

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,
С.А. ШЕЙКО, канд. техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук,
И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук, О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук, М.А. АНОХИН*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Введение

В настоящее время количество сфер применения малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стремительно растет. Среди сравнительно новых потребительских рынков БПЛА можно отметить лесное, сельское и дорожное хозяйство, энергетику и связь, добычу и транспортировку нефти и газа, безопасность и охрану окружающей среды и многие другие. Многие малые БПЛА стали доступными для обычных пользователей, причем их оснащение достаточно сложное и включает фото- и видеокамеры, систему автопилота и навигации, что делает управление такими БПЛА достаточно простым.

Повсеместное использование малых БПЛА помимо, несомненно, позитивных сторон породило ряд проблем, связанных с неадекватным поведением некоторых владельцев БПЛА, несанкционированным мониторингом объектов и территорий государственной важности, участившимися случаями вторжения в личную жизнь и т.д. В ряде перечисленных случаев актуальным становится обнаружение БПЛА в воздухе, что может быть осуществлено средствами активной и пассивной радиолокации, тепловой локации, системами видеонаблюдения. В случае БПЛА, имеющих малые размеры, маломощные электродвигатели, которые иногда не имеют управления по радиоканалу, применение указанных методов имеет ряд существенных сложностей и ограничений.

Одним из направлений в обнаружении БПЛА являются акустические наблюдения [1 – 4]. Шум, создаваемый силовой установкой БПЛА и воздушным винтом, является существенным демаскирующим признаком. Создание и совершенствование методов обнаружения, пеленгации и распознавания малых БПЛА путем приема и обработки звуковых сигналов является актуальной задачей.

Методы обработки звуковых сигналов, описанные в литературе, в основном направлены на распознавание звуковых команд в системах управления, что позволяет максимально упростить работу с системой, ускорить и облегчить доступ к данным в информационных базах. Примером использования могут служить такие разработки, как: “VoiceCom SDK”, система “Voice Navigator” или система управления бытовым оборудованием “Труффальдино”. Такие системы не только вносят комфорт и разнообразие в нашу жизнь, но и облегчают жизнь людей с ограниченными возможностями движения. Эти методы базируются на оценках параметров речевых звуков, используют линейное предсказывающее кодирование (LPC), мел-частотные коэффициенты кепстров (MFCC), перцептуальное линейное предсказание (PLP), но мало пригодны для обнаружения малых летательных аппаратов по их акустическим шумам.

Пассивные содары обладают небольшим радиусом действия, поэтому процесс обработки сигналов должен укладываться в минимальный промежуток времени, а система обработки должна распознавать БПЛА на фоне акустических шумов и помех.

При распознавании объектов наиболее важной и проблемной задачей является выделение признаков. Тяжело добиться надежной работы алгоритма системы распознавания при отсутствии количества корректных признаков, достаточного для классификации объектов и их распознавания. Выбор признаков влияет на процесс построения алгоритма распознавания, а также на производительность всей системы и качество распознавания.

1. Результаты исследований характеристик звукового излучения некоторых малых БПЛА и их анализ

Экспериментальная установка для исследований состояла из измерительного конденсаторного микрофона Superlux ECM-999, установленного в фокусе параболического отражателя диаметром 0,6 м. Выход микрофона подключался по симметричному аудиointерфейсу XLR ко входу внешней звуковой карты Behringer U-Phoria UM2. Звуковой сигнал оцифровывался с частотой дискретизации 48 кГц и разрядностью 24 бита. Эксперименты проводились в условиях города, во внутреннем дворе Харьковского национального университета радиотехники. Отношение сигнал/шум в обрабатываемых записях составило около 20 дБ. Исследованы акустические излучения квадрокоптера DJI Phantom 2 и моноплана Skywalker Falcon 1340 mm EPO Flying Wing.

Акустические измерения для квадрокоптера были проведены в режимах подъема над акустической антенной, барражирования на высоте 50 м и последующей посадки. На рис. 1 показана временная реализация записи звукового сигнала квадрокоптера длительностью 20 мс на этапе барражирования, а на рис. 2 – нормированная автокорреляционная функция (АКФ) для данной реализации. Звуковой сигнал квадрокоптера имеет периодический характер, основной период для винта с N лопастями при угловой скорости его вращения Ω определяется выражением $T = 2\pi / N\Omega$ [5].

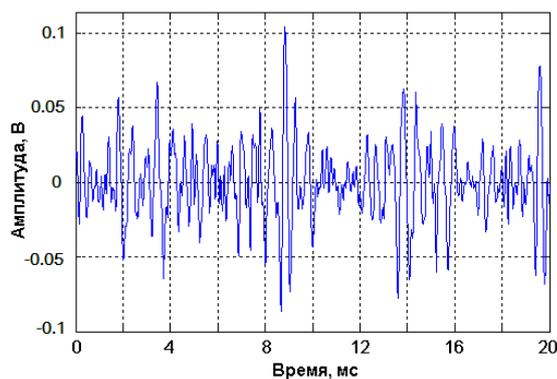


Рис. 1

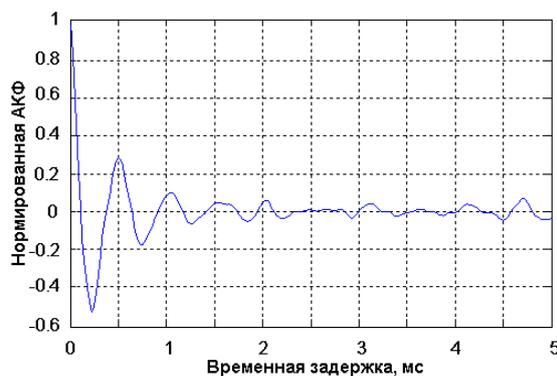


Рис. 2

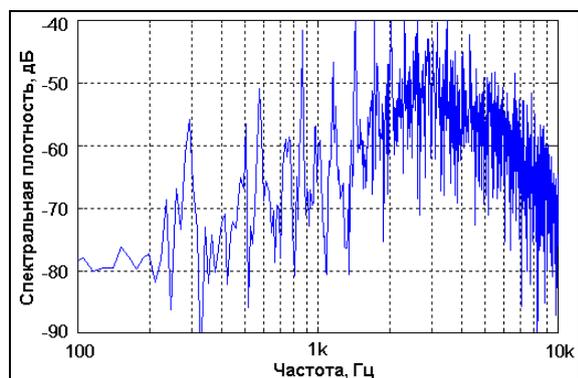


Рис. 3

На рис. 3 показан амплитудный спектр звукового сигнала квадрокоптера, полученный путем БПФ по выборке 8192 отсчета без накопления. Спектр сигнала содержит широкополосную шумовую составляющую (явно выраженный пологий максимум) и многокомпонентную гармоническую структуру, частоты гармонических составляющих являются кратными числами. Анализ большого числа реализаций показывает, что уверенно обнаруживаются, даже при наличии временного накопления, гармоники с частотами до 10 кГц. Амплитуды и фазы гармоник являются случайными и при отсутствии движения квадрокоптера. Это объясняется некоторым различием режимов работы двигателей в процессе компенсации автоматикой БПЛА ветрового воздействия. Данный фактор также приводит к некоторому расширению спектральных линий.

Динамика работы системы компенсации ветровых возмущений квадрокоптера хорошо заметна в частотно-временной области. На рис. 4 показана спектрограмма акустического сигнала для реализации длительностью 15 с. В режиме активного парирования ветра спектральные максимумы разделяются, их количество соответствует числу двигателей аппарата. Последние 2 с на спектрограмме соответствуют этапу посадки квадрокоптера с уменьшением частоты вращения двигателей.

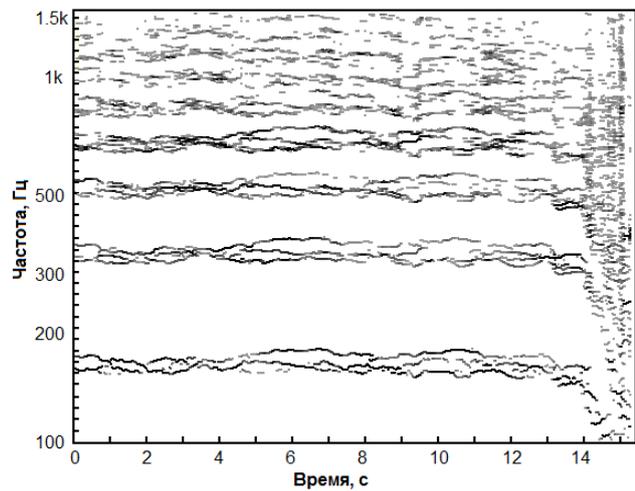


Рис. 4

На рис. 5, 6 показаны псевдофазовые портреты двух реализаций звукового сигнала квадрокоптера. Они показывают зависимость последующего значения сигнала $Y = s(t + \Delta)$ от предыдущего $X = s(t)$. Временной сдвиг Δ выбирался после анализа АКФ и соответствовал ее основному периоду. Очевидно, что полученные псевдофазовые портреты не отвечают представлениям о классических аттракторах, поэтому для выявления их природы необходим дополнительный анализ.

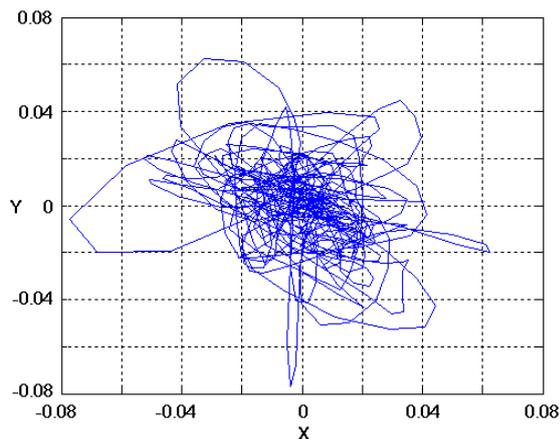


Рис. 5

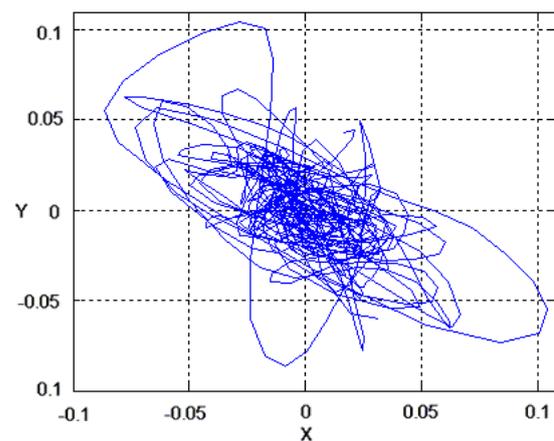


Рис. 6

Измерения для моноплана проводились в режиме пролета над акустической антенной на высоте около 20 м. На рис. 7 показана временная реализация записи звукового сигнала моноплана, а на рис. 8 – ее нормированная АКФ.

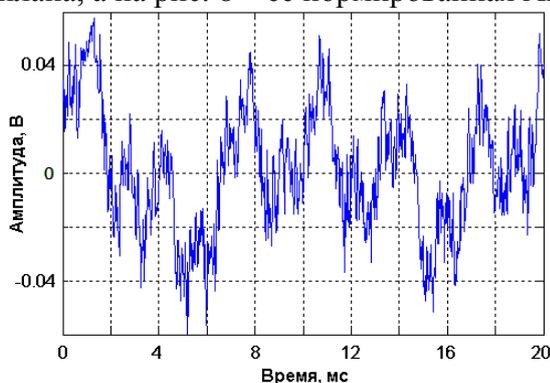


Рис. 7

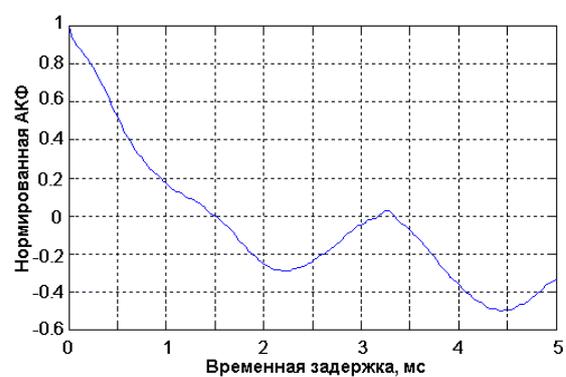


Рис. 8

В данной записи, в отличие от записей звукового сигнала квадрокоптера, присутствует заметная низкочастотная составляющая на частотах до 200 – 250 Гц. Появление этой составляющей вызвано "задуванием" ветра в микрофон измерительной установки. Это свидетельствует о необходимости применения специальной ветрозащиты микрофона и низкочастотной фильтрации при построении систем обнаружения БПЛА.

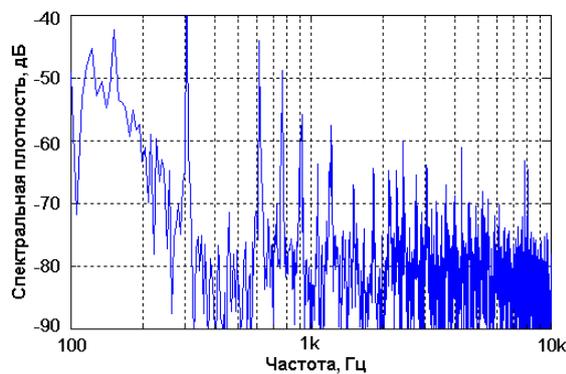


Рис. 9

На рис. 10 показана спектрограмма звукового сигнала моноплана для реализации длительностью 4,5 с.

Данная запись получена для случая пикирования в точку над акустической антенной на высоте около 10 м (временной интервал 1,8 – 2,4 с), последующим выравниванием и переходом в горизонтальный полет. Поскольку в данном сеансе режим двигателя оставался неизменным, синхронное изменение частот гармоник звукового сигнала моноплана вызвано эффектом Доплера при пролете над акустической антенной. При акустическом наблюдении моноплана под малыми углами к направлению движения структура спектра изменяется медленно, что дает возможность применять временное накопление на длительных интервалах.

Спектр звукового сигнала моноплана (рис. 9) также имеет в своем составе большое количество гармоник вплоть до частот 8 – 10 кГц. Спектральные линии, в отличие от квадрокоптера, узкие, что объясняется наличием одного двигателя в силовой установке. Соотношение между амплитудами гармоник менее изменчиво во времени, чем в случае квадрокоптера, а изменение частоты обусловлено совместным действием двух факторов – эффектом Доплера и изменением режима двигателя.

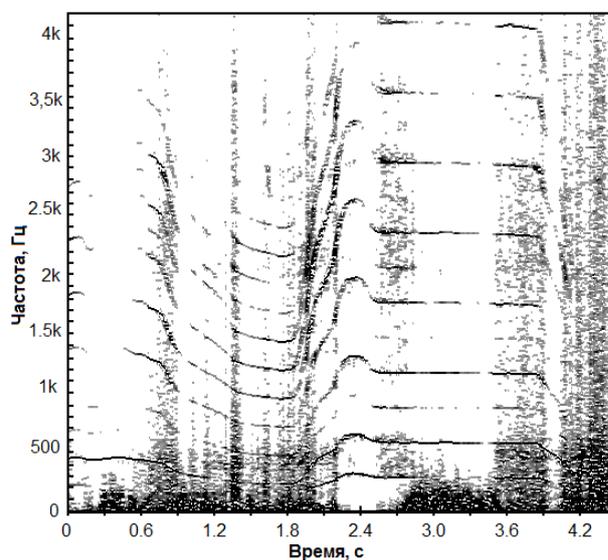


Рис. 10

2. Обнаружение БПЛА на фоне акустических шумов и помех

2.1. Построение первичных признаков звукового образа БПЛА

Принимаемые пассивным содаром звуковые колебания БПЛА преобразуются в электрический сигнал, представляющий собой реализацию широкополосного случайного процесса, описание которого может быть дано энергетическим спектром. Поэтому информационными признаками звукового образа БПЛА могут служить оценки спектральных коэффициентов, определяемые по дискретной реализации S , содержащей N отсчетов, согласно выражению [6]

$$\tilde{G}_s(n\Delta f) = \frac{2\Delta t}{N} \left| \sum_{i=0}^{N-1} S(i\Delta t) \exp\{-j2\pi i n/N\} \right|^2 \quad (1)$$

где $S(i\Delta t)$ – отсчеты шумовой реализации; $\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$; $n = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$.

Сглаживание полученного ансамбля спектральных коэффициентов прямоугольной весовой функцией обеспечивает состоятельность оценок и физически дает характерную структуру спектра, содержащую явно выраженные гармонические составляющие – шум пропеллера (пропеллеров), а также в середине интервала звуковых частот плавно нарастающую и спадающую шумовую составляющую – шум всего летательного аппарата. Эта структура отличается звуковой образ одного БПЛА от другого и от звуковых образов других объектов, естественного акустического шума и помех.

Ортогонализация спектров [7] позволяет выбрать во вторичном пространстве более информативные признаки при меньшем их количестве для описания звукового образа, что повысит оперативность системы.

2.2. Формирование вторичных информативных признаков

Обычно спектральному анализу подвергаются выборки звукового сигнала, в которых количество отсчетов определяется степенью числа два. Соответственно определится и набор спектральных коэффициентов, который можно записать для выборки в виде вектора

$$\vec{F} = (F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_n)^T,$$

где T – символ транспонирования, F_k соответствует k -му сглаженному спектральному коэффициенту (1); n – размерность вектора.

Выборочная матрица F спектральных коэффициентов будет выглядеть следующим образом для каждого звукового образа

$$F = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1m} \\ F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n1} & F_{n2} & \dots & F_{nm} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где m – число отдельно наблюдаемых спектральных векторов.

Переход ко вторичным информационным признакам осуществляется путем построения ковариационной матрицы спектральных коэффициентов и ее диагонализации. Так, ковариационная матрица получается в виде усредненного произведения матрицы (2) и ее транспонированной

$$K = \frac{1}{m} FF^T,$$

при этом предполагается, что среднее значение каждой составляющей уже исключено.

Используя ортогональную матрицу U , столбцы которой являются собственными векторами матрицы K , получаем диагонализацию ковариационной матрицы [8]

$$U^T K U = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

На главной диагонали матрицы находятся собственные числа, а все остальные элементы равны нулю. Собственные числа матрицы (3) и собственные векторы матрицы K могут быть использованы в качестве эффективных вторичных информативных признаков при распознавании звуковых образов.

2.3. Правило принятия решений

Для принятия решений о принадлежности входного звукового образа, представленного усеченной матрицей собственных векторов, соответствующих большому собственным чис-

лам, было разработано решающее правило, базирующееся на критерии подобия Дайса [9]. Векторное представление информационных признаков позволяет рассчитать коэффициенты подобия Дайса. При этом некоторая избыточность набора признаков, используемого для расчета значения коэффициента подобия, позволяет более эффективно классифицировать образы, поскольку использование малого количества признаков приводит к неправильному определению подобия пары образов. Для расчета коэффициента подобия (D) используется формула [10]

$$D(A, B) = \frac{2 \times \sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 + \sum_{i=1}^n b_i^2}, \quad (4)$$

где a_i – сличаемые координаты собственного вектора ковариационной матрицы входного звукового образа; b_i – координаты соответствующего собственного вектора из коллекции; A, B – собственные векторы усеченной ковариационной матрицы, столбцы которой соответствуют наибольшим собственным числам, для входного звукового образа и образа из коллекции.

После проведенных расчетов набор признаков, поступивший на вход системы, соответствует некоторому классу, если среднее значение коэффициента подобия по всем парам сличаемых векторов больше определенной пороговой величины. Улучшение качества распознавания при использовании коэффициентов подобия обеспечивается получением больших значений подобия для наиболее соответствующих образов, поскольку в расчете не учитываются малозначимые элементы набора признаков.

Выводы

Экспериментальное исследование звуковых сигналов квадрокоптера и моноплана показало, что их спектры имеют ярко выраженные гармонические составляющие с частотами, кратными частоте вращения винта.

Гармонические составляющие звукового сигнала квадрокоптера шире, чем у моноплана, что объясняется некоторым различием режимов работы двигателей в процессе полета или при работе системы компенсации ветровых возмущений.

При большом различии режимов двигателей квадрокоптера спектральные максимумы разделяются на несколько, что может быть одним из признаков для классификации БПЛА.

В звуковых сигналах исследованных БПЛА, при наличии накопления спектров, уверенно наблюдаются гармоники с частотами до 8 – 10 кГц.

При акустическом наблюдении БПЛА самолетного типа под малыми углами к направлению движения структура спектра изменяется незначительно, что дает возможность применять временное накопление на длительных интервалах.

Проведенные теоретические исследования позволяют разработать модуль формирования коллекции звуковых образов БПЛА и модуль, реализующий правило принятия решений. Полученные данные могут быть использованы и в других системах, требующих оперативного распознавания объектов.

Список литературы: 1. *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. 2. *Pham, T.* TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE.- 2004. – Vol. 54. – Pp. 24–29. 3. *Sadasivan, S.* Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S.Sadasivan, M.Gurubasavaraj, S.R. Sekar // Eronautical DEF SCI J. – 2001. – Vol. 51, № 3. – Pp. 279–283. 4. *Kartashov V.M., Babkin S.I., Tolstykh E.G., Lepcha N.G.* Systematic errors in measurement of meteorological variables in correlation processing radioacoustic sounding system signals // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Electrosvyaz and Radiotekhnika). – 2016. – V.75 (9). – Pp. 835-843. 5. *Александров, В.Л.* Воз-

душные винты. – М. : Гос. изд-во оборонной промышленности. – 1951. – С. 376–377. 6. Грибанов, Ю.И., Мальков, В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. – М. : Энергия. – 1974. – 239 с. 7. Безрук, В.М., Певцов, Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоуправления. – Харьков : Коллегиум, 2007. – 430с. 8. Беллман, Р. Э. Введение в теорию матриц. – М. : Наука, 1969. – 368с. 9. Sung-Huuk, C. Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Functions // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science. – 2007. – Vol.1. – Issue 4. – Pp. 300-307. 10. Anokhin, M., Koryttse, I. Decision-making rule efficiency estimation with applying similarity metrics. – Lublin-Rzeszow: ECONTTECHMOD. – 2015. – Vol.4. – No3. – С. 73-78.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.11.2017