

## ИМИТАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИХ ПОЛЕТЕ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Януцевич Д.В., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Кулага В.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматриваются теоретические аспекты и практическая реализация алгоритмов цифрового синтеза акустических сигнатур беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с двигателями внутреннего сгорания. Проанализированы физические механизмы формирования тонального и вихревого шумов винта, а также шума выхлопной системы. Описаны методы учета частотно-зависимого поглощения звука атмосферой и имитации динамики полета с использованием линий задержки. Обоснована применимость разработанных моделей для верификации алгоритмов пеленгации в условиях полунатурного эксперимента.

Разработка и отладка алгоритмов акустической локации для обнаружения БПЛА требует проведения масштабных испытаний для оценки вычислительной нагрузки и точности распознавания в реальном времени. Организация натурных полетных экспериментов сопряжена с высокой стоимостью эксплуатации БПЛА, зависимостью от метеоусловий и отсутствием повторяемости условий, необходимой для качественной оценки изменений в алгоритмах. В данной связи актуальной задачей является создание специализированного программного обеспечения для имитации акустических возмущений, позволяющего заменить дорогостоящие вылеты воспроизводимыми тестами в лабораторных условиях [1].

**Природа акустического шума БПЛА.** Акустический шум, генерируемый БПЛА, представляет собой сложный нестационарный процесс. Шум воздушного винта является суперпозицией дискретных низкочастотных гармоник и сплошного широкополосного спектра. Выделяют три основные составляющие: шум вытеснения, обусловленный геометрией профиля лопасти; шум нагружения, возникающий вследствие передачи аэродинамических сил среде; и вихревой шум, образующийся из-за срыва потока с задней кромки и концов лопастей.

Спектр шума вращения имеет выраженную гармоническую структуру, где дискретные частоты  $f_m$  кратны «лопастной частоте» [2]:

$$f_m = mN\Omega, \quad (1)$$

где  $m$  – номер гармоники,  $N$  – число лопастей,  $\Omega$  – частота вращения винта в секунду.

Для моделирования тонального шума предлагается использовать методику, основанную на аппроксимации экспериментальных кривых затухания гармоник. Данный подход позволяет синтезировать акустическую подпись без избыточных вычислительных затрат на обсчет аэродинамики каждой точки лопасти. Тембральная окраска сигнала формируется согласно экспоненциальному закону затухания последующих гармоник [3]:

$$H_N = 26 \cdot e^{-(0.7 \cdot M_t + 0.79) \cdot N} - 22, \quad (2)$$

где  $M_t$  – число Маха конца лопасти,  $N$  – номер гармоники.

Акустическая сигнатура ДВС формируется совокупностью периодических импульсов давления выхлопа и шума всасывания воздуха [4]. Для формирования достоверного сигнала проектируется процедура, управляемая фазовым инкрементом, привязанным к оборотам двигателя. Базовая частота выхлопов рассчитывается по формуле [5]:

$$f_{vh} = \frac{2 \cdot f_{kv} \cdot N_{cl}}{I}, \quad (3)$$

где  $I$  – число тактов,  $N_{cl}$  – число цилиндров,  $f_{kv}$  – число оборотов коленчатого вала.

Обеспечение аутентичности спектрально-временной структуры звука ДВС достигается путем введения асимметрии фаз зажигания в разных цилиндрах, что позволяет имитировать звук колебательного характера на низких оборотах и специфическое «рычащее» звучание на высоких [4].

**Распространение звука в пространстве.** Процесс распространения акустических возмущений от БПЛА к системе обнаружения сопровождается изменением энергетических, спектральных и временных характеристик сигнала. Для достоверной имитации полета в программном обеспечении необходимо учитывать два ключевых фактора: затухание и временные задержки.

Затухание из-за геометрической дивергенции рассчитывается по формуле [6]:

$$A_{div} = 20 \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} + 11, \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние от источника шума до приемника (в метрах),  $d_0$  – опорное расстояние ( $d_0 = 1$  м). Коэффициент атмосферного поглощения рассчитывается по формуле [7]:

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_N + \alpha_O, \quad (5)$$

где  $\alpha_{cl}$  – коэффициент затухания вследствие звукопоглощения в процессах переноса с позиций «классической» физики,  $\alpha_N$  – коэффициент затухания вследствие молекулярного поглощения при колебательной релаксации азота,  $\alpha_O$  – коэффициент затухания вследствие молекулярного поглощения при колебательной релаксации кислорода.

Динамическое изменение расстояния до микрофонов при движении БПЛА вызывает сдвиг частоты. Для обеспечения плавности фазовых характеристик в условиях дискретной временной сетки применяется дробная задержка, реализуемая с помощью линейной интерполяции между соседними отсчетами буфера [8].

Предлагаемый подход реализует концепцию полунатурного моделирования, объединяя имитацию внешней среды и аппаратные компоненты системы обнаружения. Применение физически обоснованных моделей при синтезе акустических сигналов направлено на достижение необходимой степени приближения к реальным условиям эксплуатации. Это позволяет проводить верификацию акустических локационных систем в широком диапазоне сценариев и снижает потребность в проведении дорогостоящих натурных испытаний на ранних этапах проектирования.

**Список использованных источников:**

1. Повышение технических характеристик комплекса обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическому шуму их авиационных систем (промежуточный) : отчет о НИР / УО «Военная академия Республики Беларусь» ; рук. А. А. Свириденко. – Минск, 2025. – 44 с.
2. Физика шумов и вибраций. Акустическая экология [Электронный ресурс] : учебные материалы курса / Кафедра акустики физического факультета МГУ. – Режим доступа: <https://acoustics.phys.msu.ru/courses/noise-and-vibrations>.
3. Selfridge, R. Physically derived sound synthesis model of a propeller / R. Selfridge, D. Moffat, J. D. Reiss // AM '17 : Proceedings of the 12th International Audio Mostly Conference. – London : ACM, 2017. – P. 16:1–16:8.
4. Baldan, S. Physically informed car engine sound synthesis for virtual and augmented environments / S. Baldan [et al.] // Proceedings of the IEEE 2nd VR Workshop on SIVE. – Arles : IEEE, 2015. – P. 1–6.
5. Разработка облика комплекса обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическому шуму их авиационных систем (заключительный) : отчет о НИР / УО «Военная академия Республики Беларусь» ; рук. А. А. Свириденко. – Минск, 2025. – 87 с.
6. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета : ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613-2:1996). – Минск : БелГИСС, 2006. – 32 с.
7. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 1. Расчет поглощения звука атмосферой : ГОСТ 31295.1–2005 (ИСО 9613-1:1993). – Минск : БелГИСС, 2006. – 28 с.
8. Laakso, T. I. Splitting the unit delay : [FIR/all pass filters design] / T. I. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen, U. K. Laine // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13, № 1. – P. 30–60.