

М. В. Бугайов, В. В. Брановицький, Ю. О. Хоренко

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Однією з найважливіших складових протидії малорозмірним безпілотним літальним апаратам є їх своєчасне та надійне виявлення. Як демаскувальну ознаку для виявлення таких об'єктів на незначних відстанях можна використовувати шум повітряного гвинта. Для приймання сигналів акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів застосовують енергетичний або гармонічний детектор. За низьких відношень сигнал-шум, що найчастіше зустрічаються на практиці, гармонічний детектор забезпечує вищу ймовірність виявлення порівняно з енергетичним. Принцип дії гармонічного детектора полягає в спектральному аналізі акустичних сигналів. Запропоновано математичну модель акустичного сигналу безпілотного літального апарата літакового типу. Показано, що на коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні, для їх аналізу використовувати відомі методи спектрального оцінювання. Для обробки сигналів акустичного випромінювання безпілотного літального апарата розглянуто непараметричні, параметричні та підпросторові методи спектрального оцінювання. З метою їх порівняльного аналізу використано статистичний показник якості, який можна розрахувати як варіацію оцінки спектральної щільності потужності. Даний показник характеризує метод спектрального оцінювання щодо роздільної здатності за частотою та можливості виділяти гармонічні складові сигналу із шуму і не створювати шумових викидів, які за амплітудою перевищують сигнальні. У результаті досліджень було встановлено, що за високих відношень сигнал-шум параметричні методи є більш ефективними, ніж непараметричні. Проте таке твердження справедливе лише в разі правильного вибору порядку моделі. Показано, що застосування підпросторових методів є недоцільним для аналізу акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. Використання значення статистичного показника якості як порога для прийняття рішення про наявність або відсутність акустичного сигналу безпілотного літального апарата в прийнятій реалізації та його подальшого оброблення доцільне для значень відношення сигнал-шум вище 5 дБ.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; спектральне оцінювання; акустичний сигнал; періодограма; статистичний показник якості.

Постановка проблеми в загальному вигляді. З кожним роком безпілотні літальні апарати (БПЛА) дозволяють вирішувати все більшу кількість завдань як у цивільній, так й у військовій сферах, що розширює перелік загроз, які вони можуть створювати. Однією з найважливіших складових протидії малорозмірним низьковисотним та малошвидкісним БПЛА є їх своєчасне й надійне виявлення. Такі літальні апарати мають, як правило, незначні розміри й оснащені електричним двигуном (ЕД). Як демаскувальну ознаку для виявлення цих об'єктів на незначних відстанях можна використовувати шум повітряного

гвинта. Для приймання сигналів акустичного випромінювання БпЛА широкого поширення набуло застосування решіток із мікрофонів [1–3]. Для подальшої обробки сигналів використовують енергетичне або гармонічне детектування [3]. За низьких відношень сигнал-шум (ВСШ), що найчастіше зустрічаються на практиці, гармонічний детектор забезпечує вищу ймовірність виявлення порівняно з енергетичним. Принцип дії гармонічного детектора полягає в спектральному аналізі акустичних сигналів. На даний час відома значна кількість методів оцінювання спектрального складу сигналів [4–7]. Кожен з них має свої переваги та недоліки в разі застосування в конкретній ситуації. Тому актуальним є завдання дослідження ефективності методів спектрального аналізу для виявлення акустичних сигналів БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До характеристик акустичних сигналів малорозмірних БпЛА останнім часом проявляють підвищений інтерес через різке зростання їх кількості, а також через стрімкий розвиток пристроїв та алгоритмів цифрової обробки сигналів, що дає змогу простіше й надійніше їх виявляти порівняно з аналоговою обробкою [8–18]. Проте на даний час відсутній вичерпний математичний апарат, що дозволяв би надійно виявляти сигнали акустичного випромінювання БпЛА на фоні шумів. Більшість дослідників із цією метою використовують методи на основі аналізу Фур'є, не розглядаючи можливості застосування перспективних підходів для розв'язання даної задачі.

Формулювання завдання дослідження. Метою даної статті є проведення аналізу ефективності методів спектрального оцінювання для виявлення акустичних сигналів БпЛА та формулювання рекомендацій щодо їх практичного застосування.

Виклад основного матеріалу

1. Створення моделі акустичних сигналів БпЛА. Розглянемо БпЛА літакового типу з ЕД. Основним джерелом шуму в ньому є повітряний гвинт. Акустичний шум утворюється, в основному, у результаті силової взаємодії лопатей гвинта з навколишнім середовищем у процесі створення тяги і витіснення повітря з фіксованого об'єму середовища лопатями. Генерація акустичного випромінювання може також відбуватися і в разі аеродинамічної взаємодії лопатей із 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 є гармоніки.

Отже, акустичний сигнал БпЛА є сумою гармонік із частотами, кратними частоті обертання ротора двигуна F . Амплітуди гармонік, як правило, зменшуються зі збільшенням частоти. Здебільшого амплітуди гармонік є випадковими величинами. Фази гармонік також є випадковими величинами, розподіленими за рівномірним законом. Математична модель прийнятого акустичного сигналу повітряного гвинта БпЛА може бути подана у такому вигляді:

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

де K – кількість гармонік акустичного випромінювання, що розглядають;

A_i – амплітуда i -ї гармоніки;

φ_i – фаза i -ї гармоніки;

$\xi(t)$ – білий гаусівський шум.

На коротких інтервалах часу (десятки мілісекунд) такі сигнали можна розглядати як стаціонарні й для їх аналізу використовувати відомі методи спектрального оцінювання.

2. Огляд методів спектрального оцінювання. Для обробки сигналів акустичного випромінювання БпЛА розглянемо непараметричні, параметричні та підпросторові методи спектрального оцінювання. Вони досить повно описані в [5], тому в даній роботі наведемо коротку характеристику тих методів, що найчастіше використовуються на практиці.

У подальшому вхідний сигнал будемо описувати в дискретній формі $x[n]$, де $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – номер вибірки послідовності, що є адитивною сумішшю корисного сигналу $s[n]$ та білого шуму $\xi[n]$.

Непараметричні методи отримання оцінок спектральної щільності потужності (СЩП) використовують лише вибірки вхідного сигналу. Найпростішим методом спектрального оцінювання є періодограма, яка обчислюється як нормований квадрат модуля швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Частотний відлік з індексом k періодограми довжиною N відліків розраховують за таким виразом:

$$X[k] = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \right|^2. \quad (2)$$

Даному підходу властиві два суттєві обмеження: частотне розділення обмежується тривалістю часу аналізу й витіканням внаслідок обробки прямокутним вікном. Модифікована періодограма використовує віконну обробку сигналу в часовій області для згладжування країв сигналу та зменшення таким чином ефекту витікання. Використання непрямокутних вікон розширює головну пелюстку ШПФ сигналу і збільшує втрати порівняно з прямокутним вікном [19].

Більш сучасним методом непараметричного спектрального аналізу є багатоканальний метод, спектральна оцінка в якому отримується за рахунок об'єднання значної кількості ортогональних вікон. Замість використання смугових прямокутних даних метод використовує набір оптимальних фільтрів. Ці оптимальні нерекурсивні фільтри походять від дискретних сфероїдних послідовностей Слєпіана. Компроміс між розділенням та середньквадратичним відхиленням (СКВ) оцінок СЩП досягається зміною добутку частота смуга частот nw , що безпосередньо пов'язаний з кількістю каналів, які використовуються для обчислення спектра. З метою формування спектральних оцінок використовують $2nw-1$ каналів. Зі збільшенням nw СКВ спектральних оцінок зменшується. Проте смуга частот кожного каналу також пропорційна nw , тому зі збільшенням даного добутку збільшується витікання спектра і спектральні оцінки стають більш зміщеними. Тому для кожної послідовності даних є таке значення nw , що забезпечує компроміс між зміщенням і СКВ.

До параметричних належать такі методи, у яких сигнал вважається виходом лінійної системи, на вхід якої подається білий шум. Параметричні методи можуть дати вищу роздільну здатність порівняно з непараметричними для коротких послідовностей даних. Ці методи використовують різні підходи для спектрального оцінювання. Замість спроб отримати оцінки СЩП безпосередньо із сигналу, у них розраховуються параметри лінійної системи. Авторегресійний (АР) процес описують таким різницеvim рівнянням:

$$x[n] = -\sum_{l=1}^p a[l]x[n-l] + \xi[n], \quad (3)$$

де $a[l]$ – параметри АР моделі, а $\xi[n]$ виступає в ролі послідовності для збудження системи.

Метод спектрального оцінювання Юла – Уолкера розраховує параметри АР шляхом формування зміщених оцінок автокореляційної функції сигналу і знаходження методом найменших квадратів помилки передбачення вперед. Метод Берга для АР спектрального оцінювання ґрунтується на мінімізації помилок передбачення вперед і назад. Він забезпечує стабільність АР моделі та є ефективним щодо обчислення. Порядок АР моделі методів Юла – Уолкера та Берга p не повинен перевищувати довжини вхідної послідовності N . До параметричних належать методи коваріацій та модифікованих коваріацій. Порядок цих моделей не повинен перевищувати половини довжини вхідної послідовності.

Проблема практичного застосування параметричних методів полягає у виборі порядку моделі АР, для чого запропоновано кілька критеріїв (Акаїке, Парзен) [5]. Результати оцінювання СЩП для використання цих критеріїв мало відрізняються один від одного, у разі реальних зашумлених даних жоден з них не забезпечує задовільних результатів (дають занижені значення p). Для аналізу коротких сегментів даних запропоновано порядок моделі обрати рівним від $N/3$ до $N/2$.

Найбільш поширеним на практиці методом вибору оптимального значення порядку моделі АР є метод перебору, коли за деякого фіксованого значення p оцінюють відповідні значення параметрів моделі, за тими чи іншими критеріями визначають якість отриманої апроксимації спостережень, і далі процес повторюється для нового значення p . Остаточно обирається те значення p , для якого якість апроксимації виявилася найвищою.

Підпросторові методи, відомі також як методи з надрозділенням, формують спектральні оцінки сигналу на основі його розкладу на власні вектори кореляційної матриці. Прикладами даних методів є MUSIC (multiple signal classification) та метод власних векторів EV (eigenvector), які найкраще підходять для лінійчатих спектрів (спектрів суми гармонічних сигналів) і є ефективними для виявлення синусоїд за низьких ВСШ. Цей тип спектрального аналізу розділяє інформацію кореляційної матриці на сигнальний та шумовий підпростори. Кількість комплексних синусоїд P для моделювання сигналу не повинна перевищувати половини довжини послідовності.

Методи оцінювання частоти на основі аналізу власних значень автокореляційної матриці або відповідної матриці даних становлять собою клас методів спектрального оцінювання, що забезпечують кращі характеристики розділення й оцінювання частоти, ніж АР методи. Ключовою операцією в них є розділення інформації, що міститься в автокореляційній матриці або матриці даних, на два векторні підпростори: сигналу

і шуму. Таке розділення найбільш ефективно, якщо є апіорна інформація про кількість синусоїдальних компонент, присутніх у сигналі, або власні значення сигнальних векторів більші власних значень шумових векторів. Після виконання процедури розкладу матриці за векторами сигналу і шуму можна визначати різні функції від векторів сигналу й шуму для отримання оцінок частоти, які проте не будуть оцінками істинної СЩП, оскільки інтенсивність піків не пропорційна потужності синусоїд.

3. Аналіз ефективності методів спектрального оцінювання акустичних сигналів БпЛА. Для проведення порівняльного аналізу різних методів спектрального оцінювання будемо використовувати запис акустичного сигналу БпЛА з ЕД і повітряним гвинтом з трьома лопатями. Частота дискретизації сигналу $F_s = 8$ кГц, довжина послідовності $N = 512$. Часова реалізація та спектрограма даної послідовності відліків наведені на рис. 1.

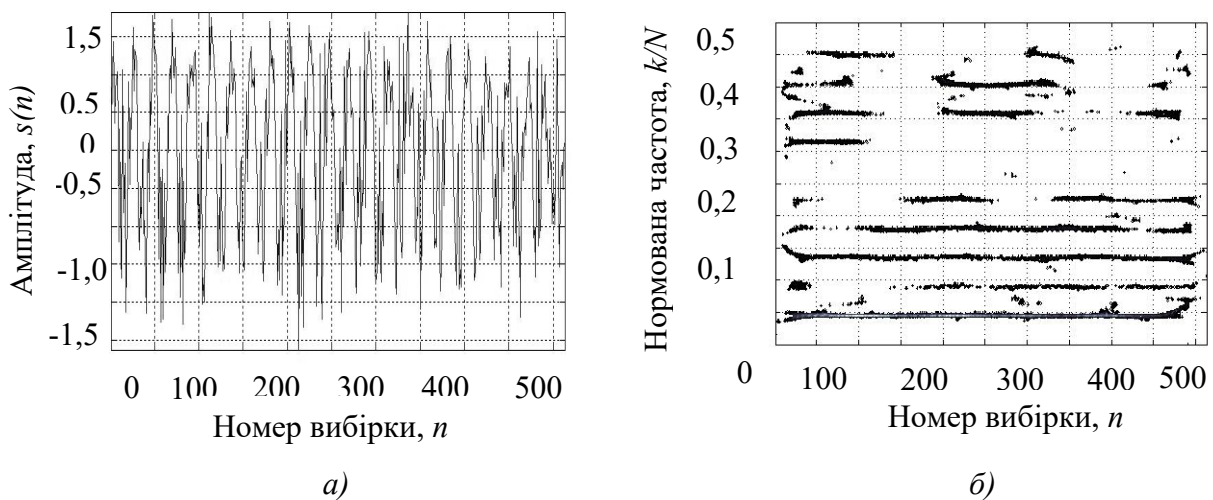


Рис. 1. Часова реалізація (а) та спектрограма (б) акустичного сигналу

У табл. 1 наведено номери бінів k та їх відносні амплітуди $X[k]$ вхідного (незашумленого) сигналу, отримані за допомогою періодограми з прямокутним вікном. Значення з даної таблиці будемо використовувати як еталонні для дослідження ефективності інших методів спектрального оцінювання.

Таблиця 1

Номери бінів та їх відносні амплітуди для вхідної послідовності $x[n]$

k	24	47	70	93	117	185	208
$X[k]$	1	0,0425	0,1191	0,1025	0,0242	0,0349	0,0289

Як показник ефективності методів спектрального аналізу будемо використовувати роздільну здатність за частотою (ширину спектральних ліній) та спроможність виділяти гармонічні складові сигналу в шумові й не створювати шумових викидів, які за амплітудою перевищують сигнальні. Об'єднаємо ці показники в один – статистичний показник якості, що можна визначати як відношення дисперсії оцінки СЩП до квадрата середнього значення цієї оцінки [20]:

$$Q = \frac{\text{var}(X)}{\text{mean}(X)^2}, \quad (4)$$

$$\text{mean}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X[k], \quad \text{var}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X[k] - \text{mean}(X))^2. \quad (5)$$

Даний показник безпосередньо пов'язаний зі статистичною стійкістю спектральної оцінки. Для незначної кількості вузьких піків СЦП, що відповідає акустичному сигналу БПЛА, $\text{mean}(X)$ буде малим, а отже, Q великим (рис. 2а). Даний випадок відповідає високим значенням ВСШ q . У разі зменшення ВСШ кількість шумових викидів та їх амплітуда зростатиме, що призведе до збільшення значення $\text{mean}(X)$, а це, у свою чергу, зменшить значення Q (рис. 2б). Зменшення q для непараметричних методів спектрального оцінювання завжди призводить до зменшення Q .

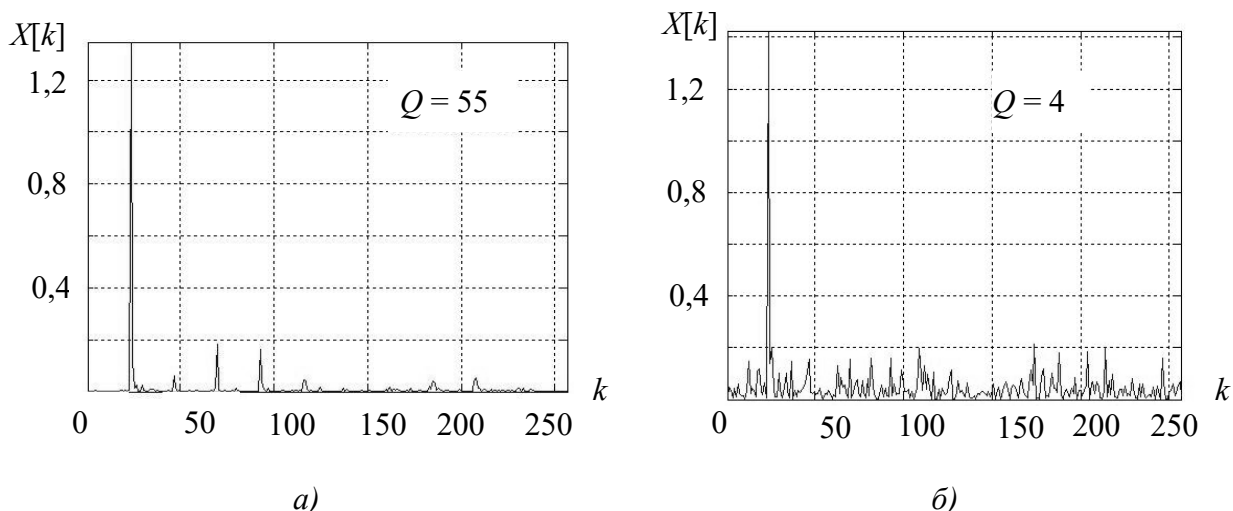


Рис. 2. Оцінки СЦП методом періодограм із прямокутним вікном для $q = 10$ дБ (а) та $q = -5$ дБ (б)

Для параметричних та підпросторових методів малі значення Q можуть з'являтися навіть за досить високих ВСШ. Це є наслідком неправильного вибору порядку моделі АР для параметричних методів (на рис. 3а p обрано надто малим) або кількості комплексних синусоїд для підпросторових методів (на рис. 3б P обрано надто великим). Проте в будь-якому разі малі значення Q вказують на низьку якість отриманих спектральних оцінок акустичних сигналів БПЛА.

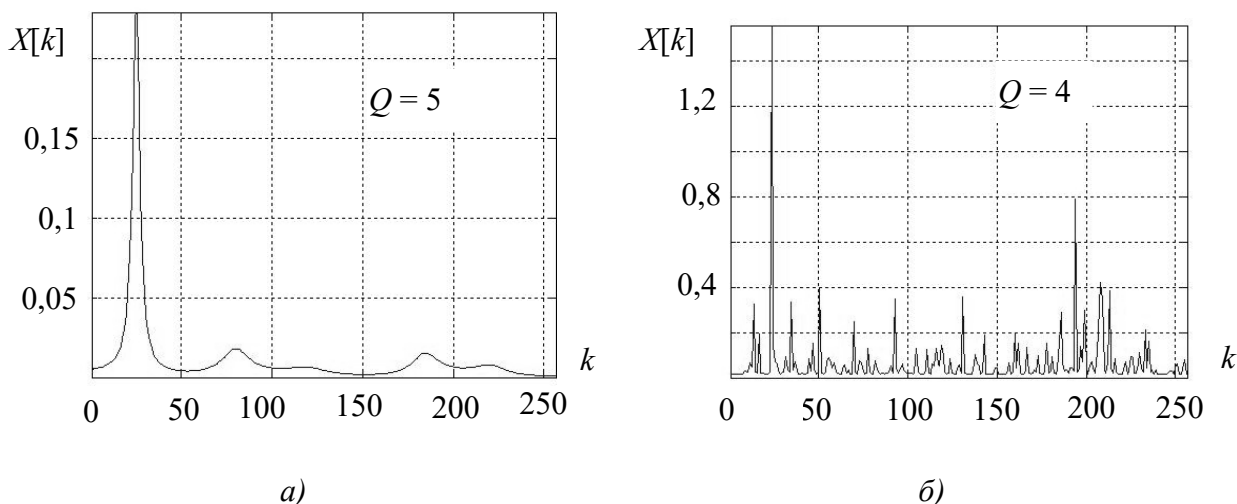


Рис. 3. Оцінка СЦП за $q = 10$ дБ методом Берга для значення порядку АР $p = 10$ (а) та методом MUSIC для кількості гармонік $P = 150$ (б)

Аналіз ефективності методів спектрального оцінювання було проведено за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB. Суть експерименту полягала в додаванні до запису акустичного сигналу БпЛА білого гаусівського шуму, сформованого за допомогою функції `randn`, та розрахунку для кожного методу спектрального оцінювання для різних ВСШ статистичного показника якості відповідно до виразу (4). Значення Q для кожного методу розраховувалося усередненням за 1000 реалізацій СЦП. Результати моделювання наведено на рис. 4.

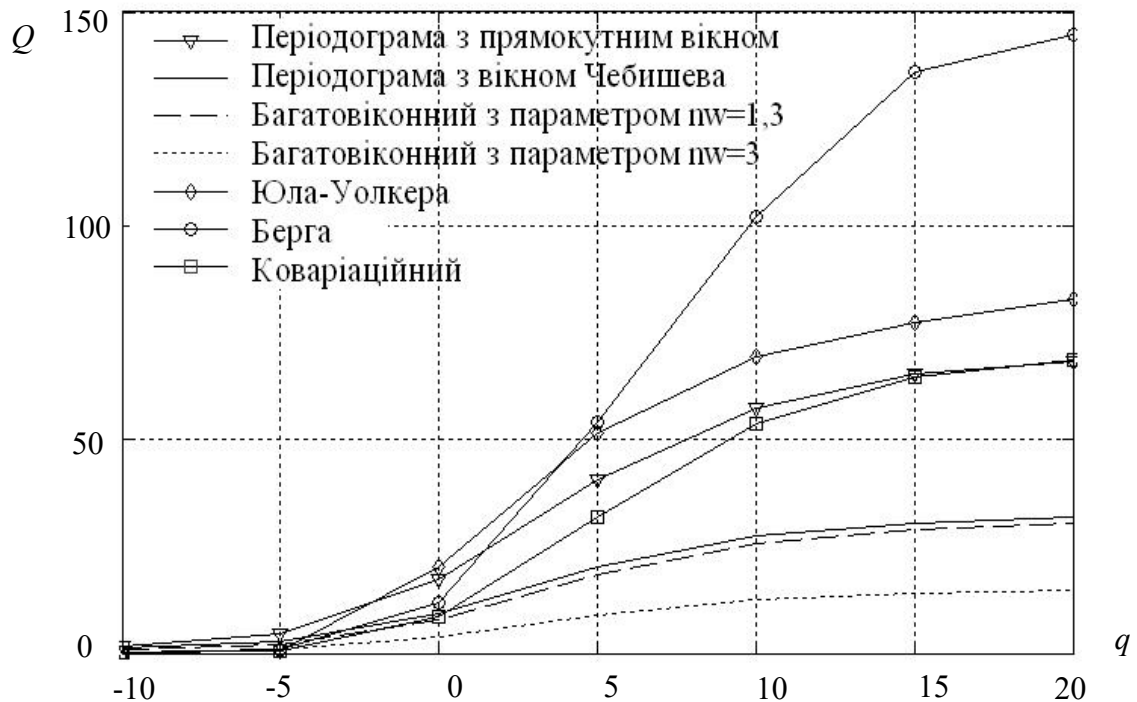


Рис. 4. Залежність статистичного показника якості методів спектрального оцінювання від ВСШ

На рис. 4 видно, що за високих ВСШ параметричні методи є більш ефективними порівняно з непараметричними. Проте таке твердження буде справедливим лише в разі правильного вибору порядку моделі. Під час проведення експерименту для кожного значення ВСШ параметр AR моделі обирався таким чином, щоб отримана СЦП була максимально наближеною до еталонних даних (табл. 1), тобто щоб не виникали хибні максимуми і не спотворювалося співвідношення між амплітудами бінів. Для високих ВСШ ($q > 10$ дБ) порядок моделі можна обирати досить високим (близьким до гранично можливого). У разі зниження ВСШ порядок моделі необхідно зменшувати, оскільки високі значення p призводять до розщеплення спектральних ліній, появи значних шумових викидів та спотворення значень відносних амплітуд гармонік, тобто перерозподілу енергії сигналу між його складовими. Зниження порядку моделі хоча й усуває ці негативні фактори, проте призводить до зміщення спектральних ліній (чим менше q , тим більше зміщення) та їх розширення, що також знижує значення Q . Під час роботи з реальними сигналами за невідомого значення ВСШ значення порядку AR доцільно обирати на рівні $p \approx 0,1N$, що є оптимальним за $q \approx 0$ дБ, і далі збільшувати та зменшувати його й відстежувати зміну значення Q . Робочим обрати необхідно те значення p , за якого Q буде максимальним.

Окремо варто розглянути підпросторові методи. Навіть за високих значень ВСШ ($q \geq 10$ дБ) неможливо визначити стратегію вибору кількості комплексних синусоїд P для адекватного відображення спектрального складу сигналу. Метод MUSIC є нестабільним навіть за малих значень P , що проявляється в перерозподілі енергії сигналу між складовими та зміщенні спектральних ліній відносно їх дійсного положення. Тому на рис. 4 результати моделювання для даного методу не відображені, а його застосування для виявлення акустичних сигналів БпЛА є недоцільним.

Для білого гаусівського шуму всі методи спектрального оцінювання (крім підпросторових) дають значення Q у межах від 0 до 2 (для параметричних порядок моделі повинен бути при цьому не вище 100). На рис. 5 показана залежність статистичного показника якості для різних порядків моделей AP , вираженого в частках довжини послідовності. Як бачимо, для малих порядків моделі ($p \leq 0,12N$) методи Юла – Уолкера, Берга та коваріаційний дають практично однакові значення Q .

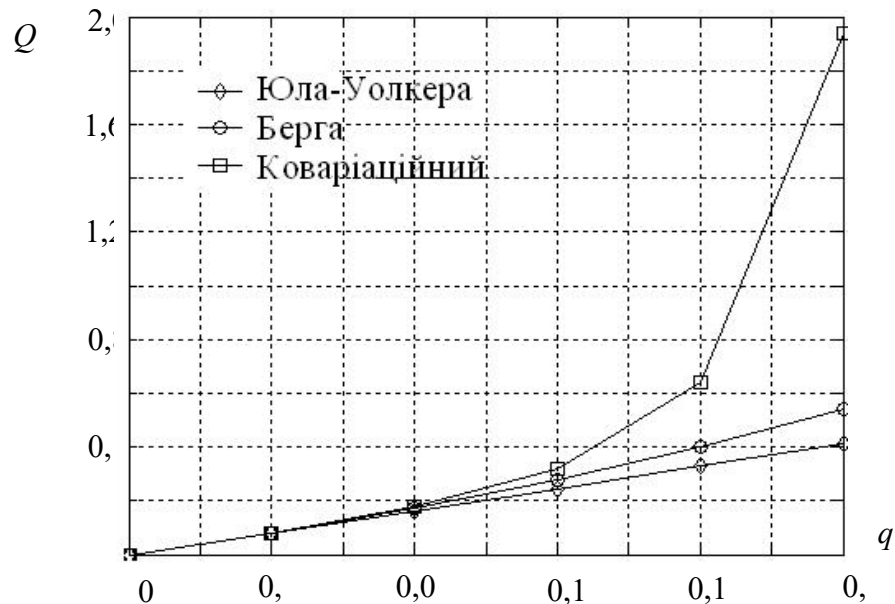


Рис. 5. Залежність статистичного показника якості методів спектрального оцінювання для білого шуму від порядку моделі AP

Для періодограми $Q \approx 0,99$, причому застосування вагової обробки майже не впливає на це значення. Для багатовіконного методу за $nw = 1,3$ значення $Q = 0,51$ і зменшується в разі збільшення даного добутку.

Не дивлячись на те, що отримане значення Q перевищує дане значення для відповідного методу спектрального аналізу для шуму, слабкі гармоніки акустичного сигналу БпЛА можуть бути повністю замасковані шумовими викидами.

Висновки. Використання значення статистичного показника якості як порога для прийняття рішення про наявність або відсутність акустичного сигналу БпЛА в прийнятій реалізації та його подальшого оброблення доцільно використовувати для значень ВСШ більше 5 дБ. Серед параметричних методів найбільш ефективними є методи Юла – Уолкера та Берга, а з-поміж непараметричних – періодограма без вагової обробки. В умовах невизначеності щодо значення ВСШ вибір порядку моделі AP здійснюється методом перебору, починаючи зі значення $p \approx 0,1N$.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку варто зосередити на розробленні алгоритмів виявлення акустичних сигналів БПЛА, для яких метод спектрального оцінювання можна динамічно змінювати залежно від сигнально-завадової обстановки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zelnio A. M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. Electrical Engineering, Wright State University, 2007. 55 p.
2. Зінченко С. А., Свіжевський В. Ф. Пасивна акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів Тези доп. наук.-тех. конф. // [Інформаційна безпека України], (Київ, 12–13 березня 2015 р.). Київ : КНУ, 2015. С. 74–75.
3. Minas B., Goldman G. H. Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array. Adelphi, MD 20783–1138, ARL-TR-7086 Report. 2014. 34 p.
4. Stoica P., Moses L. R. Introduction to spectral analysis. New Jersey, Prentice Hall. 1997. 345 p.
5. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. Москва : Мир, 1990. 584 с.
6. Шахтарин Б. И., Ковригин В. А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. Москва : Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
7. Moon T. I., Stirling W. C. Mathematical Methods and Algorithms For Signal Processing. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. New Jersey, 2000. 978 p.
8. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV // Applied Acoustics. 2013. № 74. P. 79–88.
9. Saravanakumar A., Senthilkumar K. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor // Defence Science Journal. March 2014. Vol. 64, №. 2. P. 95–98.
10. Massey K., Gaeta R. Noise Measurements of Tactical UAVs // 16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference. 2010. P. 1–16.
11. Harvey B., O’Young S. Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV // Drones. 2018. № 1. <https://doi.org/10.3390/drones2010004>
12. Pham T., Srour N. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5417. P. 24–29.
13. Dumitrescu C. et al. Development of an Acoustic System for UAV Detection. Sensors. 2020. Vol. 20. <https://doi.org/10.3390/s20174870>
14. Карташов В. та ін. Алгоритми пеленгації безпілотних літальних апаратів за їх акустичним випромінюванням // Радіотехніка. 2019. № 1 (196). P. 22–31. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.1.196.02>
15. Олейников В. Н. и др. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радіотехніка : Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. 2019. Вып. 199. С. 29–37. DOI:10.30837/rt.2019.4.199.03
16. Карташов В., Харченко О., Чумаков В. Використання ефекту стохастичного резонансу для аналізу спектрів акустичного випромінювання малих безпілотних літальних апаратів // Радіотехніка, 2019. № 2 (197). С. 100–106. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.2.197.13>

17. Тихонов В. А. та ін. Виявлення-розпізнавання безпілотних літальних апаратів з використанням складової моделі авторегресії їх акустичного випромінювання. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2020. № 81. С. 38-46. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.38-46
18. Orlov V. V. et al. Study of capabilities of unmanned aerial vehicle sound location in the tasks of the monitoring of terroristic threats // Visnyk NTUU KPI Serii Radiotekhnika, Radioaaratobuduvannia. 2019. № 79. P. 24-32. DOI: 10.20535/RADAP.2019.79.24-32
19. Prabhu K. M. M. Window functions and their applications in signal processing. Taylor & Francis Group, LLC, 2014. 406 p.
20. Гордієнко Ю. О. та ін. Вплив відношення сигнал-шум на статистичний показник якості акустичного спектрального портрету безпілотного літального апарату // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2017. № 4 (53). С. 81–85.

Подано 30.12.2020

REFERENCES

1. Zelnio, A. M. (2007). *Detection of small aircraft using an acoustic array*. Thesis. B.S. Electrical Engineering, Wright State University.
2. Zinchenko, S. A., & Svizhevskyi, V. F. (2015). Pasyvna akustychna systema vyavleniia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Passive speaker detection system for unmanned aerial vehicles]. In *Tezy dop. nauk.-tekh. konf. "Informatsiina bezpeka Ukrainy" [Abstracts of scientific and technical reports. conf. "Information security of Ukraine"]*. Kyiv, March 12–13, 2015. (pp. 74–75). Kyiv: KNU [in Ukrainian].
3. Minas, B., & Goldman, G. H. (2014). *Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array*. Adelphi, MD 20783–1138, ARL-TR-7086 Report.
4. Stoica, P., & Moses, L. R. (1997). *Introduction to spectral analysis*. New Jersey, Prentice Hall.
5. Marple Jr., S. L. (1990). *Tsifrovoi spektralnyi analiz i ego prilozheniia [Digital Spectrum Analysis and its Applications]*. Trans. from English. Moscow [in Russian].
6. Shakhtarin, B. I, & Kovrigin, V. A. (2005). *Metody spektral'nogo otsenivaniia sluchainykh protsessov [Methods for spectral estimation of random processes]*. Moscow [in Russian].
7. Moon, T. I., & Stirling, W. C. (2000). *Mathematical Methods and Algorithms For Signal Processing*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. New Jersey.
8. Sinibaldi, G., & Marino, L. (2013). Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. *Applied Acoustics*, 74, 79–88.
9. Saravanakumar, A., & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor. *Defence Science Journal*, Vol. 64, № 2, 95–98.
10. Massey, K., & Gaeta, R. (2010). Noise Measurements of Tactical UAVs. In *16th AIAA 2010-3911/CEAS Aeroacoustics Conference*.(pp. 1–16).
11. Harvey, B., & O'Young, S. (2018). Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV. *Drones*, № 1. <https://doi.org/10.3390/drones2010004>
12. Pham, T., & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE*, Vol. 5417, 24–29.

13. Dumitrescu, C. et al. (2020). Development of an Acoustic System for UAV Detection. *Sensors, Vol. 20*. <https://doi.org/10.3390/s20174870>
14. Kartashov, V. et al. (2019). Alhorytmy pelenhatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ za yikh akustychnym vyprominiuvanniam [Algorithms of direction finding of unmanned aerial apparatus for high acoustic viprominiuvanniam]. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, 1 (196), 22–31. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.1.196.02>
15. Oleinikov, V. N. et al. (2019). Eksperimental'naia otsenka effektivnosti algoritmov pelengovaniia bespilotnykh letatel'nykh aparatov po akusticheskomu izlucheniiu [Experimental shade of efficiency of algorithms of direction finding of unmanned aerial vehicles according to acoustic emission]. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, 199, 29–37. DOI:10.30837/rt.2019.4.199.03 [in Russian].
16. Kartashov, V., Kharchenko, O., & Chumakov, V. (2019). Vykorystannia efektu stokhastychnoho rezonansu dlia analizu spektriv akustychnoho vyprominiuvannia malykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Using the stochastic resonance effect to analyze the acoustic radiation spectra of small unmanned aerial vehicles]. *Radiotekhnika [Radio Engineering]*, 2 (197), 100–106. <https://doi.org/10.30837/rt.2019.2.197.13> [in Ukrainian].
17. Tykhonov, V. A. et al. (2020). Vyiavlennia-rozpiznavannia bezpilotnykh litalnykh aparativ z vykorystanniam skladovoi modeli avtorehresii yikh akustychnoho vyprominiuvannia [Detection-recognition of unmanned aerial vehicles using a component model of autoregression of their acoustic radiation.]. *Visnyk NTUU "KPI". Serii Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering]*, 81, 38–46. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.38-46 [in Ukrainian].
18. Orlov, V. V. et al. (2019). Study of capabilities of unmanned aerial vehicle sound location in the tasks of the monitoring of terroristic threats. *Visnyk NTUU "KPI". Serii Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering]*, 79, 24–32. DOI: 10.20535/RADAP.2019.79.24-32
19. Prabhu, K. M. M. (2014). *Window functions and their applications in signal processing*. Taylor & Francis Group, LLC.
20. Hordiienko, Yu. O. et al. (2017). Vplyv vidnoshennia syhnal-shum na statystychnyi pokaznyk yakosti akustychnoho spektralnoho portretu bezpilotnoho litalnoho aparatu [Influence of signal-to-noise ratio on statistical indicator of quality of acoustic spectral portrait of unmanned aerial vehicle]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl [Proceedings of Kharkiv National University of the Air Force]*, 4 (53), 81–85. Kharkiv: KhNUAF [in Ukrainian].

M. V. Buhaiov, V. V. Branovytskyi, Y. O. Khorenko

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SPECTRAL ESTIMATION METHODS FOR DETECTION OF UAV ACOUSTIC SIGNALS

One of the most important components of counteracting small unmanned aerial vehicles is their reliable detection. You can use propeller noise to detect such objects at short distances. An energy or harmonic detector is used to receive unmanned aerial vehicles acoustic emission. At low signal-to-noise ratios, which is most common in practice, the harmonic detector provides a higher probability of detection compared to energy. The principle of the harmonic detector is based on spectral analysis of acoustic signals. A mathematical model of the acoustic signal of an

aircraft-type unmanned aerial vehicles is proposed. It is shown that at short time intervals (tens of milliseconds) such signals can be considered as stationary and for its analysis can be used known methods of spectral estimation. Nonparametric, parametric and subspace methods of spectral estimation are considered for processing of acoustic emission of unmanned aerial vehicles. To conduct a comparative analysis of different methods of spectral estimation, a statistical quality index was used, which can be calculated as a variation of the estimation of power spectral density. This index characterizes the method of spectral estimation in terms of frequency resolution and the ability to detect harmonic components of the signal into noise and not create interference that exceeds the amplitude of the signal. As a result of researches it was established that at high signal-to-noise ratios parametric methods are more effective in comparison with nonparametric. However, such a statement will be valid only if the correct order of the model. It is shown that the use of spatial methods is impractical for the analysis of acoustic signals of unmanned aerial vehicles. The use of the value of the statistical quality indicator as a threshold for deciding on the presence or absence of the acoustic signal of the unmanned aerial vehicles in the adopted implementation and its further processing should be used at SNR values greater than 5 dB.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; spectral estimation; acoustic signal; periodogram; statistical quality index.*