

**INFORMATION METHODS OF RADIO ENGINEERING,  
SIGNAL PROCESSING**  
**ІНФОРМАЦІЙНІ МЕТОДИ РАДІОТЕХНІКИ, ОБРОБКА СИГНАЛІВ**

УДК 615.472.03

DOI:10.30837/rt.2023.4.215.11

*В.І. ЛЕОНІДОВ, канд. техн. наук, В.В. СЕМЕНЕЦЬ, д-р техн. наук,  
О.В. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук*

**АНАЛІЗ ЧАСТОТНО-ЧАСОВОЇ СТРУКТУРИ АКУСТИЧНИХ ШУМІВ  
БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В СЕРЕДОВИЩІ STM32 CubeIDE**

**Вступ**

Область застосування сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) безперервно розширюється. Дослідження акустичного шуму, створюваного БПЛА, почалося практично одночасно з їх створенням. Стимулом до проведення цих досліджень служить область практичного застосування БПЛА [1 – 3].

Шум БПЛА вивчають при їх використанні в біології для спостереження за поведінкою тварин і комах у різних ситуаціях, так як при цьому шум дронів може впливати на досліджувані види фауни [4, 5]. Схожі явища виникають при використанні дронів у сільському господарстві та в проблемах екології [6, 7].

Крім того, БПЛА можуть використовуватися для несанкціонованого моніторингу різних об'єктів [8, 9]. У зв'язку з цим виникає також завдання розробки правил своєчасного виявлення БПЛА.

Використання відомих методів виявлення повітряних цілей для виявлення БПЛА має ряд особливостей.

Для радіолокаційних засобів виявлення, що працюють у сантиметровому та міліметровому діапазонах електромагнітних хвиль, БПЛА є малопомітними цілями, тому що для їх виготовлення, як правило, використовуються радіопрозорі матеріали і, отже, ці об'єкти мають малу ефективну поверхню розсіювання (ЕПР).

Виявлення БПЛА у діапазоні видимого світла за допомогою відеокамер обмежено денним часом доби або потребує додаткового підсвічування за допомогою прожекторів. Цей метод може бути використаний й у умовах виникнення туману.

У більшості випадків БПЛА є дуже слабкими джерелами інфрачервоного випромінювання, тому їх виявлення за допомогою засобів пасивної локації в інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль також малоперспективне.

Виявлення цих об'єктів за сигналами їх зв'язку з командним пунктом може бути можливим тільки в тому випадку, якщо в системі не використовується повністю автономний режим виконання польотного завдання з одноразовим режимом передачі отриманих даних в кінці польоту.

Одним із напрямків вирішення завдання виявлення БПЛА може бути реєстрація акустичного сигналу (шуму), створюваного їх силовими установками. Однак при використанні цього методу слід враховувати низку особливостей.

Зовнішні по відношенню до БПЛА акустичні поля, які створюються турбулентністю атмосфери і різними технічними засобами, відносяться до нестаціонарних випадкових процесів і за потужністю можуть значно перевищувати потужність акустичного сигналу, що генерується БПЛА. У цьому часова амплітудно-частотна структура сигналів БПЛА не є заданою априорі (на відміну від радіолокації).

Виявлення акустичних сигналів БПЛА має здійснюватися в безперервному режимі методом пасивної акустичної локації. У цьому випадку завдання виявлення нестаціонарного

випадкового процесу, до яких відноситься сигнал БПЛА, на тлі нестационарного фонового шуму, стає в загальному випадку невизначеним.

У зв'язку з наведеними особливостями для вирішення задачі виявлення БПЛА необхідно враховувати два положення:

- енергетичне виявлення цілі можливе лише за наявності інформація про потужності фонового шуму в реальному часі;
- звести задачу виявлення цілі до виявлення відомого сигналу можливо лише за відомої часової амплітудно-частотної структури акустичного сигналу БПЛА.

У даному разі поняття «фоновий шум» означає композицію будь-яких джерел акустичних сигналів крім шуму дронів. У загальному випадку фоновий шум є процесом нестационарним, тому використання апріорних даних про рівень фонового шуму, отриманих при гарантованій відсутності шуму БПЛА, для вирішення завдання виявлення в реальному часі призводить до невизначеності, оскільки розрахований за апріорними даними пороговий рівень сигналу може бути перевищений будь-яким випадковим джерелом, що включилося в даний момент.

Отже, у разі рішення завдання виявлення сигналів БПЛА зводиться до розв'язання задачі розпізнавання сигналів.

Мета роботи – виявлення інформативних ознак тимчасової амплітудно-частотної структури сигналів БПЛА (дронів) за допомогою середовища STM32CubeIDE, які характеризуються стійкою повторюваністю від досліду до досліду, і, отже, можуть бути використані для надійного розпізнавання об'єктів БПЛА.

### **Основні положення**

Вочевидь, що при пілотуванні дрона діапазон девіації частоти кожної групи двигун–пропелер є близькі за значенням величини, різниця між якими при необмеженому збільшенні часу спостереження прагне до нуля. Однак у межах кожного малого фіксованого інтервалу часу різниця частот цих сигналів є випадкова величина, яка залежить від заданого режиму руху і турбулентного процесу в атмосфері.

Отже, модель акустичного сигналу дрону можна представити як суперпозицію кількох (за кількістю двигунів і повітряних гвинтів) частотних складових – гармонік, кожна з яких модульована за частотою сигналом управління, що забезпечує підтримку заданого режиму руху в умовах випадкових (турбулентних) атмосферних збурень, що впливають на дрон.

Можна припустити існування ще однієї складової акустичного сигналу дрону. Це комбінаційні частоти, що виникають в результаті нелінійних процесів розповсюдження вібрацій уздовж конструкції дрону, які порушуються системою двигун–пропелер. Інтенсивність цієї складової визначається резонансними властивостями конструкції БПЛА, а частота – сумою та різницею частот, що генеруються встановленими системами двигун–пропелер.

У роботах [10 – 12] розглянуто один з можливих підходів до аналізу комбінаційних сигналів, при якому використовується аналіз залежностей зміни періодів, тобто аналіз на малих інтервалах часу, при яких тривалість періоду гармонік не встигає істотно змінитися. У цьому випадку сигнал, який аналізується, можна представити як адитивну суміш низки дискретних гармонік.

Розподіл за тривалістю періоду характеризує діапазон зміни режимів роботи пристрою загалом і, отже, дає «портрети», індивідуальні для кожного з джерел шуму.

Отже, для виявлення інформативних ознак акустичних сигналів дрону доцільно зіставити акустичний сигнал дрону і фоновий акустичний шум, що існує в середовищі мегаполісу.

Проведені експериментальні дослідження дають необхідні вихідні дані для розробки вимірального пристрою та алгоритму його функціонування.

У відповідність до розробленого алгоритму програмна частина пристрою працює у режимі моніторингу. Після старту програми відбувається ініціалізація портів вводу-виводу інформації, підключення стандартних бібліотек, які забезпечують роботу ЖК індикатору та інтерфейсу USB [13 – 18]. Аналогові входи мікроконтролера підключені до схеми виміру. Аналогові сигнали перетворюються в цифрові за допомогою АЦП. Значення змінних виводяться на ЖК індикатор і відправляються або в комп'ютер, або флешку для обробки і прий-

няття рішення. В процесі роботи буде задіяно інтерфейс SPI1. Включимо SPI1 в режим Full-Duplex Master (рис. 1).

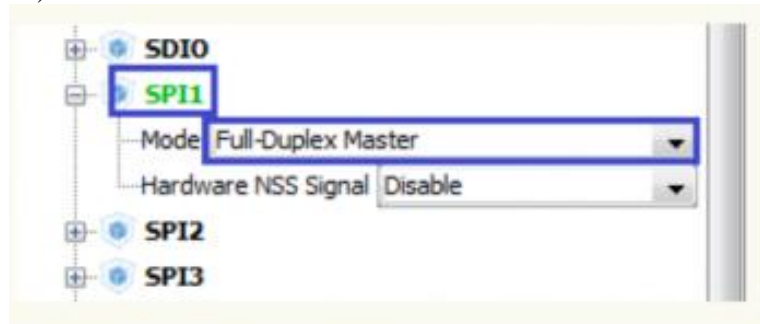


Рис.1. Підключення SPI1

Ніжки мікроконтролера для інтерфейсу SPI залишимо за замовчуванням (рис. 2).

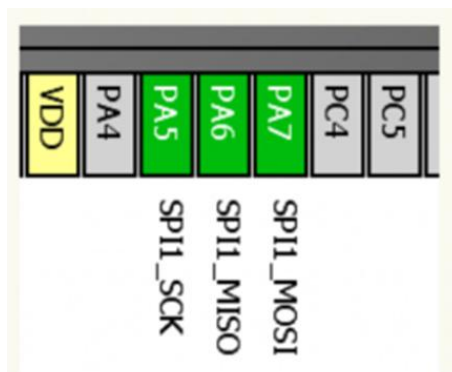


Рис. 2. Контакти мікроконтролера для SPI

Включимо ще три ніжки. Одну – для вибору чіпа (CS), інші дві – для виявлення переривань (рис. 3). Можливо, останні нам не знадобляться, але для порядку включимо, щоб помилково їх не задіяти згодом на щось ще.

Також увімкнемо на вихід ніжки портів для керування різнокольоровими світлодіодами на платі (рис. 4).

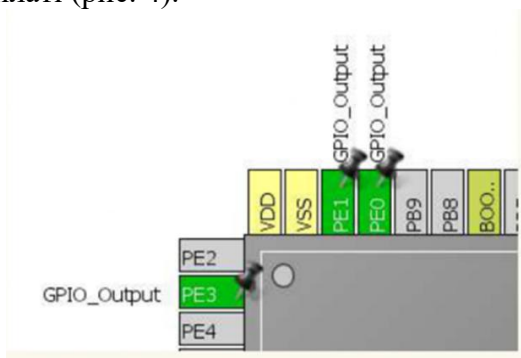


Рис. 3. Контакти мікроконтролера для чіпа

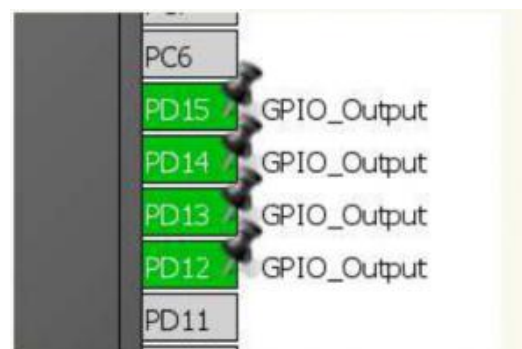


Рис. 4. Контакти мікроконтролера для керування різнокольоровими світлодіодами на платі

Розроблено наступні функції для обробки даних:

`void Zvyk_Ini(void)` – функція ініціалізації;

`void Zvyk_ReadAcc(void)` – функція читання даних;

`static void Error (void)` – функція обробки помилок;

`uint8_t Zvyk IO_Read(uint16_t DeviceAddr, uint8_t RegisterAddr)` – функція читання даних з регістрів сенсора;

void Zvyk \_IO\_Write(uint16\_t DeviceAddr, uint8\_t RegisterAddr, uint8\_t Value) – функція запису даних в регістри сенсора;

uint8\_t Zvyk \_ReadID(void) – функція читання ID адреси;

void Zvyk \_AccFilterConfig(uint8\_t FilterStruct) – функція фільтрації даних ;

void Zvyk Init(uint16\_t InitStruct) – функція ініціалізації інтерфейсу;

void Zvyk \_GetXYZ(int16\_t\* pData) – функція обробки вихідних даних.

Сучасні мікроконтролери мають високу частоту ядра, що формується із значно меншої частоти опорного генератора шляхом множення опорної частоти на фіксований коефіцієнт. У мікроконтролері STM32F407VG максимальна частота ядра до 168 МГц. У якості опорного генератора може бути використаний зовнішній кварцовий резонатор HSE або вбудований RC – HIS. Функціональна організація системи тактування STM32F407VG наведена на рис. 5.

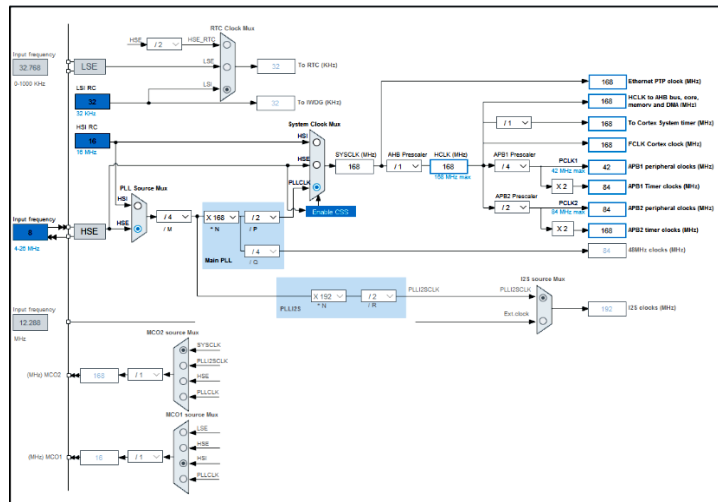


Рис. 5. Система тактування мікроконтролера STM32F407VG

Зовнішній кварцовий резонатор HSE може мати частоту від 4 до 26 МГц. Він має високу стабільність. Його відносна нестабільність частоти  $2 \cdot 10^{-6}$ , що при стандартному значенні частоти кварцового резонатора 8 МГц складає  $\pm 16$  Гц. Внутрішній HIS генератор має частоту 16 МГц та дуже низьку стабільність. Його частота може змінюватись в межах від -2 % до +2,5% в температурному діапазоні від -40 до +85°C. В більшості інтерфейсів передавання даних (USB, USART й т.і.) це призводить до виникнення помилок при передаванні інформації, що є недопустимим. Також виникають помилки при рахуванні часу за допомогою таймерів. Тому, практично в усіх електронних пристроях використовуються зовнішні кварцові резонатори.

Для підключення у середовищі STM32CubeIDE зовнішнього кварцового резонатора відкриваємо на вкладці Pinout&Configuration в розділі System Core підрозділ RCC та обираємо High Speed Clock (HSE) → Crystal/Ceramic Resonator (рис. 6).

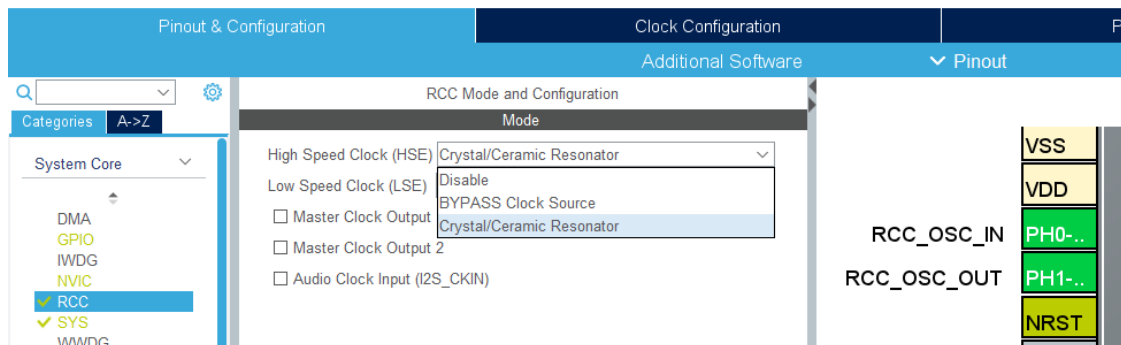


Рис. 6. Налаштування підключення кварцового резонатора до HSE

Після цього автоматично виводи мікроконтролера РН0, РН1 виділяються для підключення кварцового резонатора.

### Результати обробки та аналізу даних експериментальних спостережень

Натурні дослідження, проведені авторами, дозволили отримати великий експериментальний матеріал акустичних сигналів БПЛА.

На рис. 7, 8 наведено приклади результатів модельно-кореляційної обробки сигналів БПЛА та фонового шуму, отримані у вигляді тривимірної модельно-кореляційної структури періодів акустичного сигналу. Обробка виконана за методикою, наведеною в [10 – 12].

Завданням аналізу сигналів є перевірка гіпотези, яка полягає у тому, що розробка системи інформативних ознак на основі часового аналізу дозволить створити надійну систему розпізнавання сигналів БПЛА.

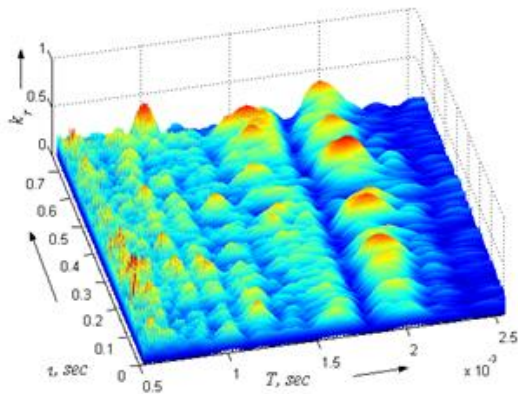


Рис. 7. Модельно-кореляційна структура

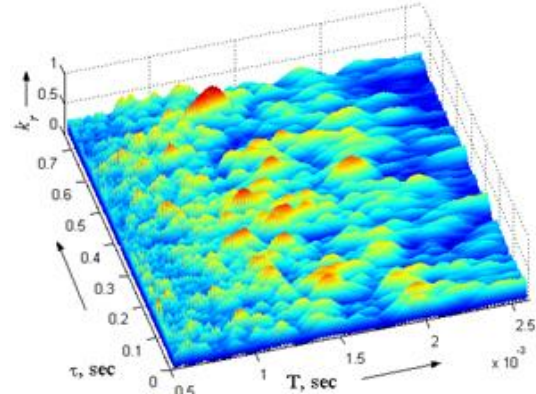


Рис. 8. Модельно-кореляційна структура фонового шуму

Тоді мета обробки полягає у приведенні вибірок сигналів до виду, зручному для дослідження флуктуації періоду акустичного сигналу БПЛА на малих інтервалах часу. Виходячи з поставленої мети, методика обробки акустичних шумоподібних сигналів полягає в записі вибірки  $S_v$  акустичного сигналу БПЛА тривалістю  $t_v$  в пам'ять мікроконтролеру, а потім у послідовному виявленні присутності в досліджуваній вибірці коротких фрагментів синусоїдального сигналу:

$$S_{ai} = \sin\left(\frac{x \cdot 2\pi}{T_{ai}}\right),$$

де  $T_{ai}$  – період шуканої складової сигналу;  $t_{pi} = pT_{ai}$  – тривалість фрагменту;  $x = [0 : (p \cdot T_i)]$ ;  $p$  – ціле число періодів в моделі фрагменту сигналу;  $p = 10$  згідно з [11].

Потрібні фрагменти сигналу при вибраному періоді  $T_i$  виявляються шляхом розрахунку коефіцієнта кореляції  $k_r$  між моделлю  $S_{Mi}$  фрагменту сигналу  $S_{Mi} = \sin\left(\frac{x \cdot 2\pi}{T_{Mi}}\right)$  з встановленими періодом  $T_{Mi}$  і тривалістю  $t_{Mi} = t_{pi}$ , і фрагментом записаного сигналу  $S_{ai}(x)$ . Причому коефіцієнти кореляції обчислюються послідовно при зрушенні моделі  $S_{Mi}$  сигналу вздовж часової осі  $\tau$  на величину  $\Delta\tau$  при  $T_{Mi} = const$ . При цьому виконується умова:  $t_M \ll t_e$  – де тривалість моделі набагато менша за тривалість записаної вибірки. Операція розрахунку проводиться для кожного значення  $T_M$  із заздалегідь встановленого ряду дискретних значень  $T_M(i) = T_0 + i \cdot \Delta t$  при  $i = (1 \dots n)$ , де  $T_0 = 0,52 \cdot 10^{-3} s$  або еквівалент частоти  $F_s = [385 \dots 2000] Гц$  при  $\Delta t = 2,083 \cdot 10^{-5} s$  і  $n = 100$ . Отже, за одну операцію повного зсуву виявляється наявність однієї компоненти шуканої складової сигналу при одному із заданих

значень періоду моделі  $T_{Mi}$ , при цьому число операцій повного зсуву моделі вздовж вибірки сигналу дорівнює кількості заданих значень  $T_{Mi}$  періоду моделі (в даному випадку  $n = 100$ ).

В результаті отримуємо ряд залежностей  $k_{ri}(\tau, T_{Mi})$ , які організуються в матрицю  $(m \times n)$ . При цьому приймається умова, якщо  $k_r \geq k_{st}$  шуканий фрагмент присутній у сигналі БПЛА, при  $k_r < k_{st}$  приймається альтернативне рішення.

Члени матриці  $M_{kr}$  вздовж стовпців є коефіцієнти кореляції  $k_{ri}$ , отримані при одному із заданих значень періоду моделі  $T_{Mi}$  та розраховані в залежності від зсуву моделі вздовж осі часу вибірки.

Члени вздовж строк є значення коефіцієнтів кореляції, полученні при одной и той же величине сдвига модели вздовж осі времени выборки, то есть каждая строка есть зависимость коэффициента корреляции от периода модели при данном сдвиге.

Члени вздовж рядків є значення коефіцієнтів кореляції, отримані при одній і тій же величині зсуву моделі вздовж осі часу вибірки, тобто кожен рядок є залежність коефіцієнта кореляції від періоду моделі при даному зсуві.

Візуальний аналіз рис. 7 показує, що сигнал МАА на малих інтервалах часу  $t_M = 10T_M$  представлений рядом дискретних складових при  $T_M = [2; 1,5; 1,25; 1]ms$ . Видно також, що амплітуда цих складових істотно флукує.

Компоненти при  $T_M < 1ms$  слабо помітні як дискретні складові. Їх амплітуда істотно знижена по відношенню до складових при  $T_M = [2; 1,5]ms$ .

Як впливає з рис. 8, у структурі «період – час» сигналів фонового шуму повністю відсутня стійка повторюваність, тобто сигнали мають суто випадковий характер.

Для формалізації візуального аналізу на рис. 9 наведено залежності нормованого коефіцієнта кореляції в діапазоні періодів моделі  $T_M = [0,5 \dots 2,5] \cdot 10^{-3}c$  (еквівалентні частоти  $F_{se} = [400 \dots 2000]Гц$ ) в структурі сигналу дрону і фонового шуму. Ці залежності отримані шляхом усереднення значень матриці вздовж стовпчиків.

Залежність, представлена суцільною лінією, отримана з матриці сигналу БПЛА, дві інші (пунктир) отримані аналогічним розрахунком по двох вибірках одного запису шуму вулиць мегаполісу.

Як впливає з наведених графіків, у двох реалізаціях сигналу фонового шуму відсутні повторювані області гармонійних складових. Ці залежності характеризують суто випадковий характер спостережуваного процесу.

Залежність, отримана із сигналів БПЛА, дозволяє визначити число гармонік та діапазон флукуації їх періодів. Вигляд цієї залежності формалізує властивість структурованості періодів сигналу БПЛА. На цій залежності спостерігаються дві області, розділені глибокими мінімумами при періоді  $T_M = 1,3ms$  і  $T_M = 1,83ms$ , що свідчить про існування двох основних процесів генерації акустичного сигналу.

Полученная структура позволяет выдвинуть предположение о существовании корреляционной связи между строками полученной матрицы  $M_{kr}$  коэффициентов корреляции.

На рис. 10 наведено графіки залежностей коефіцієнтів кореляції між рядками матриці  $M_{kr}$ , причому розрахунок коефіцієнтів кореляції ведеться між початковим рядком і всіма наступними рядками, включаючи початковий рядок.

Номери початкових рядків встановлюються з ряду  $N_{0str} = [1, 100, 200, 300, 400, 500, 600]$ . Розмір  $N_{str\max} = 600$  вибрано з умови  $\Delta\tau_{N_{\max}} \geq 0,01s$ .

У результаті кожної ітерації  $N_{0str}$  маємо послідовність коефіцієнтів кореляції  $k_{rNi} = [k_{ri} \dots k_{rm}]^i$ , де  $i = N_i \dots m$ , де  $m$  – число рядків  $M_{kr}$ . Кожне значення залежностей на рис. 10 отримано шляхом усереднення розрахованих послідовностей  $k_{rNi} = [k_{ri} \dots k_{rm}]$ .

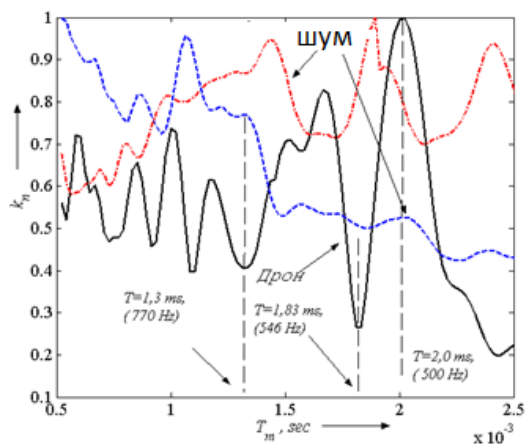
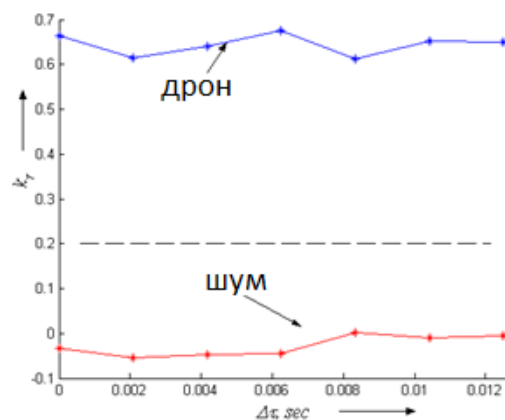


Рис. 9. Залежність нормованого коефіцієнту кореляції від періоду моделі в структурі сигналу дрону та фонового шуму вулиці



10. Залежність коефіцієнта кореляції БПЛА та фонового шуму

На рис. 10 наведено дві залежності. Перша отримана із сигналів БПЛА (позначено дрон), друга – із сигналів фонового шуму вулиці мегаполісу (позначено шум).

З отриманого результату випливає, що залежності на рис. 10 не перетинаються, між їх значеннями є суттєва та стійка відмінність. Отже, отриманий результат дозволяє запровадити ознаку як умови:

$$H = 1 \quad \text{при} \quad k_r > k_{cl}$$

$$H = 0 \quad \text{при} \quad k_r < k_{cl}$$

де  $H$  – подія, що визначає приналежність аналізованого сигналу, значення "1" – означає, що подія  $H$  полягає у правильному виявленні сигналу БПЛА, значення "0" – означає, що подія  $H$  полягає у виявленні сигналу фонового шуму,  $k_{cl}$  – граничне значення ознаки, в даному випадку можна прийняти  $k_{cl} = 0,3$ .

## Висновки

Основним результатом є обґрунтування доцільності використання аналізу «час – період» на малих інтервалах часу. Показано, що цей підхід дозволяє отримати інформативну ознаку для розпізнавання акустичних сигналів БПЛА на тлі зовнішніх шумів.

Сформульовано постановку завдання виявлення БПЛА щодо реєстрації та аналізу акустичних сигналів за допомогою середовища STM32CubeIDE, які генеруються БПЛА в процесі польоту, визначено фактори, що впливають на часову структуру флуктуацій періоду сигналів БПЛА.

## Список літератури:

1. Kloet N. et al. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems // International Journal of Micro Air Vehicles. 2017. 9(1). P.3–14.
2. Stimpson A. et al. Small UAV Noise Analysis. Humans and Autonomy Laboratory, Duke University, Durham, NC, USA. 2017. April 26, 12 pp. Available at [https://hal.pratt.duke.edu/sites/hal.pratt.duke.edu/files/u24/Small\\_UAV\\_Noise\\_Analysis\\_rqi.pdf](https://hal.pratt.duke.edu/sites/hal.pratt.duke.edu/files/u24/Small_UAV_Noise_Analysis_rqi.pdf).

3. Leslie A. et al. Broadband noise reduction on a mini-UAV propeller // 14th AIAA/CEAS aeroacoustic conference, Geelong, Victoria, Australia, 2008. Available at <https://www.semanticscholar.org/paper/Broadband-Noise-reduction-from-a-mini-UAV-propeller-Auld-Leslie/aa8f1514d96bd711bea00880afdb8050800037bc>.
4. Brown J. What Is A Drone: Main Features and Applications of Today's Drones. Available at <https://www.mydronelab.com/blog/what-is-a-drone.html>.
5. King E., et al. Bee threat elicits alarm call in African elephants // PLoS One. 2010. vol. 5, no. 4. P. e10346. Available at <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0010346>
6. Anderson K., Gaston K. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // Frontiers in Ecology and the Environment. 2013. vol. 11, no. 3. P. 138146.
7. Feight J. (2017). Characterization of a Multi-Rotor SUAS as a First Step Towards Detection and Identification via Acoust. Available at <https://shareok.org/handle/11244/300026>.
8. Карташов В. М. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков // Радиотехника. 2017. Вып. 191. С. 181–187.
9. Козерук С. О., Коржик О. В. Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням // Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. 2019. Iss. 76. P. 15–20.
10. Semenetz V.V., Leonidov V.I. Model-structural analysis of combination interference in the problems acoustic sounding of the atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 12. P. 1078-1095. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i12.60, pages 1087–1095, 2019.
11. Леонідов В.І., Семенець В.В. Особенности амплитудно-временной структуры помех в системах акустического зондирования атмосферы // Радиотехника: 2019. Вып. 197. С. 93–99.
12. Leonidov V.I. Analysis of the models and structure of echo signals of the atmospheric acoustic sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2014. 73(16). P. 1497–1502.
13. Семенець В.В., Леонідов В.І. Використання мікроконтролера stm32f407vg для дослідження амплітудно-частотних характеристик біологічних тканин // Радиотехніка: 2023. Вип. 214. С. 94–101.
14. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах : навч. посіб. / О. В. Зубков, І. В. Свид, О. В. Воргуль, В. В. Семенець. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 144 с.
15. В.В. Семенець, В.І. Леонідов. Исследование амплитудно-частотных характеристик биологических тканей // Радиотехніка.зб. 2020. Вип. 203. С. 186–190.
16. В.В. Семенець, В.І. Леонідов. Аналіз частотно-часової структури акустичних шумів малих автоматичних аеросистем // Радиотехніка. 2020. Вип. 202. С. 147–152. DOI:10.30837/rt.2020.3.202.15.
17. Аврунін О.Г., Запорожець О.В., Носова Т.В., Семенець В.В // Микропроцессоры в информационно-измерительных системах : навч. посібник. Харків : ХНУРЕ, 2015. 180с. <http://openarchive.nure.ua/handle/document/5291>.
18. Основи реєстрації та аналізу біосигналів : навч. посіб. / О.Г. Аврунін, В.Г. Абакумов, З.Ю. Готра, С.М. Злепко, А.В. Кіпенський, С.В. Павлов, В. В. Семенець. Харків : ХНУРЕ, 2019. 400 с. <https://doi.org/10.30837/978-966-659-257-9>.

*Надійшла до редколегії 09.11.2023*

*Відомості про авторів:*

**Леонідов Володимир Іванович** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, с. н. с. кафедри біомедичної інженерії, Україна; e-mail: [volodymyr.leonidov@nure.ua](mailto:volodymyr.leonidov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5218-3177>

**Семенець Валерій Васильович** – д-р техн. наук, професор. Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри біомедичної інженерії, Україна; e-mail: [valery.semenets@nure.ua](mailto:valery.semenets@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-2143>

**Григор'єв Олександр Вікторович** – канд. техн. наук, доц., Харківський національний університет радіоелектроніки; Україна; e-mail: [oleksandr.hryhoryev@nure.ua](mailto:oleksandr.hryhoryev@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-7983>