

*В.И. ЛЕОНИДОВ, канд. техн. наук, В.В. СЕМЕНЕЦ, д-р техн. наук*

## **АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ МАЛЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ АЭРОСИСТЕМ**

### **Введение**

Область применения современных малых автоматических аэросистем (МАО) непрерывно расширяется. Исследование акустического шума, создаваемого МАО, началось практически одновременно с их созданием. Стимулом к проведению этих исследований служит область практического применения МАО [1 – 3].

Шум МАО изучают при их использовании в биологии для наблюдения за поведением животных и насекомых в различных ситуациях, так как при этом шум дронов может оказывать влияние на исследуемые виды фауны [4, 5]. Похожие явления возникают при использовании дронов в сельском хозяйстве и в проблемах экологии [6, 7].

Кроме того, МАО могут использоваться для несанкционированного мониторинга различных объектов [8, 9]. В связи с этим возникает также задача разработки правил своевременного обнаружения МАО.

Использование известных методов обнаружения воздушных целей для обнаружения МАО имеет ряд особенностей.

Для радиолокационных средств обнаружения, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах электромагнитных волн, МАО являются малозаметными целями, так как для их изготовления, как правило, используются радиопрозрачные материалы и, следовательно, эти объекты имеют малую эффективную поверхность рассеивания (ЭПР).

Обнаружение МАО в диапазоне видимого света с помощью видеокамер ограничено дневным временем суток или требует дополнительной подсветки с помощью прожекторов. Этот метод не может быть использован также и в условиях возникновения тумана.

В большинстве случаев МАО являются очень слабыми источниками инфракрасного излучения, поэтому их обнаружение с помощью средств пассивной локации в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн также является малоперспективным.

Обнаружение этих объектов по сигналам их связи с командным пунктом может оказаться возможным только в том случае, если в системе не используется полностью автономный режим выполнения полетного задания с однократным режимом передачи полученных данных в конце полета.

Одним из направлений решения задачи обнаружения МАО может быть регистрация акустического сигнала (шума), создаваемого их силовыми установками. Однако при использовании этого метода следует учитывать ряд особенностей.

Внешние по отношению к МАО акустические поля, которые создаются турбулентностью атмосферы и различными техническими средствами, относятся к нестационарным случайным процессам и по мощности могут значительно превышать мощность акустического сигнала, генерируемого МАО. При этом временная амплитудно-частотная структура сигналов МАО не является заданной априори (в отличие от радиолокации).

Обнаружение акустических сигналов МАО должно осуществляться в непрерывном режиме методом пассивной акустической локации. В этом случае задача обнаружения нестационарного случайного процесса, к которым относится сигнал МАО, на фоне нестационарного фонового шума становится в общем случае неопределенной.

В связи с приведенными особенностями для решения задачи обнаружения МАО необходимо учитывать два положения:

- энергетическое обнаружение цели возможно только при наличии информации о мощности только фонового шума в реальном времени;

- свести задачу обнаружения к обнаружению известного сигнала возможно только при известной временной амплитудно-частотной структуре акустического сигнала МАА.

В данном случае понятие «фоновый шум» означает композицию любых источников акустических сигналов за исключением шума дронов. В общем случае фоновый шум есть процесс нестационарный, поэтому использование априорных данных об уровне фонового шума, полученных при гарантированном отсутствии шума МАА, для решения задачи обнаружения в реальном времени приводит к неопределенности, так как рассчитанный по априорным данным пороговый уровень сигнала может быть превышен любым случайно включившимся источником.

Следовательно, в данном случае решение задачи обнаружения сигналов МАА сводится к решению задачи распознавания сигналов.

Цель работы – выявление информативных признаков временной амплитудно-частотной структуры сигналов МАА (дронов), которые характеризуются устойчивой повторяемостью от опыта к опыту, и, следовательно, могут быть использованы для надежного распознавания объектов МАА.

### **Основные положения**

Очевидно, что при пилотировании дрона диапазон девиации частоты каждой группы двигатель – пропеллер есть близкие по значению величины, различие между которыми при неограниченном увеличении времени наблюдения стремится к нулю. Однако в пределах каждого малого фиксированного интервала времени разность частот этих сигналов есть случайная величина, зависящая от заданного режима движения и турбулентного процесса в атмосфере.

Анализ известных работ показывает, что причиной, создающей особенности временной амплитудно-частотной характеристики поля акустических волн, генерируемых МАА, являются флуктуации тягового усилия каждой из двигательных установок в системе двигатель – пропеллер в общей группе двигательных установок устройства.

Следовательно, модель акустического сигнала дрона можно представить как суперпозицию нескольких (по числу двигателей и воздушных винтов) частотных составляющих – гармоник, каждая из которых модулирована по частоте сигналом управления, что обеспечивает поддержку заданного режима движения в условиях случайных (турбулентных) атмосферных возмущений, воздействующих на дрон.

Можно предположить существование еще одной составляющей акустического сигнала дрона. Это комбинационные частоты, возникающие в результате нелинейных процессов распространения вибраций вдоль конструкции дрона, которые возбуждаются работой систем двигатель – пропеллер. Интенсивность этой составляющей определяется резонансными свойствами конструкции МАА, а частота – суммой и разностью частот, генерируемых установленными системами двигатель – пропеллер.

В [10 – 12] рассмотрен один из возможных подходов к анализу комбинационных сигналов, при котором используется анализ зависимостей изменения периодов, то есть анализ на малых интервалах времени, при которых длительность периода гармоник не успевает существенно измениться. В этом случае сигнал, который анализируется, можно представить как аддитивную смесь ряда дискретных гармоник.

Распределение по длительностям периода характеризует диапазон изменения режимов работы устройства в целом и, таким образом, дает «портреты», индивидуальные для каждого из источников шума.

Следовательно, для выявления информативных признаков акустических сигналов дрона целесообразно сопоставить акустический сигнал дрона и фоновый акустический шум, существующий в среде мегаполиса.

## Результаты обработки и анализа данных экспериментальных наблюдений

Натурные исследования, проведенные авторами, позволили получить обширный экспериментальный материал по акустическим сигналам МАА.

На рис.1, 2 приведены примеры результатов модельно-корреляционной обработки сигналов МАА и фонового шума, полученные в виде трехмерной модельно-корреляционной структуры периодов акустического сигнала. Обработка выполнена по методике, приведенной в [10 – 12].

Задачей анализа сигналов является проверка гипотезы, состоящей в том, что разработка системы информативных признаков на основе временного анализа позволит создать более надежную систему распознавания сигналов МАА.

В связи с этим положением цель обработки состоит в приведении выборок сигналов к виду, удобному для исследования флуктуации периода акустического сигнала МАА на малых интервалах времени. Исходя из поставленной цели, методика обработки акустических шумоподобных сигналов состоит в записи выборки  $S_v$  акустического сигнала МАА длительностью  $t_v$ , последовательном выявлении присутствия в исследуемой выборке коротких фрагментов синусоидального сигнала:

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

где  $T_{ai}$  – период искомой составляющей сигнала,  $t_{pi} = pT_{ai}$  – длительность фрагмента,  $x = [0:(p \cdot T_i)]$ , где  $p$  – целое число периодов в модели фрагмента сигнала,  $p = 10$  согласно [11].

Искомые фрагменты сигнала при выбранном периоде  $T_i$  выявляются путем расчета коэффициента корреляции  $k_r$  между моделью

$S_{Mi}$  фрагмента сигнала  $S_{Mi} = \sin\left(\frac{x \cdot 2\pi}{T_{Mi}}\right)$ , с

установленным периодом  $T_{Mi}$  и длительностью  $t_{Mi} = t_{pi}$ , и фрагментом записанного сигнала  $S_{ai}(x)$ , причем коэффициенты корреляции вычисляются последовательно при сдвиге модели  $S_{Mi}$  сигнала вдоль временной оси  $\tau$  на величину  $\Delta\tau$  при  $T_{Mi} = const$ , при этом выполняется условие:  $t_M \ll t_e$  длительность модели много меньше длительности записанной выборки.

Операция расчета  $k_r$  производится для каждого значения  $T_M$  из заранее установленного

ряда дискретных значений  $T_M(i) = T_0 + i \cdot \Delta t$  при  $i = (1 \dots n)$ , где  $T_0 = 0,52 \cdot 10^{-3} s$  или эквивалент частоты  $F_s = [385 \dots 2000] Гц$  при  $\Delta t = 2,083 \cdot 10^{-5} s$  и  $n = 100$ . Следовательно, за одну

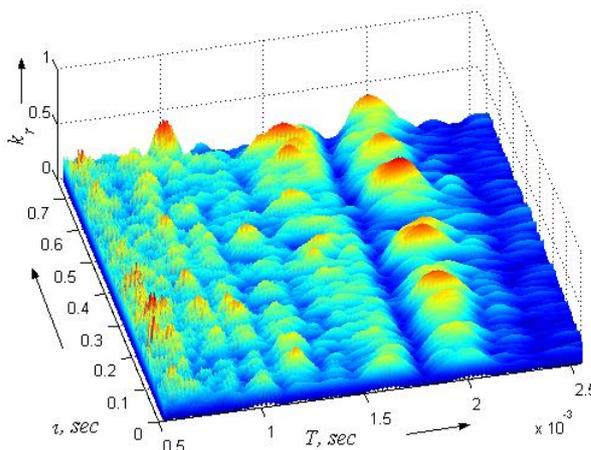


Рис. 1. Модельно-корреляционная структура периодов акустического сигнала МАА

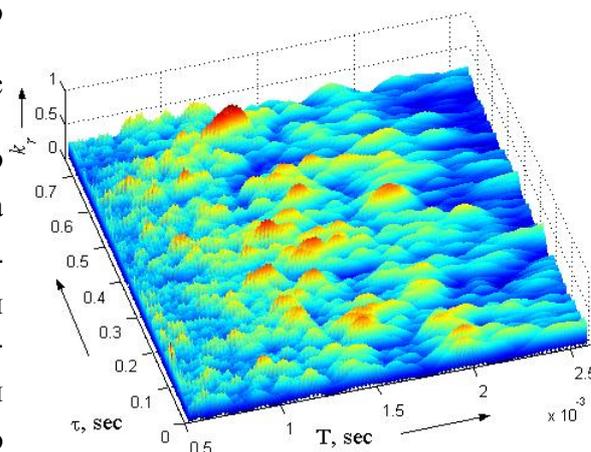


Рис. 2. Модельно-корреляционная структура периодов фонового шума

операцию полного сдвига выявляется наличие одной компоненты искомой составляющей сигнала при одном из заданных значений периода модели  $T_{Mi}$ , при этом число операций полного сдвига модели вдоль выборки сигнала равно числу заданных значений  $T_{Mi}$  периода модели (в данном случае  $n = 100$ ).

В результате получаем ряд зависимостей,  $k_{ri}(\tau, T_{Mi})$  которые организуются в  $(m \times n)$  матрицу  $M_{kr}$ . При этом принимается условие, если  $k_r \geq k_{st}$  – искомый фрагмент присутствует в сигнале МАА, при  $k_r < k_{st}$  принимается альтернативное решение.

Члены матрицы  $M_{kr}$  вдоль столбцов есть коэффициенты корреляции  $k_{ri}$ , полученные при одном из заданных значений периода модели  $T_{Mi}$  и рассчитанные в зависимости от сдвига модели вдоль оси времени выборки.

Члены вдоль строк есть значения коэффициентов корреляции, полученные при одной и той же величине сдвига модели вдоль оси времени выборки, то есть каждая строка есть зависимость коэффициента корреляции от периода модели при данном сдвиге.

Визуальный анализ рис. 1 показывает, что сигнал МАА на малых интервалах времени  $t_M = 10T_M$  представлен явно выделяющимся рядом дискретных составляющих при  $T_M = [2; 1,5; 1,25; 1]ms$ . Видно также, что амплитуда этих составляющих существенно флуктуирует.

Компоненты при  $T_M < 1ms$  слабо различимы как дискретные составляющие. Их амплитуда существенно снижена по отношению к составляющим при  $T_M = [2; 1,5]ms$ .

Как следует из рис. 2, в структуре «период – время» сигналов фонового шума полностью отсутствует устойчивая повторяемость, то есть сигналы имеют чисто случайный характер.

Для формализации визуального анализа на рис. 3 приведены зависимости нормированного коэффициента корреляции в диапазоне периодов модели  $T_M = [0,5 \dots 2,5] \cdot 10^{-3}c$  (эквивалентные частоты  $F_{se} = [400 \dots 2000]Гц$ ) в структуре сигнала дрона и фонового шума. Эти зависимости получены путем усреднения значений матрицы  $M_{kr}$  вдоль столбцов.

Зависимость, представленная сплошной линией, получена из матрицы сигнала МАА, две другие (пунктир) получены аналогичным расчетом по двум выборкам из одной записи развитого шума улиц мегаполиса.

Как следует из приведенных графиков, в двух реализациях сигнала фонового шума отсутствуют области сосредоточенных устойчиво повторяющихся областей гармонических составляющих. Эти зависимости формализуют чисто случайный характер наблюдаемого процесса.

Зависимость, полученная из сигналов МАА, позволяет определить число гармоник и диапазон флуктуации их периодов. Вид этой зависимости формализует свойство структурированности периодов сигнала МАА. На этой зависимости наблюдаются две области, разделенные глубокими минимумами при периоде  $T_M = 1,3ms$  и  $T_M = 1,83ms$ , что свидетельствует о существовании двух основных процессов генерации акустического сигнала.

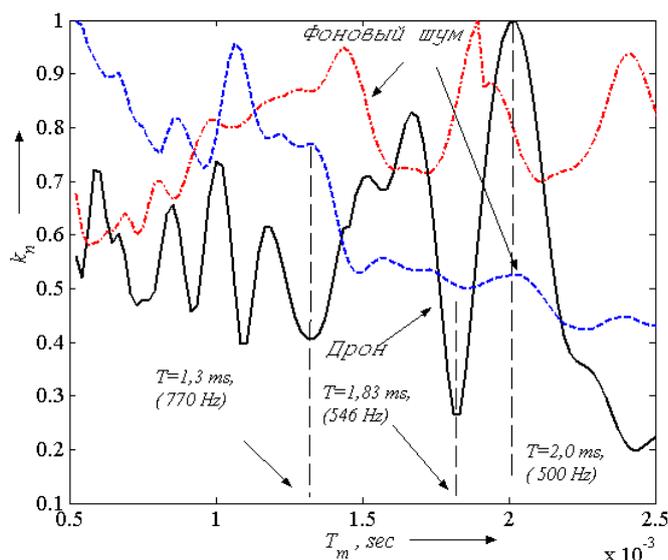


Рис. 3. Зависимости нормированного коэффициента корреляции от периода модели в структуре сигнала дрона и фонового шума улицы

Полученная структура рис. 1 – 3 позволяет выдвинуть предположение о существовании корреляционной связи между строками полученной матрицы  $M_{kr}$  коэффициентов корреляции.

На рис. 4 приведены графики зависимостей коэффициентов корреляции между строками матрицы  $M_{kr}$ , причем расчет коэффициентов корреляции ведется между начальной строкой  $N_{0str}$  и всеми последующими строками, включая начальную строку.

Номера начальных строк в данном случае устанавливаются из ряда  $N_{0str} = [1, 100, 200, 300, 400, 500, 600]$ . Величина  $N_{str\max} = 600$  выбрана из условия  $\Delta\tau_{N_{\max}} \geq 0,01s$ .

В результате каждой итерации  $N_{0str}$  имеем последовательность коэффициентов корреляции  $k_{rNi} = [k_{ri} \dots k_{rm}]$ , где  $i = N_i \dots m$ , где  $m$  – число строк  $M_{kr}$ . Каждое значение зависимостей на рис. 4 получено путем усреднения рассчитанных последовательностей  $k_{rNi} = [k_{ri} \dots k_{rm}]$ .

На рис.4 приведены две зависимости. Первая получена из сигналов МАА (обозначено *drone*), вторая – из сигналов фонового шума улицы мегаполиса (обозначено *Street Noise*).

Из полученного результата следует, что зависимости на рис. 4 не пересекаются, между их значениями имеется существенное и устойчивое отличие. Следовательно, полученный результат позволяет ввести классифицирующий признак в виде условия:

$$\begin{aligned} H = 1 & \text{ при } k_r > k_{cl} \\ H = 0 & \text{ при } k_r < k_{cl} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $H$  – событие, определяющее принадлежность анализируемого сигнала, значение "1" – означает, что событие  $H$  состоит в правильном обнаружении сигнала МАА, значение "0" – означает, что событие  $H$  состоит в обнаружении сигнала фонового шума,  $k_{cl}$  – граничное значение классифицирующего признака, в данном случае можно принять  $k_{cl} = 0,3$ .

## Выводы

Основным результатом работы является обоснование целесообразности использования анализа «время – период» на малых интервалах времени. Показано, что этот подход позволяет получить классифицирующий признак для распознавания акустических сигналов МАА на фоне внешних шумов.

Сформулирована постановка задачи обнаружения МАА по регистрации и анализу акустических сигналов, которые генерируются МАА в процессе полета, определены факторы, влияющие на временную структуру флуктуаций периода сигналов МАА.

## Список литературы:

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.

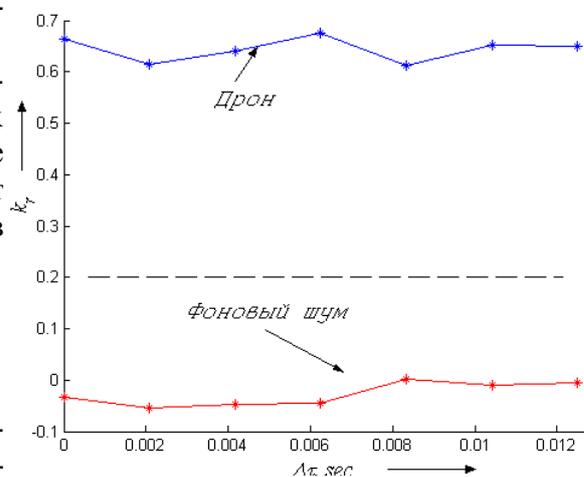


Рис. 4. Зависимости коэффициента корреляции между строками матриц коэффициентов корреляции сигналов МАА и фонового шума

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\\_rqj.pdf](https://hal.pratt.duke.edu/sites/hal.pratt.duke.edu/files/u24/Small_UAV_Noise_Analysis_rqj.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., and 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 Serii – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. 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. pages 1078-1095. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i12.60 pages 1087-1095, 2019.
11. Леонидов В.И., Семенец 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.

*Поступила в редколлегию 05.09.2020*

*Сведения об авторах:*

**Леонидов Владимир Иванович** – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, с. н. с. кафедры биомедицинской инженерии, Украина, e-mail: [volodymyr.leonidov@nure.ua](mailto:volodymyr.leonidov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5218-3177>

**Семенец Валерий Васильевич** – д-р техн. наук, проф., Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ректор, Украина, e-mail: [valery.semenets@nure.ua](mailto:valery.semenets@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-2143>