = [6 \div 24]$.

При виборі такого критерію виникає питання розрахунку значення порогу γ в частотній області. Досить широкого поширення набуло його обчислення, що засноване на стабілізації ймовірності хибної тривоги P_{FA} [14], що визначається лише середньоквадратичним відхиленням СЦП шуму:

$$\gamma = -2\sqrt{\text{var}(X)} \ln(P_{FA}), \quad (2)$$

де $\text{var}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X[k] - \bar{X})^2$ – дисперсія вхідного сигналу, за умови, що акустичний сигнал БПЛА відсутній.

Очевидно, що значення порогу для заданого критерію виявлення необхідно обирати з огляду як на параметри самого сигналу, так і з урахуванням ВСШ. Оскільки акустичний датчик є пасивним пристроєм спостереження, то визначення робочого значення ВСШ є досить складним завданням. Проте поява акустичного сигналу БПЛА є подією з дуже малою ймовірністю. У зв'язку з цим алгоритми обробки працюватимуть, в основному, з шумом і на основі набраної статистики можна визначити дисперсію шуму та для заданої ймовірності хибної P_{FA} сформуванати значення порогу γ відповідно до (2). Але за високих ВСШ ($q_{av}^2 > 10$ дБ) і низькою якістю спектральних оцінок розраховане значення порогу буде заниженим і кількість бінів, що перевищать поріг буде дуже великою; це ускладнить виконання подальших алгоритмів виділення кратних гармонічних складових. Тому необхідно провести уточнення значення порогу при появі дуже великої кількості гармонік, що перевищили поріг. Для цього будемо використовувати розраховане для прийнятої послідовності відліків значення показника статистичної якості Q СЦП:

$$Q = \frac{\text{var}(X)}{(\bar{X})^2}, \quad (3)$$

де $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X[k]$ – середнє значення СЦП на інтервалі спостереження.

Даний показник безпосередньо пов'язаний зі статистичною стійкістю спектральної оцінки. Для незначної кількості вузьких піків СЦП, що відповідає акустичному сигналу БПЛА літакового типу, \bar{X} буде малим, а отже Q – великим. Даний випадок відповідає високим значенням ВСШ. При зменшенні ВСШ кількість шумових викидів та їх амплітуда зростатиме, що призведе до збільшення значення \bar{X} , а це, в свою чергу, зменшить значення Q . Тоді порядок уточнення робочого значення порогу γ' можна представити у вигляді алгоритму розрахунку робочого значення порогу (рис. 2).

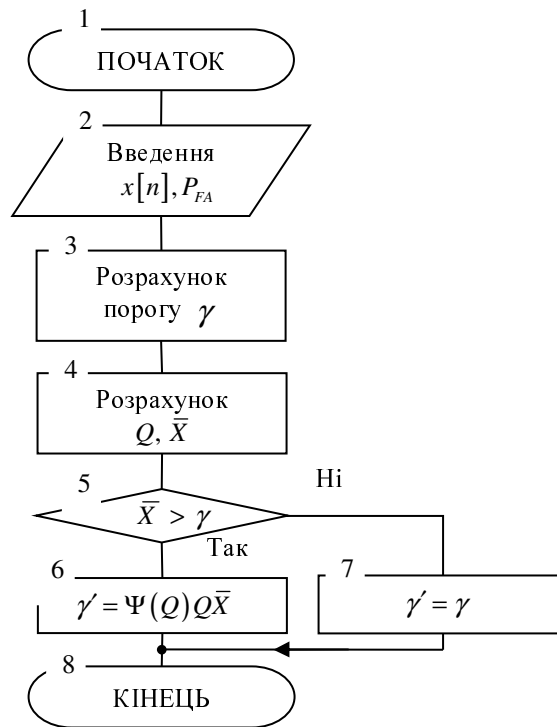
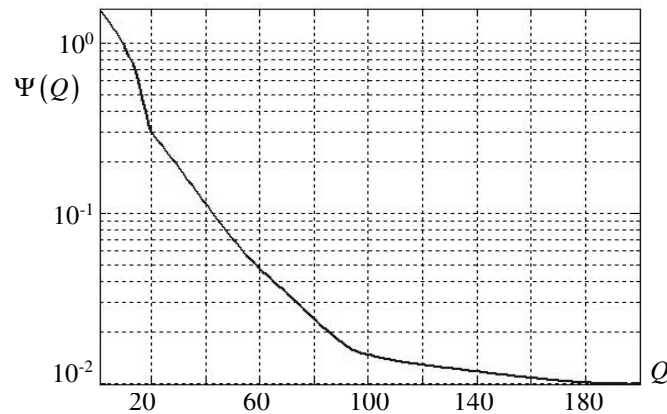


Рис. 2. Алгоритм розрахунку робочого значення порогу

Значення коефіцієнта $\Psi(Q)$ має складну функціональну залежність від Q . Можна лише вказати на його спадаючий характер при збільшенні Q (рис. 3). В ході експериментальних досліджень було встановлено, що за високих значеннях ВСШ різні БПЛА мають різні значення Q . Найвищими вони є для БПЛА з ЕД (60–180), дещо нижчими є для двигунів внутрішнього згорання (60–30) і найнижчими – для БПЛА мультиторного типу (менше 30). Проте дані значення можуть відрізнятися від наведених і відображають лише загальну тенденцію зміни Q для різних типів БПЛА. Але, незважаючи на це, в першому наближенні отримані експериментальним шляхом значення $\Psi(Q)$ можна використовувати для формування значення порогу γ' .

Рис. 3. Емпірична крива залежності $\Psi(Q)$

В результаті використання даного алгоритму при високих поріг γ' буде розраховуватися за характеристиками самого сигналу (середнього значення та дисперсії його СЩП), а при низьких – за значенням дисперсії шуму. Зменшення ВСШ призведе до підвищення порогу, в результаті чого менша кількість максимумів СЩП, що відповідають гармонікам акустичного випромінювання БПЛА, буде виявлена.

Розробка алгоритму виявлення акустичних сигналів БПЛА. Алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА представлено на рисунку 4. Вхідними величинами даного алгоритму є амплітуди вибірок вхідного акустичного сигналу $x[n]$, що проходять через смуговий фільтр (блок 3). Для представлення сигналу в частотній області був обраний метод спектрального оцінювання на основі періодограми без обробки віконною функцією. Розрахунок періодограми $X[k]$ виконується в блоці 4. Отримані значення відліків (бінів) в частотній області порівнюються з робочим значенням порогу γ' (блок 5). Оскільки енергія гармонічної складової після розрахунку періодограми зосереджена, як правило, в кількох сусідніх бінах, то для зменшення кількості частотних відліків, що перевищили поріг, з трьох сусідніх бінів обираємо один з більшою амплітудою. На виході блока 5 формується масив з L бінів. В блоці 8 послідовно розраховують різниці між кожним попереднім номером біну та кожним наступним. В результаті даних операцій формується $L-1$ наборів різниць Δ_{p_i} значень номерів бінів, причому кількість даних значень при кожній наступній ітерації зменшується на одиницю. В блоці 9 відкидаються ті значення Δ_{p_i} , що виходять за межі інтервалу $[k_{min}, k_{max}]$. Також в цьому блоці відбувається порівняння максимального номера біна k'_{max} , що перевищив поріг, зі значенням k'_{max} . Фактично, це означає визначення смуги частот, що займає вхідний сигнал. На практиці k'_{max} необхідно обирати в межах, що відповідає частоті 300–400 Гц. Це виключить можливість спрацьовування алгоритму по інших цілях, що також є джерелами гармонічного акустичного випромінювання. В блоці 10 всі однакові значення Δ_{p_i} об'єднуються в групи і формується новий масив $k_j = \{k_1, k_2, \dots, k_J\}$, де J – кількість груп однакових Δ_{p_i} . В блоці 11 розраховується кількість різниць V в кожній групі. Якщо в групі знаходиться не менше двох однакових значень Δ_{p_i} , то проводиться формування ознаки наявності БПЛА в зоні відповідальності акустичного датчика і видається значення частоти гармоніки з максимальною амплітудою k_x^{max} (блок 14).

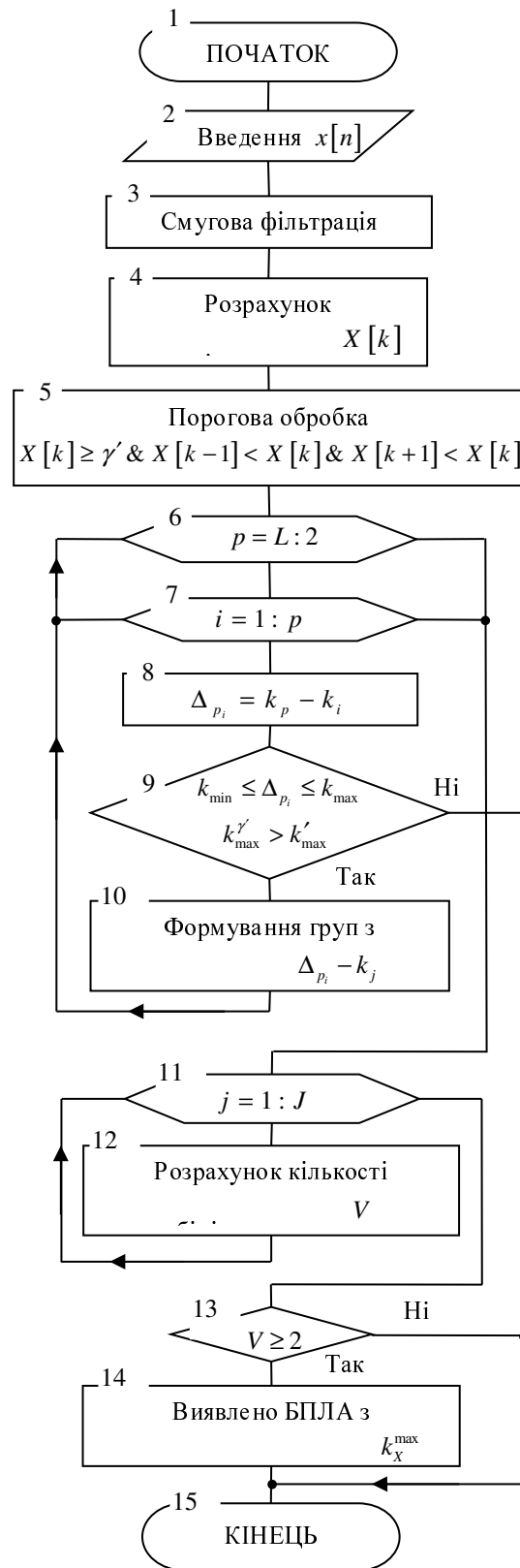


Рис. 4. Алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА

Перевірку працездатності розробленого алгоритму виявлення акустичних сигналів БПЛА проведено шляхом статистичного моделювання. Як вхідний сигнал було використано запис акустичного сигналу БПЛА з ЕД (рис. 1). Для кожного значення ВСШ на вході $q_{\text{вх}}^2$ в межах +15 дБ -10 дБ з кроком 5 дБ і фіксованих ймовірностей хибної тривоги $P_{FA} = \{10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}\}$ визначимо відносну частоту виявлення акустичного сигналу, використовуючи такий вираз:

$$P_D = \frac{N_{\Sigma} - N_{\Pi}}{N_{\Sigma}}, \quad (4)$$

де N_{Σ} – загальна кількість випробувань; N_{Π} – кількість випробувань, в яких акустичний сигнал не був виявлений.

Результати моделювання для $N_{\Sigma} = 1000$ наведені на рисунку 5. При збільшенні кількості випробувань $N_{\Sigma} \rightarrow \infty$ розрахована величина P_D буде наближатися до ймовірності правильного виявлення.

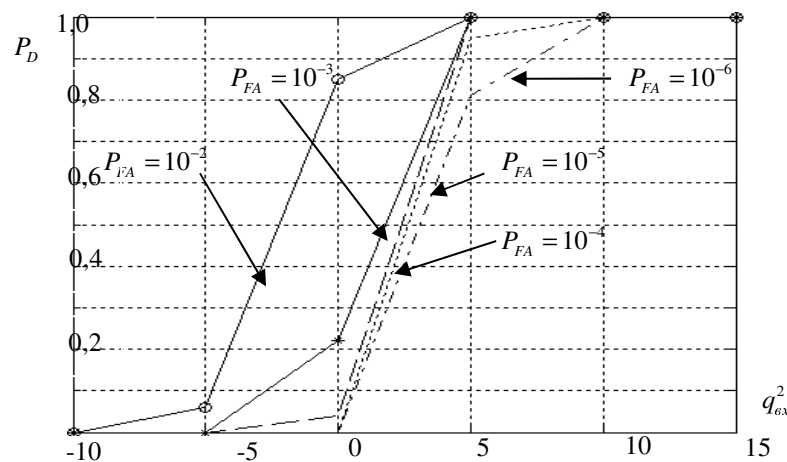


Рис. 5. Відносна частота виявлення акустичного сигналу БПЛА з ЕД

З аналізу поведінки наведених кривих можна зробити висновок, що при зниженні значення ВСШ ймовірність виявлення можна підвищити за рахунок підвищення ймовірності хибної тривоги (зниження значення порогу).

Ймовірність правильного виявлення можна значно підвищити (особливо в області низьких ВСШ), якщо послабити критерій виявлення БПЛА і замість умови наявності у вхідному сигналі трьох гармонік з кратними частотами вимагати виявлення однієї гармоніки у смузі частот, що відповідає першій гармоніці акустичного випромінювання БПЛА. Тоді за рахунок коефіцієнта покращення періодограми, що являє собою квадрат перетворення Фур'є, можна досягти значного покращення ВСШ при переході в частотну область [15]. Проте таке рішення буде виправданим лише в припущенні, що акустичний датчик працюватиме в умовах відсутності потужних акустичних шумів та перешкод. В протилежному випадку виникатиме значна кількість хибних тривог.

Висновки. Розроблений алгоритм виявлення акустичних сигналів БПЛА використовує ознаку кратності частот гармонік та адаптивну порогову обробку частотних відліків, що враховує значення показника статистичної якості отриманих спектральних оцінок. Це дає змогу проводити виявлення таких сигналів на фоні шуму і формувати ознаку наявності БПЛА та видавати значення частоти найбільш потужної гармонічної складової. Під час проведення подальших досліджень особливу увагу необхідно звернути на роботу алгоритму в умовах впливу на акустичний датчик невеликого шуму та імпульсних перешкод.

Список використаної літератури:

1. Austin R. Unmanned aircraft system : UAVs desing, development and deployment / R.Austin // John Wiley & Sons Ltd. – 2010. – Pp. 365.

2. Соловійов О.В. Експериментальні дослідження рівня шуму БПЛА «Стрепет-М» / О.В. Соловійов // Збірник наукових праць Харківського ун-ту Повітряних Сил. – 2010. – Вип. 2 (24). – С. 36–39.
3. Зінченко С.А. Пасивна акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів / С.А. Зінченко, В.Ф. Свіжевський // Тези доп. науково-тех. конф. „Інформаційна безпека України” (12–13 берез. 2015 р.). – К. : КНУ, 2015. – С. 74–75.
4. Sadasivan S. Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S.Sadasivan, M.Gurubasavaraj, S.R. Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol. 51, № 3. – Pp. 279–283.
5. Pham T. TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 54. – Pp. 24–29.
6. 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.
7. Massey K. Noise measurements of tactical UAVs / K.Massey, R.Gaeta // 16th AIAA 2010-3911 / CEAS Aeroacoustics Conference. – 2010. – Pp. 1–16.
8. 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.
9. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L.Marino // 16th AIAA 2010-3911 / CEAS Aeroacoustics Conference. – 2010. – Pp. 1–14.
10. Александров В.Л. Воздушные винты / В.Л. Александров. – М. : Гос. изд-во оборонной пром-ти, 1951. – С. 376–377.
11. Джонсон У. Теория вертолета : в 2-х кн. / У.Джонсон ; пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – Кн. 1 : Авиационная и ракетно-космическая техника. – С. 322–327.
12. Stoica P. Introduction to spectral analysis / P.Stoica, R.L. Moses. – New Jersey : Prentice Hall, 1997. – 345 p.
13. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл ; пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
14. Richards M.A. Principles of modern radar / M.A. Richards, J.A. Scheer, W.A. Holm. – Vol. 1 : Basic Principles. – SciTech Publishing. – 2010. – 962 p.
15. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р.Лайонс ; пер. с англ. под ред. А.А. Брутова. – 2-ое изд. – М. : ООО Бином-Пресс, 2006. – 656 с.

БУГАЙОВ Микола Вікторович – ад’юнкт Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- акустичні сигнали та їх виявлення;
- безпілотні літальні апарати, їх використання;

Стаття надійшла до редакції 30.10.2015.