УДК 621.396.67

М.В. Бугайов[1], Ю.О. Гордієнко[1], О.І. Солонець[2], І.А. Солопій[1]

[1] *Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, Житомир*
[2] *Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

ВПЛИВ ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ-ШУМ НА СТАТИСТИЧНИЙ ПОКАЗНИК ЯКОСТІ АКУСТИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ПОРТРЕТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

В статті розглянуто вплив відношення сигнал-шум на значення статистичного показника якості спектральних оцінок акустичних випромінювань безпілотних літальних апаратів різних типів. Наведено межі значень даного показника для граничних випадків та запропоновано підхід до статистичної обробки сигналів з його використанням.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, акустичний спектральний портрет, статистичний показник якості.*

Вступ

Постановка проблеми. Бойові можливості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) постійно зростають. Відповідно розширюється перелік загроз, які вони можуть створювати [1–3]. У зв'язку з цим актуальним є питання розробки систем протидії БПЛА. Створення систем протидії БПЛА необхідне, перш за все, для попередження деструктивних впливів на важливі державні об'єкти. Про нагальну необхідність боротьби з БПЛА свідчить досвід проведення антитерористичної операції на сході держави.

Однією зі складових протидії БПЛА є їх своєчасне та надійне виявлення. У провідних країнах світу задачу виявлення БПЛА успішно вирішують із використанням мультисенсорних систем, причому однією з їх складових є акустичний канал [1–3]. Для підвищення надійності виявлення БПЛА необхідним є врахування особливостей їх акустичних випромінювань, характеристик можливих перешкод та шумів. Необхідно також застосовувати такі методи та алгоритми обробки, якісні характеристики яких є стійкими по відношенню до невідомих параметрів та властивостей сигналів та володіють високою перешкодостійкістю порівняно з енергетичним приймачем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій, присвячених виявленню БПЛА за їх акустичними випромінюваннями [4–7], показує, що невирішеним залишається питання обробки акустичних сигналів БПЛА з апріорно невідомою формою на фоні вузько- та широкосмугових перешкод (завад) та шуму з невідомими параметрами, а також розділення сигналів від кількох БПЛА. На сьогоднішній день це є не лише один з найважливіших напрямків досліджень теорії виявлення сигналів, але й область активних розробок для покращення показників якості виявлення.

Особливістю акустичних випромінювань БПЛА є те, що вони мають гармонічну структуру (багаточастотні) [8–9], займають відносно широку смугу частот, а їх виявлення в переважній більшості випадків проводиться при низьких значеннях відношення сигнал/шум (ВСШ). Оскільки при виявленні джерел акустичних збурень форма сигналу є невідомою, то визначення робочого значення ВСШ і проведення порогової обробки виступає досить складним завданням, вирішення якого забезпечить досягнення високих показників якості виявлення.

Розрахунок порогу виявлення сигналів потребує адаптації до інтенсивності шуму в смузі частот, що аналізується. В якості характеристики інтенсивності шуму при цьому використовують середнє значення шумових відліків. При точно відомому положенні на вісі частот ділянок, які містять лише шумові відліки, подібний підхід гарантує отримання ефективної оцінки величини порогу виявлення [10].

В статті пропонується інший підхід до визначення порогу, що ґрунтується на використанні статистичного показника якості (СПЯ). Значення даного показника є функцією від ВСШ і може бути використано при пороговій обробці акустичних випромінювань БПЛА.

Формулювання мети статті. Метою статті є дослідження впливу ВСШ на значення СПЯ акустичного спектрального портрету БПЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Визначення СПЯ та меж його значень

На коротких інтервалах часу (десятки мс) акустичні випромінювання БПЛА можна вважати стаціонарними і для їх обробки (виявлення) використовувати методи спектрального аналізу. На даний час відома значна кількість методів спектрального оцінювання [11–12]. Дана робота обмежується розглядом періодограми, що є квадратом модуля швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), відноситься до непараметричних методів і досить широко використовується на практиці для виявлення гармонічних сигналів [13].

© Бугайов М.В., Гордієнко Ю.О., Солонець О.І., Солопій І.А., 2017

Вираз для обчислення відліків спектральної щільності потужності (СЩП) $P_{xx}[k]$ вхідного сигналу $x[n]$ при довжині прямокутного вікна N відліків має вигляд [13]:

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

В якості показників ефективності методів спектрального аналізу будемо використовувати роздільну здатність за частотою (ширину спектральних ліній) та здатність виділяти гармонічні складові сигналу в шумові, тобто не створювати шумових викидів, які за амплітудою перевищують сигнальні. Об'єднаємо ці показники в один – СПЯ, який можна визначати як відношення дисперсії оцінки СЩП до квадрату середнього значення цієї оцінки [14]:

$$Q = \frac{\sigma^2_{P_{xx}}}{m^2_{P_{xx}}}. \quad (2)$$

Для визначення верхньої та нижньої меж значень для Q розглянуто два граничних випадки:

а) вхідний сигнал являє собою гармонічне коливання з кількістю періодів аналізу, що кратна частоті дискретизації (це виключить ефект витікання ШПФ), який на частоті сигналу дасть значення СЩП рівне 1 і нульове на решті частот;

б) вхідний сигнал являє собою ідеальний білий шум (БШ), що має однакову СЩП на всіх частотах, яка становить N^{-1}.

Для першого випадку значення СПЯ може бути розраховане як $Q = (N^2 - 1)N^{-1}$ або при великих N – $Q \approx N$. Для другого випадку $Q = (N-1)N^{-1}$ або при великих N – $Q \approx 1$. Оскільки ідеальний БШ є математичною абстракцією, то значення СПЯ при розрахунках періодограми реальних сигналів завжди буде знаходитися в межах $1 < Q \le N$.

Якщо ж спектральний портрет матиме K ненульових спектральних відліків (гармонік) з однаковими амплітудами, то СПЯ матиме значення $Q \approx NK^{-1}$. При неоднаковості амплітуд спектральних складових його значення буде збільшуватися і наближатиметься до N при прямуванні амплітуд усіх гармонік, крім однієї, до нуля.

Даний показник безпосередньо пов'язаний зі статистичною стійкістю спектральної оцінки і концептуально подібний до коефіцієнта розбіжності Г. Тейла, який використовують при оцінюванні та порівнянні точності прогнозів [15].

2. Вплив ВСШ на значення СПЯ гармонічного коливання

Дослідження впливу ВСШ $q^2_{вх}$ на значення СПЯ проведено шляхом математичного моделювання в середовищі Matlab. Шум генерувався за допомогою функції *randn*, значення відліків якого є стандартними нормально розподіленими величинами.

В якості шуму доцільно було б обрати найгірший варіант − БШ, тобто шум, що має однакову СЩП на всіх частотах. Проте в природі і техніці такий БШ не зустрічається, проте під категорію БШ підпадають будь-які шуми, спектральна щільність яких однакова (або слабо відрізняється) в діапазоні частот, що розглядається. Білим випадковим процесом (послідовністю вибірок) прийнято називати процес з нульовим математичним очікуванням, що має автокореляційну функцію (АКФ), яка є дельта-функцією Дірака [16].

На рис. 1 (а, б) наведено СЩП та АКФ, відповідно, сформованого за допомогою функції *randn* шуму. Як слідує з рисунку, спектр даного шуму відрізняється від рівномірного, проте наближається до нього, а його АКФ подібна до дельта-функції. Тому в першому наближенні шум, сформований за допомогою функції *randn*, можна віднести до категорії білих.

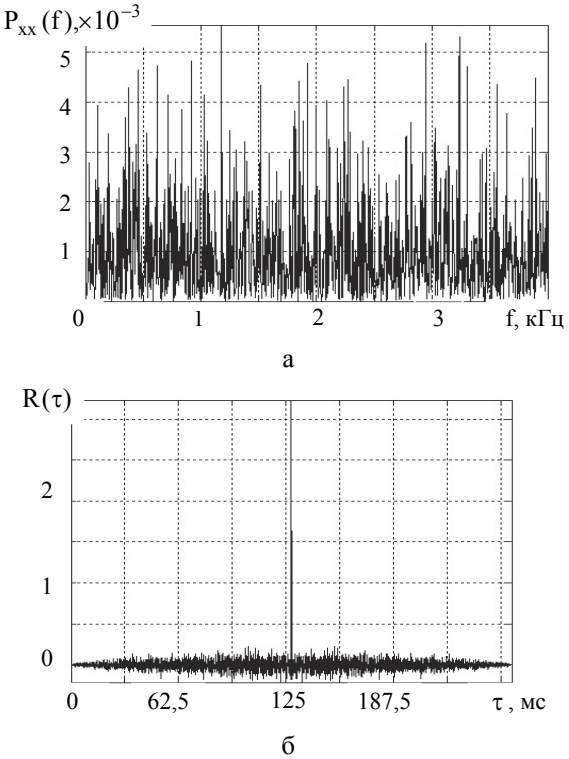

Рис. 1. СЩП (а) та АКФ (б) шуму, сформованого за допомогою функції *randn*, N = 2048

В якості сигналу використовується гармонічне коливання з частотою дискретизації $f_s = 8$ кГц. Щоб уникнути ефекту витікання ШПФ, частота даного коливання f_0 повинна співпадати з частотою одного з його бінів – $f_0 = mf_sN^{-1}$, де $m = 1, 2, ..., 0,5N$. В такому разі вся енергія буде зосереджена на частоті, що відповідає біну з номером m, а значення його СЩП становитиме 1. Якщо ж значення частоти вхідного коливання не співпадатиме з частотою біна,

то буде проявлятися ефект витікання, який полягає в тому, що енергія сигналу буде розподілена між кількома сусідніми бінами. Це є негативним явищем, яке проявляється в переважній більшості випадків під час аналізу реальних сигналів і призводить до зменшення ВСШ. Найбільшим зниження ВСШ буде тоді, коли частота вхідного сигналу буде знаходитися точно посередині між значеннями бінів, тобто $m = p + 0,5$, де p − ціле і менше m (найгірший випадок витікання).

Рівень шуму для функції *randn* визначається довжиною ШПФ і при кожному збільшенні вдвічі N зменшується приблизно у 1,8 рази. При отриманні значення СПЯ близьким до 3, що відповідає шумові і не залежить від N, подальшу обробку розрахованої періодограми проводити недоцільно. При отриманні ж значення Q в межах від 3 до N можна проводити порогову обробку з подальшим аналізом спектральних відліків, які перевищили поріг.

На рис. 2 показано СЩП гармонічного коливання без витікання (а) та з найгіршим випадком витікання (б) при значенні ВСШ $q^2_{вх} = -10$ дБ. Як слідує з рисунку, негативний вплив витікання проявляється у зменшенні значення СЩП гармонічного коливання (приблизно у два рази), що призводить до зменшення ВСШ у спектральній області і, як наслідок, зменшення СПЯ.

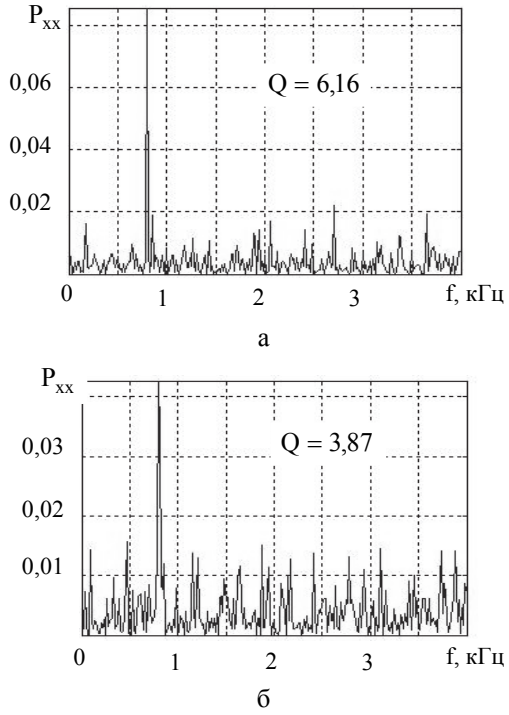

Рис. 2. СЩП гармонічного коливання без витікання (а) та з найгіршим випадком витікання (б)

На рис. 3 наведено залежності значення СПЯ від ВСШ для різних значень довжини ШПФ. Суцільними лініями показано залежності Q для гармонічного коливання без витікання і пунктирними – для найгіршого випадку витікання. При високих ВСШ (більше 20 дБ) і цілому m значення СПЯ досягає своєї верхньої межі і становить $Q \approx N$, а для $m = n + 0,5$ складає близько третини від цього значення − $Q \approx 0,33\,N$. Криві для інших ступенів витікання будуть знаходитися між суцільною та пунктирною лініями для відповідного N.

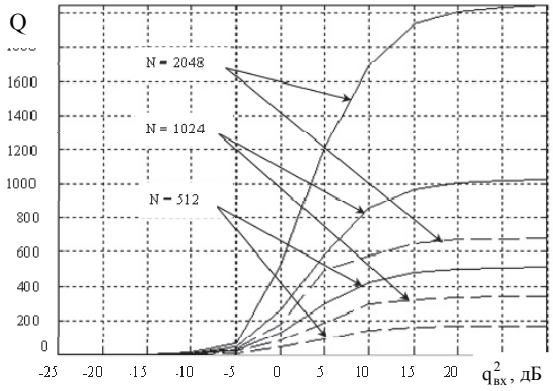

Рис. 3. Залежність СПЯ для гармонічного сигналу від ВСШ при різних значеннях довжини ШПФ

Для шуму, сформованого за допомогою функції *randn*, $Q \approx 3$. Дане значення можна вважати фізичною нижньою межею для СПЯ. Для шуму дощу $Q \approx 4 - 5$. Такі ж значення має СПЯ для вітру після фільтру високих частот, з нижньою частотою зрізу близько 100 Гц.

3. Вплив ВСШ на значення СПЯ акустичного портрету БПЛА

Аналогічно можна оцінити вплив ВСШ на значення СПЯ для спектральних портретів типових акустичних випромінювань БПЛА літакового типу з електричним (ЕД) та двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) і БПЛА мультироторного (МР) типу. На рис. 4 наведено криві, що відображають зміну значення СПЯ для різних типів БПЛА в залежності від ВСШ при довжині ШПФ N = 512.

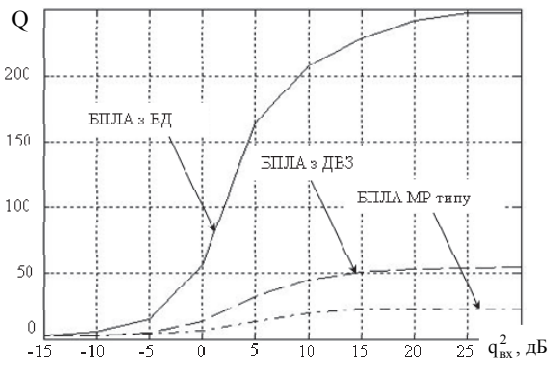

Рис. 4. Залежність СПЯ від ВСШ для акустичних випромінювань різних типів БПЛА

Характер їх поведінки подібний до поведінки кривих гармонічного сигналу (рис. 3). Також з рис. 4 слідує, що найбільші значення СПЯ мають БПЛА з ЕД, в акустичному випромінюванні яких зазвичай домінуючою є одна гармонічна складова. Значно нижчими вони будуть для БПЛА з ДВЗ і ще нижчими для БПЛА МР типу.

Як слідує з рис. 4, при зменшенні ВСШ значення СПЯ спектрального портрету БПЛА також зменшується. Це є наслідком збільшення потужностей викидів шуму в спектральній області. Тому очевидно, що при зменшенні Q значення порогу виявлення γ необхідно підвищувати. Значення γ можна було б зафіксувати для кожного N, стабілізувавши таким чином ймовірність хибної тривоги. Але при такому підході у разі багатокомпонентного сигналу зі значним динамічним діапазоном і при високих ВСШ складові з малими амплітудами можуть не перевищити поріг і бути втраченими. Тобто значення порогу при високих Q може бути і нижчим за рівень шуму для функції *randn*, але не нижчим за рівень ідеального БШ. Таким чином, нижня можлива межа для значення порогу складає $\gamma \approx N^{-1}$.

4. Алгоритм обробки акустичних сигналів

Враховуючи зазначене вище, алгоритм обробки сигналів у спектральній області в загальному вигляді наведено на рис. 5.

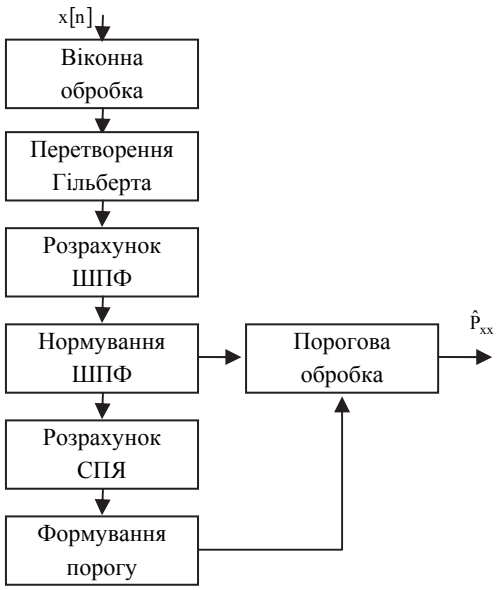

Рис. 5. Алгоритм обробки сигналу

Вхідними даними для даного алгоритму є вибірки сигналу $x[n]$. Вибір віконної функції завжди являє собою компромісне рішення між шириною основної пелюстки, рівнем бічних пелюсток, швидкістю їх спадання та коефіцієнтом енергетичних втрат [17]. Тому вибір вікна проводиться, виходячи з тих задач, що стоять перед розробником системи обробки сигналів. Перетворення Гільберта забезпечує перетворення дійсного вхідного сигналу в аналітичну форму, в результаті чого в спектрі сигналу будуть відсутні спектральні відліки з від'ємними частотами. Крім того, для дійсного сигналу значення СПЯ будуть вдвічі меншими, ніж для аналітичного. Значення порогу можна сформувати з використанням СПЯ. В загальному випадку значення γ можна записати у вигляді гіперболічної функції від Q:

$$\gamma = f(Q) = bQ^{-1} + c, \qquad (3)$$

де b та c – деякі числа, що залежать від типу сигналу, який аналізується, і можуть бути визначені в процесі навчання системи обробки.

Після виконання вказаних перетворень та порогової обробки формується масив спектральних відліків, які перевищили поріг $\hat{P}_{xx}$.

Даний підхід до формування порогу відрізняється від класичного, коли його значення визначається рівнем і характером шуму і встановлюється до того моменту, як буде прийнято сигнал, проте не вимагає знання розподілів щільності ймовірностей відліків спектрального портрету ні шуму, ні можливого сигналу.

Висновки

Проведений у роботі аналіз впливу ВСШ на значення СПЯ спектрального портрету показав, що при спектральній обробці будь-якого сигналу зниження ВСШ завжди призводить до зменшення СПЯ. Використовуючи даний показник, що враховує лише структурні особливості сигналів, можна проводити порогову обробку акустичних випромінювань БПЛА в частотній області без вимірювання рівня фонового шуму.

Перспективи подальших досліджень полягають у визначенні залежності значення СПЯ спектрального портрету для інших методів спектрального оцінювання, а також впливу на нього виду віконної функції при обчисленні періодограми.

Список літератури

1. Соколовський В.В. Проблемні питання та перспективні напрямки боротьби з малорозмірними надлегкими БЛА у внутрішньому збройному конфлікті / В.В. Соколовський, Ю.В. Самсонов // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 32-35.

2. Проблеми застосування угруповань малих безпілотних літальних апаратів мультикоптерного типу для вирішення військових завдань / Ю.Г. Даник, І.В. Пулеко, П.П. Топольницький, С.В. Чуб // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ НАУ, 2013. – Вип. 8. – С. 98-105.

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

ник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – № 71(4). − С. 71-80.

4. Sadasivan S. Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S. Ravi Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol. 51, № 3. – P. 279-283.

5. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE, 2004. – Vol. 17. – P. 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. Зінченко С.А. Пасивна акустична система виявлення безпілотних літальних апаратів / С.А. Зінченко, В.Ф. Свіжевський // Інформаційна безпека України: тез. доп. Наук.-техн. конф. КНУ 12–13 березня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 74-75.

8. Даник Ю.Г. Частотно-часовий аналіз акустичного випромінювання тактичних безпілотних літальних апаратів / Ю.Г. Даник, М.В. Бугайов // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: зб. наук. пр. – Житомир: ЖВІ, 2015. – Вип. 12. – С. 5-17.

9. Гордієнко Ю.О. Особливості акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів / Ю.О. Гордієнко, М.В. Бугайов, О.І. Солонець, І.А. Солопій // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 1 (22). – С. 32-35.

10. Токарев А.Б. Применение СМОШ-статистик для расчета порога панорамного обнаружения сигналов / А.Б. Токарев // Радиотехника. – Воронеж, 2012. – Вып. 2. – С. 53-59.

11. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

12. Kundu D. Statistical signal processing: frequency estimation / D. Kundu, S. Nandi. – Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London, 2012. – 141 p.

13. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс; пер. с англ. под ред. А.А. Бритова. – [2-е изд.]. – М.: ООО Бином-Пресс, 2006. – 656 с.

14. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Учебно-методический материал по программе повышения квалификации "Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации" / В.И. Кривошеев. − Нижний Новгород, 2006. − 117 с.

15. Єріна А. М. Статистичне моделювання та прогнозування : навч. посіб. / А.М. Єріна. − К.: КНЕУ, 2001. – С. 11.

16. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

17. Prabhu K.M.M. Window functions and their applications in signal processing / K.M.M. Prabhu. – Taylor & Francis Group, LLC, 2014. – 406 p.

Надійшла до редколегії 11.07.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ВЛИЯНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ НА СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА АКУСТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ПОРТРЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Н.В. Бугаёв, Ю.А. Гордиенко, А.И. Солонец, И.А. Солопий

В статье рассмотрено влияние отношения сигнал-шум на значение статистического показателя качества спектральных оценок акустических излучений беспилотных летательных аппаратов различных типов. Приведены пределы значений данного показателя для граничных случаев и предложен подход к статистической обработке сигналов с его использованием.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, акустический спектральный портрет, статистический показатель качества.*

INFLUENCE OF SIGNAL-TO-NOISE RATIO ON STATISTICAL INDEX OF QUALITY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE'S ACOUSTIC SPECTRAL SIGNATURE

N. Bougaiov, Y. Gordienko, A. Solonets, I. Solopij

In this paper influence of signal-to-noise ratio on statistical index of quality of unmanned aerial vehicle's acoustic emissions spectral estimates is studied. Limits of this index for marginal cases are shown. Method of statistical signal processing using this index is proposed.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, acoustic spectral signature, statistical index of quality.*