

В. В. Поздняков

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ CFAR ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ГВИНТОМОТОРНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

Статтю присвячено виявленню гармонічних складових у спектрі акустичного сигналу гвинтомоторних засобів повітряного нападу. У прийнятому акустичному сигналі можуть бути наявні гармоніки як одного, так і кількох джерел випромінювання. Аналізуючи значення частот гармонічних складових із урахуванням доплерівського зсуву та їх розподіл уздовж осі частот, можна визначити кількість джерел випромінювання, а також оцінити параметри їх руху. Виявлення гармонічних складових на фоні шуму ускладнене через те, що його спектральна щільність нерівномірна та невідома. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати адаптивний метод порогового оброблення – алгоритм із постійним рівнем хибної тривоги (constant false alarm rate – CFAR), який застосовують під час виявлення радіолокаційних сигналів, оскільки він здатний відстежувати зміни рівня шуму. Проаналізовано спектр акустичного сигналу та визначено числові значення параметрів, необхідних для налаштування алгоритму. Проведено порівняння трьох різних підходів до оцінювання рівня фонового шуму й розрахунку порога виявлення. Визначено параметри алгоритму, що дозволяють побудувати поріг, який забезпечує відслідковування перепадів рівня шуму та виявлення як потужних, так і слабких гармонік у спектрі акустичного сигналу.

Результати експерименту показують, що запропонований метод дозволяє виявляти на 45% більше гармонік порівняно з алгоритмом послідовного відкидання середнього значення (consecutive mean excision) та на 26% порівняно з алгоритмом ковзного середнього (moving average). Отримані результати можуть бути використані для удосконалення наявних та розроблення нових пристроїв і систем акустичного моніторингу повітряного простору.

Ключові слова: засіб повітряного нападу; акустичний сигнал; алгоритм CFAR; частотний спектр; гармонічна складова; поріг.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Для ураження енергетичних та інфраструктурних об'єктів у глибині території держави противник широко застосовує гвинтомоторні засоби повітряного нападу (ЗПН) разом із ракетним озброєнням повітряного, морського та наземного базування. Крім того, вони можуть виконувати функції розвідки, спостереження, відволікання та виснаження систем протиповітряної оборони. Відносно невисока швидкість та висота польоту дає можливість виявляти такі ЗПН акустичними засобами.

Акустичний сигнал гвинтомоторного ЗПН полігармонічний із безперервними за частотою шумовими складовими [1]. Рівень шуму є нерівномірним, тому використання

порога із фіксованим рівнем для розділення сигнальних і шумових відліків у частотній області призведе до пропуску слабких високочастотних гармонічних складових, що погіршить подальші етапи оброблення сигналу, зокрема пошук кратних гармонік.

Для виявлення короткотривалих сигналів на фоні шуму з невідомою і нерівномірною щільністю використовують алгоритми CFAR (constant false alarm rate) [2]. На цей час відома велика кількість модифікацій таких алгоритмів, проте для кожного конкретного випадку (типу сигнально-шумової обстановки) необхідно обрати вид алгоритму та визначити його параметри.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом вчені багатьох країн активно використовують як у теоретичних, так і в прикладних дослідженнях алгоритми CFAR, зокрема їх постійно модифікують, удосконалюють і застосовують у різних галузях оброблення сигналів.

У роботі [3] за допомогою алгоритму CFAR було модифіковано сучасну глибоку нейронну мережу для розв'язання проблеми виявлення різномасштабних суден на радіолокаційних зображеннях. Використовуючи пропозиції об'єктів, згенеровані мережею для захисних інтервалів алгоритму CFAR, цей метод виявляє цілі невеликого розміру. У [4] запропоновано метод регуляції відсіву глибокої нейронної мережі, що ґрунтується на алгоритмі CFAR. Він дозволяє реалізувати адаптивне видалення деяких нейронних вузлів та оптимізацію нейронних вузлів, що беруть участь в обчисленні. Це сприяє зменшенню обсягу зайнятої пам'яті та запобігає надмірній параметризації.

У публікації [5] розглянуто виявлення декількох об'єктів на акустичному зображенні багатопроменевого гідролокатора. Запропонований метод є ефективним і стійким у багатооб'єктному середовищі, особливо в разі близького їх розташування.

Роботи [6–8] присвячені розробленню методів та підходів на основі використання CFAR-детекторів для виявлення мережових вторгнень і загроз безпеці в комп'ютерних мережах.

У [9] запропоновано комплексний метод локалізації дефектів кабелю на основі частотної рефлектометрії та алгоритму CFAR. Дані спектра локалізації підставляють у CFAR для отримання порога й вилучення інформації про ефективну амплітуду кабелю та відповідне положення дефекту.

У [10] описано алгоритм виявлення витоків в трубопроводі на основі сигналів акустичних сенсорів за допомогою CFAR детектора. Проведено натурний експеримент та підтверджено можливість застосування такого типу алгоритму для виявлення інцидентів витоків в реальному масштабі часу.

Проте серед усієї сукупності робіт відсутні дослідження щодо адаптації алгоритмів CFAR для виявлення гармонічних складових акустичних сигналів ЗПН.

Формулювання завдання дослідження. Метою дослідження є збільшення кількості виявлених гармонічних складових акустичного сигналу ЗПН за рахунок вибору та адаптації параметрів алгоритму CFAR. Для цього необхідно проаналізувати відомі алгоритми CFAR, умови їх застосування, а також вибрати потрібний та значення його параметрів з урахуванням особливостей структури частотного спектра акустичних сигналів гвинтомоторних ЗПН.

Виклад основного матеріалу**Структура акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН у частотній області**

Акустичний сигнал гвинтомоторних ЗПН, оснащених поршневым двигуном із повітряним гвинтом, є досить складним. Він включає низку гармонічних та безперервних за частотою шумоподібних складових [1]. Частота гармонічних складових є інформаційним параметром сигналу. Його можливо використати для виявлення ЗПН та визначення їх кількості в групах. У прийнятому акустичному сигналі можуть бути наявні гармоніки як одного, так і кількох джерел випромінювання. Аналізуючи значення частот гармонічних складових із урахуванням доплерівського зсуву та їх розподіл уздовж осі частот, можна прийняти рішення про кількість джерел випромінювання, а також оцінити параметри їх руху.

Періодограмні методи отримання спектральних оцінок, що ґрунтуються на перетворенні даних на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і подальшому їх усередненні, є найбільш стійкими методами спектрального оцінювання, тому можуть бути застосовані майже до всіх класів сигналів і шумів, які володіють стаціонарними властивостями. Крім того, методи спектрального оцінювання, що ґрунтуються на обчисленні ШПФ, є найбільш доцільними щодо обчислювальної складності [11]. Тому в подальшому для розрахунку енергетичного спектра акустичного сигналу будемо використовувати періодограмні оцінки. Розглянемо випадок без усереднення спектральних оцінок.

Спектральна щільність потужності (СЩП) сигналу розраховуємо із використанням періодограми Уелча. Спочатку визначаємо вибіркового спектр зваженого вікном j -го сегмента сигналу за таким виразом:

$$X_j(k) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} x(n)w(n)e^{-j2\pi \frac{kn}{N_{FFT}}}, \quad (1)$$

де $x(n)$ – n -й відлік прийнятого сигналу;

N_{FFT} – довжина ШПФ;

$w(n)$ – n -й відлік віконної функції.

Сусідні фрагменти сигналу можемо взяти з перекриттям R відліків.

Накопичення M вибірових енергетичних спектрів дасть оцінку СЩП:

$$P_x(k) = \sum_{j=1}^M |X_j(k)|^2. \quad (2)$$

На рис. 1 показано графік СЩП акустичного сигналу гвинтомоторного ударного безпілотного літального апарата (БпЛА), отриманий із такими параметрами періодограми: $N_{FFT} = 8192$, $M = 3$, $R = 0,5 N_{FFT}$ – та прямокутним вікном. Частота дискретизації становить $F_s = 44,1$ кГц, що є стандартним значенням для більшості пристроїв звукозапису. Гармонічні складові спектра, промодульовані шумовою складовою, слідує на частотах, кратних до обертів двигуна. Амплітуда гармонік зменшується зі збільшенням частоти, проте можемо спостерігати, що деякі гармоніки з більшою частотою перевищують попередні, а деякі взагалі не розрізняються на фоні шуму.

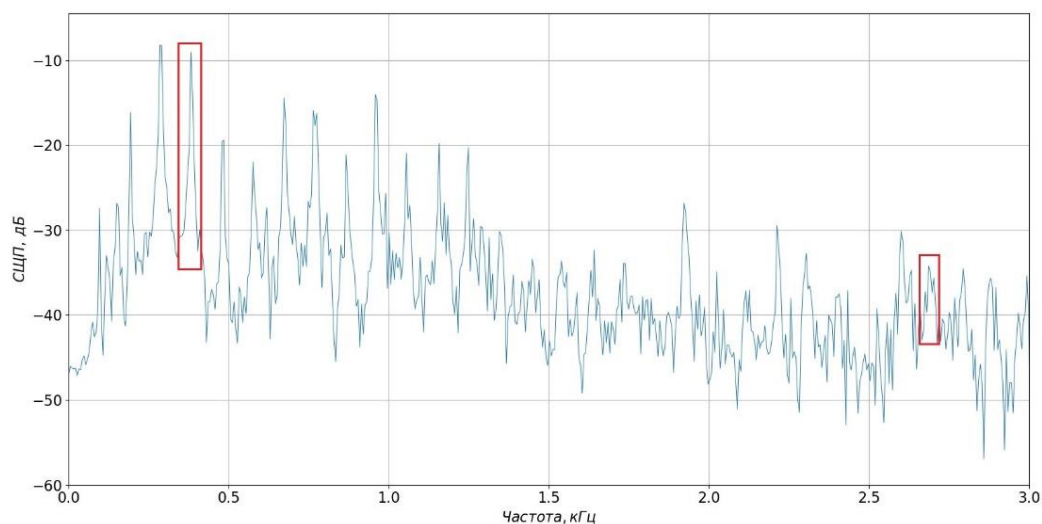


Рис. 1. Графік СЩП акустичного сигналу гвинтомоторного БпЛА

Це відбувається, тому що на акустичні хвилі під час їх поширення впливає багато факторів (температура повітря, опади, вітер, вологість тощо), крім того, інтенсивність акустичного поля в точці реєстрації сигналу змінюється під час маневрування ЗПН. Отже, можна зробити висновок, що амплітуда гармонічних складових має випадковий характер та є неінформативним параметром.

Середній рівень шуму розподілений нерівномірно, має перепади в межах 5–10 дБ. Зі збільшенням частоти спостерігається зниження потужності як гармонічних, так і шумових складових. Це пов'язано з атмосферним затушенням. Коефіцієнт затушення здебільшого залежить від частоти звуку, до 1 кГц його вплив незначний, крім того, на нього впливають температура та вологість повітря.

Гармоніка акустичного сигналу не є ідеальним коливанням чистого тону, а займає певну ширину. На рис. 2 показано збільшене зображення гармонік акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН на частотах близько 380 Гц та 2680 Гц, що виділені прямокутниками на рис. 1. Ширина піка на рівні шуму становить близько 40 Гц. Його форма з вищою частотою більш розширена, що спричинено проявом ефекту Доплера.

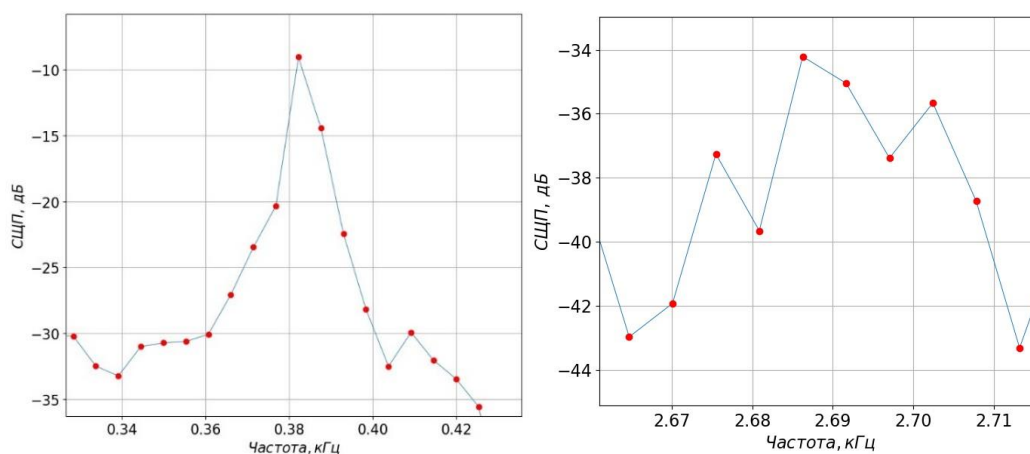


Рис. 2. Гармоніки акустичного сигналу гвинтомоторного БпЛА

Для вказаних вище частоти дискретизації та розміру вікна періодограми така ширина піка становить $K_p = 8$ відліків частотного спектра, а період їх слідування – $K_c = 18$ –19 відліків.

У груповому сигналі БпЛА, зображеному на рис. 3, спостерігаються розширені гармоніки за рахунок множення піків, що наведені на рис. 4. Це відбувається, тому що акустичні випромінювання від кількох БпЛА одночасно приходять на мікрофон, проте частоти гармонічних складових не збігаються, оскільки вони залежать від положення БпЛА відносно мікрофона, його швидкості та режиму роботи двигуна. Коли невідповідність частот є більшою, ніж ширина гармоніки сигналу окремого ЗПН, вони спостерігаються окремо. Розмір розширених гармонік коливається і становить від 18 до 25 частотних відліків.

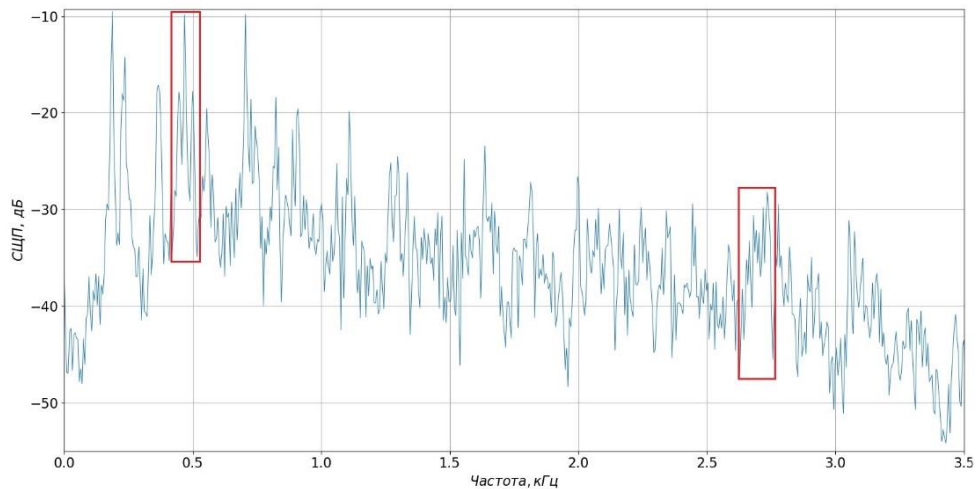


Рис. 3. Графік СПП групового акустичного сигналу трьох БпЛА

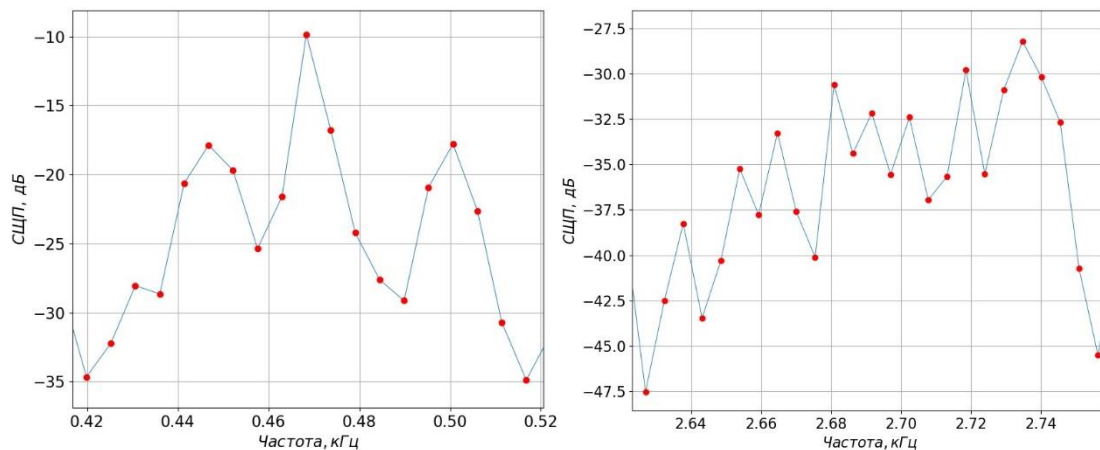


Рис. 4. Гармоніки групового акустичного сигналу трьох БпЛА

Отже, груповий акустичний сигнал гвинтомоторних ЗПН насичений гармонічними складовими та має значні коливання рівня шуму, тому метод виявлення гармонік із фіксованим порогом не ефективний. Для виявлення більшої кількості гармонічних складових доцільно використовувати адаптивні методи порогового оброблення, які здатні відстежувати зміни рівня шуму та гармонічних складових. До таких методів належать

алгоритми CFAR, які досить широко використовують під час виявлення радіолокаційних сигналів [12].

Аналіз відомих алгоритмів CFAR та особливостей їх застосування

Алгоритм CFAR – це адаптивний метод порогового оброблення, який досить широко використовують у радіолокації для виявлення цілей в умовах нерівномірного рівня шуму, впливу перешкод та інтерференції сигналів. Завдяки адаптивності рівня порога, він здатний забезпечити кращий показник якості виявлення, ніж метод із фіксованим порогом, ефективність якого погіршується в разі зміни відношення сигнал / шум [2].

В алгоритмі CFAR середня потужність шуму оцінюється за допомогою ковзного вікна, центром якого є тестовий відлік (ТВ), який перевіряється на наявність у ньому енергії відбитого сигналу. Воно включає захисні інтервали K_s та інтервали оцінювання K_e з обох боків від ТВ. Будову ковзного вікна алгоритму зображено на рис. 5. Рівень шуму ТВ оцінюють на основі статистики відліків переднього K_{ef} та заднього K_{er} оцінних інтервалів. Відліки захисних інтервалів K_s не використовують для оцінювання рівня шуму, оскільки вони можуть містити значення, пов'язані з ТВ, що призведе до зміщення оцінки рівня шуму.

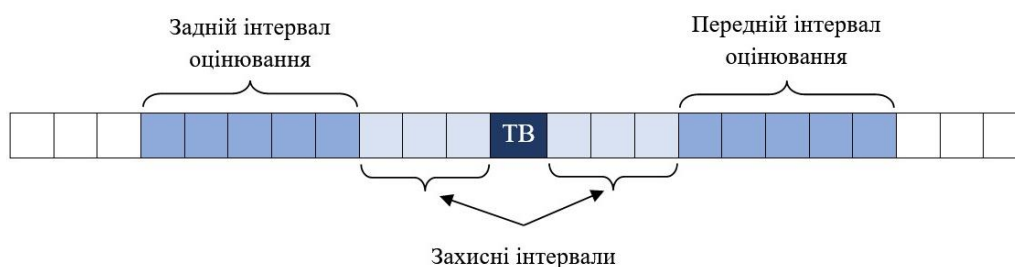


Рис. 5. Будова ковзного вікна

Ковзне вікно рухається масивом даних, переміщуючись щоразу на один відлік. У кожній позиції приймається рішення про виявлення – перевищення ТВ порогового рівня, визначеного на основі шуму в інтервалі K_e . Є декілька підходів до оцінювання рівня фонового шуму, які використовують за різних умов середовища поширення хвиль та сигнальної обстановки. Розглянемо деякі з них.

Усереднення за комірками CFAR (cell averaging – CA-CFAR) є одним із найпростіших методів оброблення. Рівень шуму ТВ розраховується як середнє значення відліків в інтервалі K_e :

$$\sigma_i = \frac{1}{K_e} \sum_{k=1}^{K_e} P_x(k). \quad (3)$$

На його основі визначають поріг виявлення за таким виразом:

$$T = \alpha \cdot \sigma, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт масштабування, який є функцією ймовірності хибної тривоги P_{FA} та кількості відліків в інтервалі K_e .

Поріг виявлення змінюється залежно від рівня шуму і має вище значення з обох боків від відліків, що містять енергію відбитого сигналу. Цей метод оптимальний для рівномірного розподілу фоновому шуму. Його недоліком є маскування близько розташованих сигналів у багатосигнальному середовищі. Ефект маскування спостерігається тоді, коли близько розташований сигнал, який не пов'язаний із сигналом у ТВ, потрапляє в інтервал оцінювання та зміщує порогове значення.

Алгоритм CFAR, у якому для розрахунку порога використовуються відліки тільки одного з інтервалів оцінювання (K_{ef} або K_{er}), може виявляти два близькі сигнали. У цьому методі рівень шуму визначають окремо для K_{ef} та K_{er} , потім беруть менше з двох значень (smallest of CA – SOCA-CFAR) та обчислюють пороговий рівень. Якщо присутні більше двох близьких сигналів, то такий алгоритм може виявити тільки один із них.

Більш досконалим підходом до оцінювання шуму є метод, у якому відліки інтервалу K_e спочатку впорядковуються від найменшого до найбільшого значення (order statistics CFAR – OS-CFAR). Із упорядкованої послідовності беруть k -й найбільший відлік як рівень шуму. Цей метод стійкий у багатосигнальному середовищі, проте має більшу обчислювальну складність.

До загальних недоліків алгоритмів CFAR належить можливе саомаскування широкосмугових сигналів та втрати у відношенні сигнал / шум. Ефект саомаскування виникає тоді, коли ширина смуги сигналу є більшою, ніж захисний інтервал. Інший дефект пов'язаний із тим, що поріг CFAR у середньому є вищим, ніж поріг, побудований за критерієм Неймана – Пірсона для відомих параметрів розподілу шуму [12].

Вибір типу алгоритму та його параметрів

Параметрами, які встановлюють для конкретної реалізації алгоритму CFAR, є величини інтервалів K_s та K_e , а також значення ймовірності хибної тривоги P_{FA} . Ефективність алгоритму CFAR залежить від їх налаштувань. У цьому дослідженні алгоритм CFAR використовуємо для виявлення гармонік в акустичному сигналі, тому розміри інтервалів задаємо, виходячи з їх ширини та періоду слідування.

У ході дослідження було встановлено, що захисний інтервал повинен бути принаймні більшим за ширину гармоніки акустичного сигналу $K_s > K_p$, щоб відліки, які належать до неї, не використовувалися для визначення рівня шуму. Інтервали оцінювання, у свою чергу, не повинні перевищувати відстані між сусідніми гармоніками $K_{ef} < K_c$, $K_{er} < K_c$. Недотримання цих вимог призведе до зміщення оцінки рівня шуму та порога виявлення. Для акустичного сигналу одного БПЛА встановлюємо такі значення параметрів: $K_s = 5$, $K_e = 18$ і $P_{FA} = 10^{-2}$.

У спектрі акустичного сигналу можуть бути присутні інтервали, де гармоніки слабко виділяються на фоні шуму (наприклад, смуга частот від 1,2 кГц до 2,2 кГц (рис. 1)) і, відповідно, їх складніше виявляти порівняно з більш потужними. На рис. 6 показано результат роботи алгоритмів CA-CFAR, SOCA-CFAR, OS-CFAR на саме такому інтервалі. Як видно, форма порога кожного алгоритму відслідковує піки гармонік акустичного сигналу. Проте рівні CA-CFAR та SOCA-CFAR є дещо вищими, ніж OS-CFAR, що призводить до пропуску ними деяких піків.

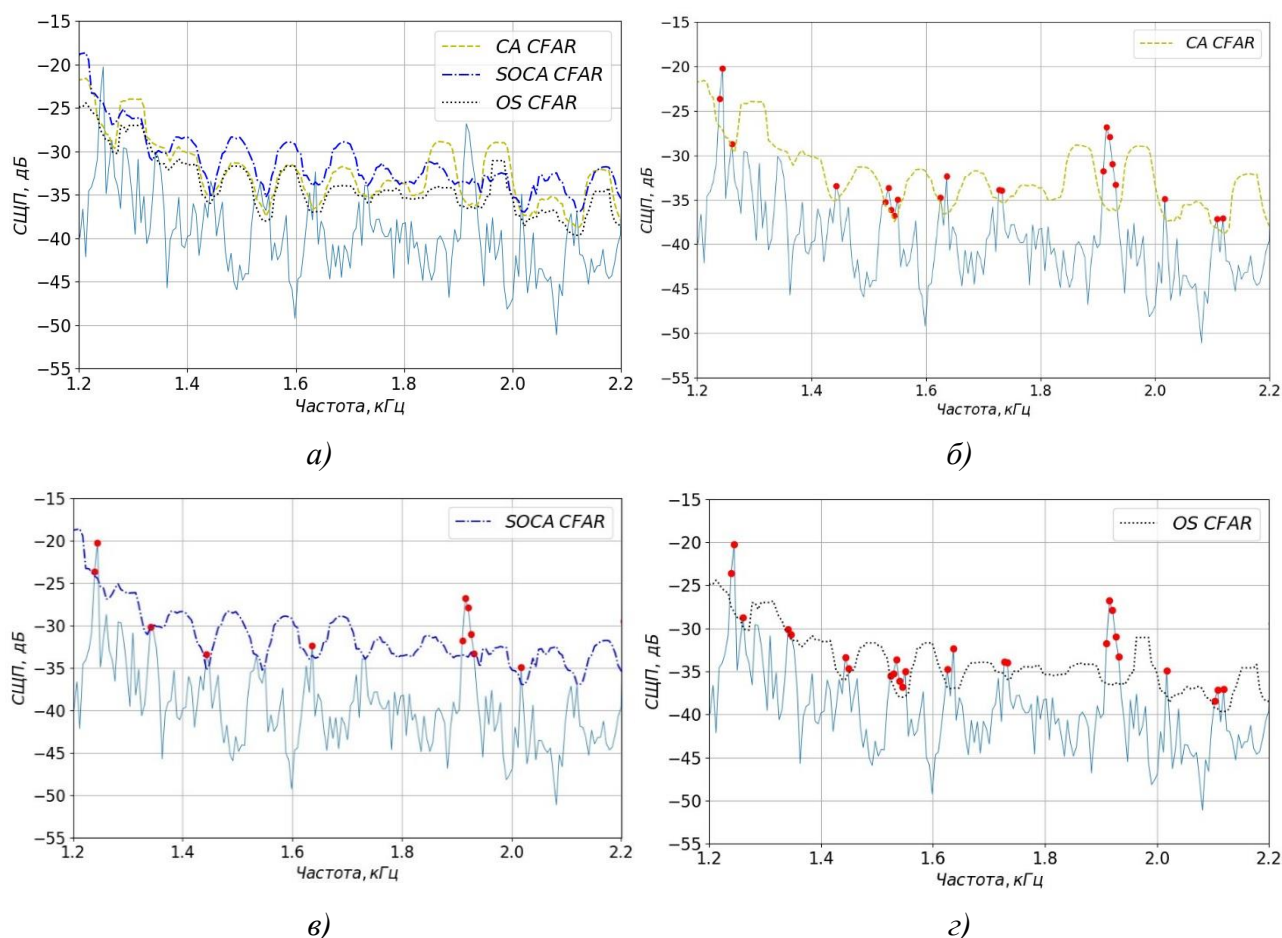


Рис. 6. Виявлення гармонік акустичного сигналу одного БнЛА: а) порівняння алгоритмів; б) CA-CFAR; в) SOCA-CFAR; г) OS-CFAR

Значення хибної тривоги в цьому дослідженні не настільки критичне, як у роботі радіолокатора, тому що виявлені частоти гармонік підлягають подальшому логічному обробленню, а помилкові значення будуть відфільтровуватися, тому можна обирати його таким, що забезпечить виявлення якнайбільшої кількості піків гармонічних складових.

У разі групового акустичного сигналу процес виявлення гармонік значно ускладнюється. Множина піків із різною шириною та періодом слідування потребує більш гнучкого підходу. На рис. 7а показано роботу алгоритмів CFAR із тими самими налаштуваннями, що й у попередньому випадку. Проявляється ефект маскуванню близьких піків, а форма порога не відповідає коливанню рівня шуму в сигналі.

Для виявлення більшої кількості гармонік потрібно збільшити інтервал K_s до ширини груп гармонік та визначити величину інтервалу K_e . Як бачимо, недостатня його ширина (рис. 7б) призводить до значних флуктуацій порогового рівня, тому що лише невелика кількість відліків шуму використовується для обчислень. Крім того, в інтервал K_e потрапляють гармоніки сигналу та зміщують поріг. Варто зазначити, що надто велике значення K_e збільшує час обчислення, що впливає на продуктивність системи в реальному масштабі часу. Рис. 7в та рис. 7г ілюструють роботу алгоритмів зі значеннями $K_e = 20$ та $K_e = 30$ відліків відповідно.

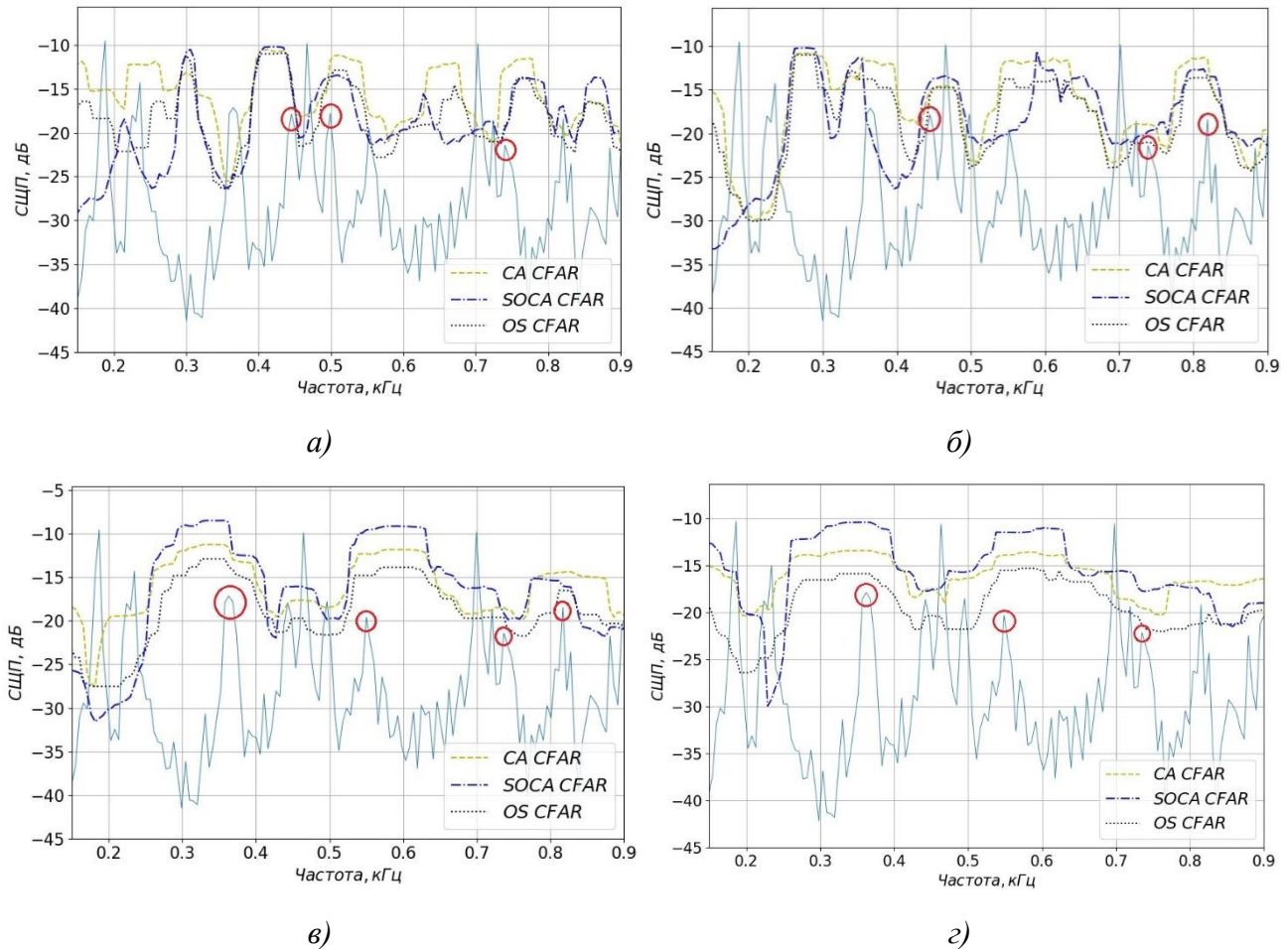
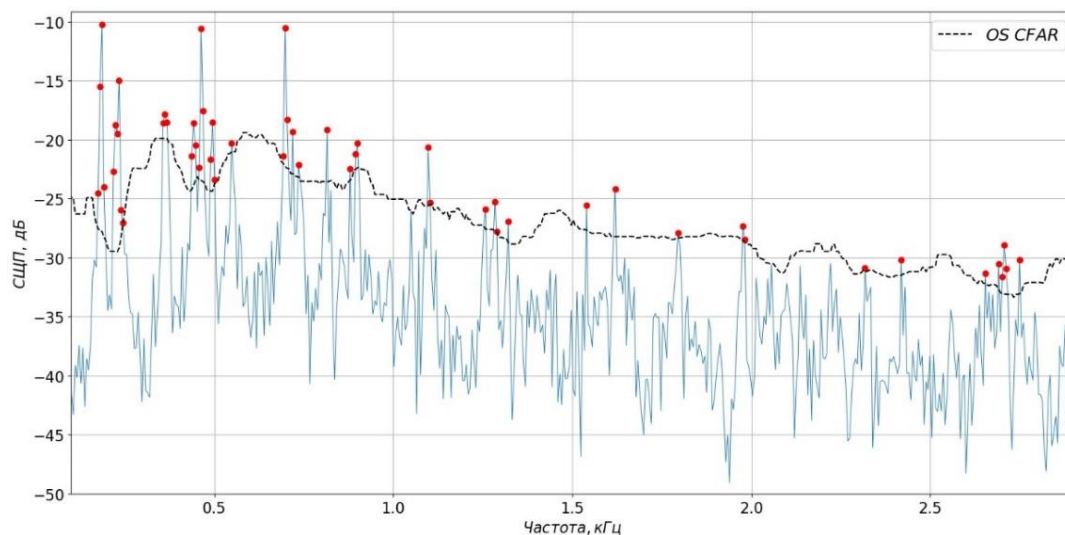


Рис. 7. Виявлення гармонік групового акустичного сигналу БпЛА за різних інтервалів K_s та K_e : а) 5, 9; б) 12, 9; в) 12, 20; г) 12, 30

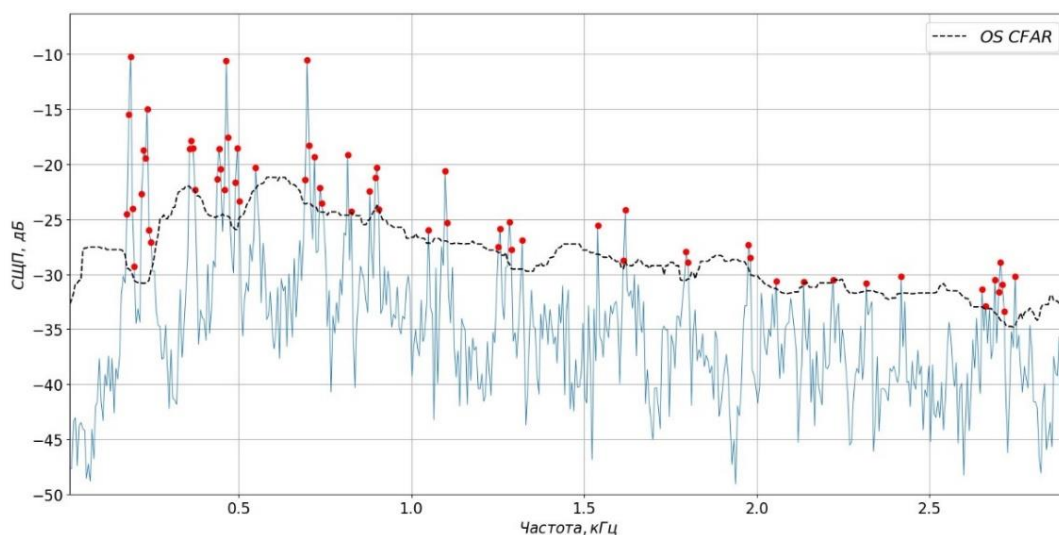
Із викладеного вище випливає, що в разі збільшення K_e поріг алгоритму OS-CFAR помітно знижується порівняно із CA-CFAR та SOCA-CFAR, а його форма стає більш гладкою. Це можна пояснити принциповою відмінністю в обчисленні рівня порога. Досліджуваний алгоритм дозволяє відкинути будь-яку кількість відліків, що містять енергію гармонічних складових, а також оцінити рівень шуму за допомогою більш широкого інтервалу значень.

Нижче на рис. 8 показано роботу алгоритму OS-CFAR із груповим акустичним сигналом у смузі частот до 3 кГц. Як бачимо, зменшення номера k -го відліку з упорядкованої статистики значень інтервалу K_e спричиняє зниження поріга виявлення, а також зменшує крутість і розмах його перепадів. Це, у свою чергу, дозволяє збільшити кількість виявлених гармонік, що продемонстровано на рис. 8б на частотах від 2 кГц до 2,5 кГц.

Отже, у результаті проведеного аналізу можна дійти висновку, що алгоритм OS-CFAR дозволяє виявляти близькі піки в груповому акустичному сигналі гвинтомоторних БпЛА як в області низьких частот, де гармоніки значно перевищують рівень шуму, так і більш високочастотні, які слабко виділяються на його фоні.



а)



б)

Рис. 8. Виявлення гармонік групового акустичного сигналу БпЛА алгоритмом OS-CFAR:
а) $k = 0,6 K_e$; б) $k = 0,5 K_e$

Дослідження запропонованого підходу

Для визначення вирашу в кількості виявлених гармонік порівняно з подібними методами виявлення, які не потребують попереднього оцінювання шуму, був проведений експеримент, у результаті якого встановлено, що алгоритм OS-CFAR виявляє в середньому на 45% більше гармонік, ніж алгоритм послідовного відкидання середнього значення СМЕ (consecutive mean excision) [13], та на 26% більше порівняно з алгоритмом ковзного середнього (moving average – MA). Тестування проводилося із використанням 100 реалізацій групового акустичного сигналу БпЛА в смузі частот від 0 кГц до 3 кГц. Приклад наведено на рис. 9.

Можемо зробити висновок, що алгоритм СМЕ працює на ділянках, де рівень шуму є рівномірним, проте не відслідковує інтервали, коли потужність шумових та гармонічних складових зменшується через атмосферне затухання.

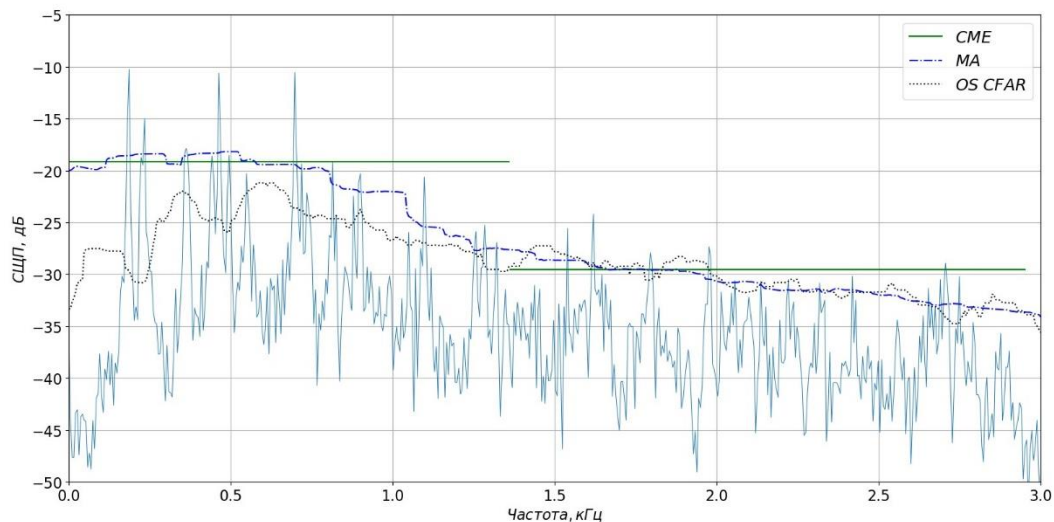


Рис. 9. Порівняння методів виявлення гармонічних складових сигналу

А алгоритм МА працює краще в смузі частот вище 1 кГц, де гармоніки незначно перевищують рівень шуму. У смузі частот до 1 кГц він пропускає менш потужні піки в групових гармоніках. Це є негативним фактором, тому що їх наявність свідчить про кількість окремих джерел акустичного сигналу.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що для виявлення максимальної кількості гармонічних складових акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН доцільно використовувати алгоритм OS-CFAR. Проведений експеримент показав, що за відповідних налаштувань параметрів алгоритму ($K_s = 12$, $K_e = 30$ для $F_s = 44,1$ кГц) запропонований метод може надати кращий результат порівняно з іншими методами виявлення.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення наявних та розроблення нових пристроїв і систем акустичного моніторингу повітряного простору.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у розробленні алгоритмів логічного оброблення виявлених гармонічних складових для розділення кількості ЗПН у груповому акустичному сигналі.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Поздняков В. В., Бугайов М. В. Аналіз акустичних сигналів засобів повітряного нападу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖБІ, 2023. Вип. 25 (I). С. 58–75. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06>
2. Mark A. Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2nd Ed. 2014. ISBN: 978-0-07-179832-7.
3. A Modified Faster R-CNN Based on CFAR Algorithm for SAR Ship Detection / M. Kang, X. Leng, Z. Lin et al. // International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP). Shanghai, China, 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RSIP.2017.7958815>
4. Dropout Regularization Method of Convolutional Neural Network Based on Constant False Alarm Rate / Xiao Jialin, LI Yu, Yuan Qinglong et al. // Journal of East China University of

Science and Technology. 2022. Vol. 48 (1). P. 87–98. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20201127005>

5. Fast Two-Dimensional Subset Censored CFAR Method for Multiple Objects Detection from Acoustic Image / Jue Gao, Haisen Li, Baowei Chen et al. // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, Iss. 3. P. 505–512. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0322>

6. He Di, Leung Henry. Network Intrusion Detection Using CFAR Abrupt-Change Detectors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. March 2008. Vol. 57, № 3. P. 490–497. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.910108>

7. He Di, Leung Henry. Network Intrusion Detection Using a Stochastic Resonance CFAR Technique // Circuits Syst Signal Process. 2009. Vol. 28. P. 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00034-008-9087-y>

8. A Robust Anomaly Detection Method Using a Constant False Alarm Rate Approach / AsSadhan B., AlShaalan R., Diab D. M. et al. // Multimed Tools Appl. 2020. Vol. 79. P. 12727–12750. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08653-8>

9. Location Method for Cable Defects Based on Frequency Domain Reflectometry-Constant False Alarm Rate / B. Wang, S. Li, A. Li et al. // 20th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC–2024). Shanghai, China, 2024. P. 183–189. <https://doi.org/10.1049/icp.2024.2274>

10. An G., Huang Z., Li Y. Constant False Alarm Rate Detection of Pipeline Leakage Based on Acoustic Sensors // Sci Rep. 2023. № 13. P. 14149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41177-3>

11. Kundu D., Nandi S. Statistical Signal Processing: Frequency Estimation. Springer, New Delhi, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2012. 141 p.

12. Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles. 2010. ISBN: 978-1-891121-52-4. <https://doi.org/10.1049/sbra021e>

13. Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms / J. Vartiainen, J. Lehtomäki, H. Saarnisaari et al. // Journal of Electrical and Computer Engineering. 2010. P. 459623. <https://doi.org/10.1155/2010/459623>

Стаття надійшла до редакції 08.04.2025.

REFERENCES

1. Pozdniakov, V. V., Buhaiov, M. V. (2023). Analiz akustychnykh syhnaliv zasobiv povitrianoho napadu [Acoustic Signals Analysis of Aerial Attack Weapon]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats. [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 25 (I), 58–75. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06> [in Ukrainian].

2. Mark, A. (2014). Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2nd Ed. ISBN: 978-0-07-179832-7.

3. Kang, M., Leng, X., & Lin, Z. et al. (2017). A Modified Faster R-CNN Based on CFAR Algorithm for SAR Ship Detection. In *International Workshop on Remote Sensing with*

4. Xiao Jialin, LI Yu, & Yuan Qinglong et al. (2022). Dropout Regularization Method of Convolutional Neural Network Based on Constant False Alarm Rate. *Journal of East China University of Science and Technology*, 48 (1), 87–98. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20201127005>
5. Jue Gao, Haisen Li, Baowei Chen et al. (2017). Fast Two-Dimensional Subset Censored CFAR Method for Multiple Objects Detection from Acoustic Image. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 11, 3, 505–512. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0322>
6. He Di, Leung Henry. (2008). Network Intrusion Detection Using CFAR Abrupt-Change Detectors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57, 3, 490–497. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.910108>
7. He Di, Leung Henry. (2009). Network Intrusion Detection Using a Stochastic Resonance CFAR Technique. *Circuits Syst Signal Process*, 28, 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00034-008-9087-y>
8. AsSadhan, B., AlShaalan, R., & Diab, D. M. et al. (2020). A Robust Anomaly Detection Method Using a Constant False Alarm Rate Approach. *Multimed Tools Appl*, 79, 12727–12750. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08653-8>
9. Wang, B., Li, S., & Li, A. et al. (2024). Location Method for Cable Defects Based on Frequency Domain Reflectometry-Constant False Alarm Rate. In *20th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC-2024)*. Shanghai, China. (pp. 183–189). <https://doi.org/10.1049/icp.2024.2274>
10. An, G., Huang, Z., & Li, Y. (2023). Constant False Alarm Rate Detection of Pipeline Leakage Based on Acoustic Sensors. *Sci Rep.*, 13, 14149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41177-3>
11. Kundu, D., & Nandi, S. (2012). *Statistical Signal Processing: Frequency Estimation*. Springer, New Delhi, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
12. Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. (2010). *Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles*. ISBN: 978-1-891121-52-4. <https://doi.org/10.1049/sbra021e>
13. Vartiainen, J., Lehtomäki, J., & Saarnisaari, H. et al. (2010). Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 459623. <https://doi.org/10.1155/2010/459623>

V. V. Pozdniakov

CFAR ALGORITHM APPLICATION FOR DETECTING ACOUSTIC SIGNALS HARMONIC COMPONENTS OF PROPELLER AERIAL ATTACK WEAPON

The article is devoted to the detection of harmonic components in the acoustic signal spectrum of propeller aerial attack weapon. The received acoustic signal may contain harmonics of both one and several radiation sources. By analyzing the frequency values of the harmonic components with regard to the Doppler shift and their distribution along the frequency axis, it is possible to determine the number of radiation sources and estimate their motion parameters.

Detecting harmonic components in the background noise is difficult because its spectral density is uneven and unknown. To solve this problem, it is proposed to use an adaptive thresholding method, an algorithm with a constant false alarm rate, which is used to detect radar signals, as it is able to track changes in noise levels. The spectrum of the acoustic signal is analyzed and the numerical values of the parameters necessary for tuning the algorithm are determined. A comparison was made between three different approaches to assessing background noise levels and calculating detection thresholds, including cell averaging-, smallest-of cell averaging-, and order statistics- constant false alarm rate. The parameters of the algorithm have been determined, which allow us to build a threshold that provides tracking of noise level changes and detection of both strong and weak harmonics in the spectrum of an acoustic signal.

The experimental results show that the proposed method allows detecting 45% more harmonics compared to the consecutive mean excision algorithm and 26% more harmonics compared to the moving average algorithm. The results obtained can be used to improve existing and develop new devices and systems for acoustic monitoring of airspace.

Keywords: *aerial attack weapon; acoustic signal; CFAR algorithm; frequency spectrum; harmonic component; threshold.*