

Куликов Игорь Владимирович, студент,
Государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОФОННЫХ РЕШЕТОК В АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА

Аннотация: Контроль воздушного пространства в городе и на отдельных важных объектах в настоящее время является одной из важнейших задач, в связи с появлением малогабаритных и легкодоступных беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА). В последнее время наблюдается быстрый рост и широкое использование БПЛА во многих областях, например, аэрофотосъемке, мониторинге дорожного движения, сельском хозяйстве, съемке кино. БПЛА привлекает множество интересов по проведению исследований в отношении планирования борьбы с их нелегальным использованием [1-3]. Для подавления угрозы незаконного использования БПЛА необходимо развернуть антидронные системы для локализации и защиты данных объектов. В данной статье будет кратко описан принцип построения данных систем, а также предоставлен обзор по построенным системам, в которых используется разный тип микрофонных решеток. Данные решетки отличаются по многим признакам, которые также будут сравнены между собой.

Ключевые слова: БПЛА, микрофонные решетки, акустические системы.

Системы обнаружения БПЛА

БПЛА, движение которых производится за счет тяги винта, издают акустический шум. Количество лопастей винта, количество винтов, конструкция винта, скорость вращения винта – факторы, влияющие на акустический спектр шума, издаваемого БПЛА. Большинство построенных систем используют 3 основных фактора наличия БПЛА в наблюдаемой зоне: акустический шум, оптическое наблюдение, активность в радиочастотном диапазоне. Примером такой системы может послужить ADS-ZJU, которая использует все 3 фактора для подтверждения того, что в наблюдаемой зоне находится дрон [4]. Подобные системы обнаружения могут строиться, основываясь как на одном факторе, так и на нескольких. К примеру, выше была приведена система ADS-ZJU. Она использует в комплексе несколько факторов для идентификации дрона – оптический, акустический и радиочастотный. Есть системы, которые основываются только на одном, к примеру, на акустическом факторе [5-6]. Такие системы строятся на оригинальных микрофонных решетках с разным типом микрофонов на несущих конструкциях (рисунок 1).

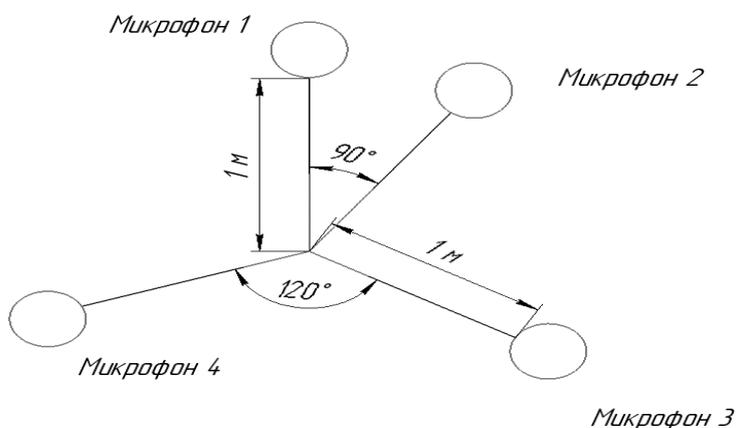


Рисунок 1 – Расположение микрофонов на несущей конструкции



Также существуют системы, в которых приемником акустического сигнала служит микрофонная решетка в виде узла с МЭМС-микрофонами (датчиками) [7]. В таких решетках количество и расположение микрофонов, могут отличаться, в зависимости от расчетов характеристик решетки (рисунок 2).

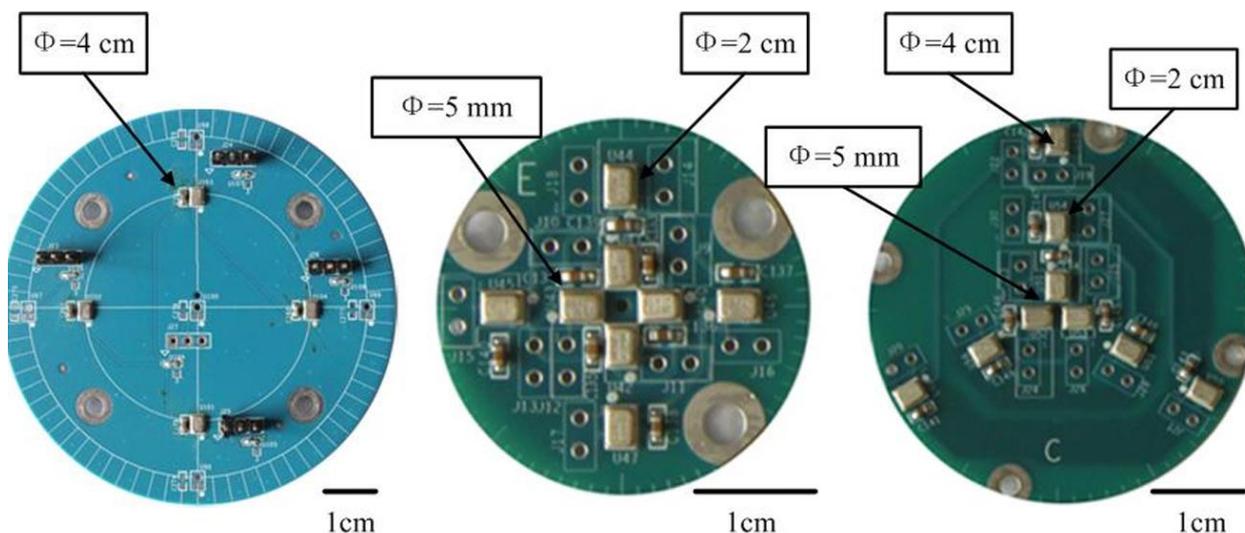


Рисунок 2 – Расположение МЭМС-микрофонов на печатной плате

Технические характеристики таких микрофонных решеток будут сильно отличаться, т.к. конструкция и используемые микрофоны напрямую влияют на параметры принимаемого акустического сигнала.

Микрофонная решетка в виде несущей конструкции геометрической формы с располагаемыми на ней микрофонами

Одним из способов построения микрофонной решетки является несущая конструкция с гранями, на которой располагаются микрофоны на определенном расстоянии. Пример расположения микрофонов на раме был представлен выше на рисунке 1. В работах [6, 8] рама для расположения микрофонов состояла из 4 ребер одинаковой длины, на концах которых были установлены микрофоны образуя между собой 4 грани равностороннего треугольника. Рама микрофонной решетки, построенной Army Research Laboratory (далее ARL) имеет форму, представленной на рисунке 1.

Моделирование принятого на микрофоны сигналы было выполнено в следующем виде:

$$y(t) = \frac{s(t)}{r(t)^M} + \gamma(t), \quad (1)$$

где – $y(t)$ – принятый сигнал на микрофоне, $s(t)$ – сигнал от источника, $\gamma(t)$ – независимый и нулевой средний уровень шума, $r(t)$ – дальность до цели, а M – постоянная, равная 1 для сферического затухания. Средняя мощность принимаемого сигнала можно смоделировать путем возведения в квадрат уравнения 1:

$$y(t)^2 = \frac{s(t)^2}{r(t)^{2M}} + E(\gamma(t)^2), \quad (2)$$

где – E обозначает ожидаемое значение. Теперь M можно оценить, взяв логарифм уравнения 2 и выполнив интерполяцию методом наименьших квадратов принятых акустических сигналов [6].

Микрофонная решетка системы AAD построена по схожей методике, но имеет некоторые отличия. На рисунке 3 представлена микрофонная решетка системы AAD.



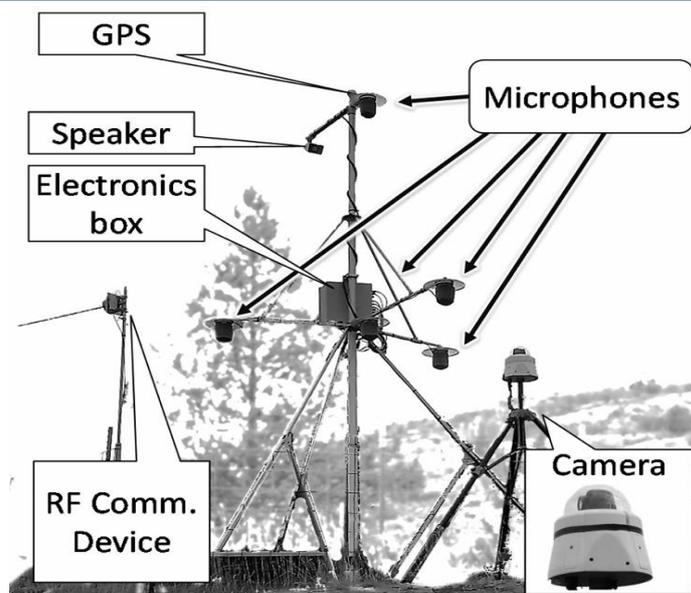


Рисунок 3 – Микрофонная решетка системы AAD

Она так же состоит из нескольких ребер, н концах которых прикреплены микрофоны, а также имеет пятый микрофон между тремя нижними. Данные с микрофонной решеткой передаются на в центральный процессор, где используются данные пеленга для определения местоположения и отслеживания целей в трех измерениях с помощью триангуляции с учетом эффектов распространения звука в пространстве. Системы подобного типа могут включать в себя от двух и выше количество микрофонов, которые должны располагаться друг от друга на относительно небольшом расстоянии (120-230 см), чтобы избежать требования по компенсации дифференциального доплеровского эффекта между микрофонами, т.к. для быстроперемещающихся источников и широко расположенных датчиков метод пассивной широкополосной взаимной корреляции для оценки временной задержки требует компенсации относительного временного масштабирования между принимаемыми сигналами. Иначе, оценка временной задержки будет ошибочной [9].

В системе ADS-ZJU использовались 4 микрофонные решетки с рамой L-формы и 8-ю равномерно расположенными микрофонами на каждой (рисунок 4).



Рисунок 4 – Микрофонная решетка системы ADS-ZJU



Принимая акустический сигнал на данной системе было обнаружено, что акустические сигналы являются гармоническими. Гармоники отличаются друг от друга, но распределение силы гармоник можно рассматривать как акустическую характеристику БПЛА в виде квадрокоптера, а вектор характеристик описывался следующим образом:

$$\left[\frac{e_1}{\sum_{i=1}^n e_i}, \dots, \frac{e_i}{\sum_{i=1}^n e_i} \right], \quad (3)$$

где – $e_1 \dots e_n$ интенсивность акустических сигналов на основной частоте и гармониках.

Также вариантом по расположению микрофонов на одном ребре, образуя микрофонную решетку, было применено в акустической системе СЛУХАЧ [10]. Данная микрофонная решетка может включать в себя от 2-х и более рупоров. Методы обработки полученного сигнала не раскрываются. Внешний вид микрофонной решетки из нескольких рупоров представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Микрофонная решетка акустической системы СЛУХАЧ.

Микрофонная решетка в виде узла с использованием МЭМС-микрофонов

Создание МЭМС-микрофонов позволило серьезно уменьшить габаритные размеры периферийных устройств и приборов, а также использовать в одном устройстве более одного микрофона под определенные задачи. Даже в современных профессиональных микрофонах для записи звука используются несколько датчиков (МЭМС-микрофонов) для возможности записи звука в стерео или пространственном режиме. Принцип построения таких микрофонов схож с выше представленными системами, однако габариты таких решеток колоссально меньше за счет размеров самих датчиков, а также устройств коммутации в виде печатной платы, что позволяет создавать микрофонные решетки с большим количеством датчиков (рисунок 6а), а также строить системы с несколькими таким решетками. Подобную микрофонную решетку разработали авторы [11], внешний вид микрофонной решетки представлен на рисунке 6б.

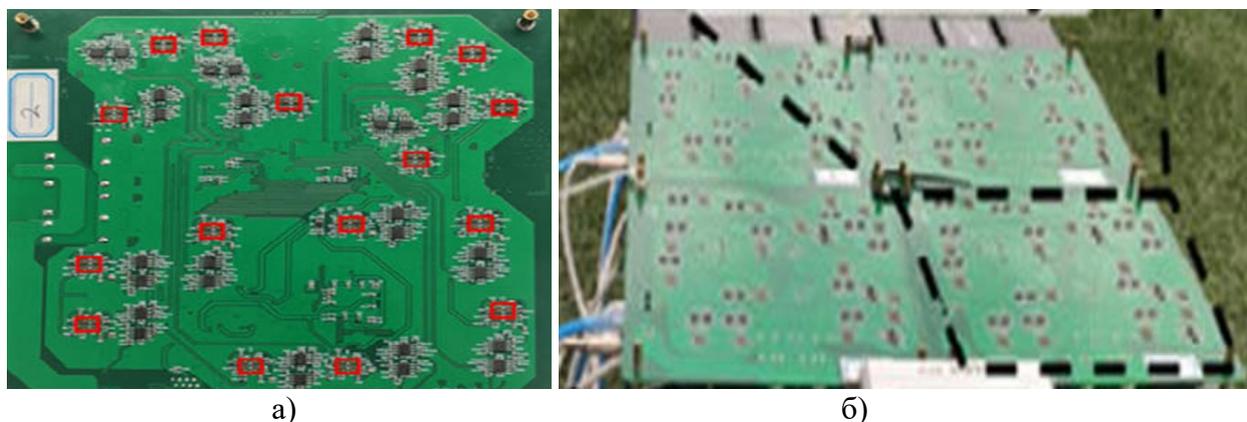


Рисунок 6 – Микрофонная решетка системы MUTES: а – элемент микрофонной решетки; б – микрофонная решетка из 4-х элементов.



На каждом элементе микрофонной решетки (рисунок 6а) располагается 64 датчика. На каждом элементе датчики скомпонованы по 4 шт. близко друг к другу, а их выходной сигнал объединен. Такое решение было принято для того, чтобы соотношение сигнал-шум 4-х датчиков превышал в 2 раза соотношение сигнал-шум отдельного датчика. Такая конструкция позволяет создать матрицу для отслеживания положения источника акустического сигнала с разрешением в $8,7^\circ$ на частоте 5 кГц. Также в компоновке датчиков было принято решение расположения в неравномерном порядке, таким образом, избавляясь от боковых полос спектра. Метод определения положения связан с временной задержкой поступления акустического сигнала и записывается в виде:

$$\tau_m = \frac{(\hat{X}_k * X_m)}{c}, \quad (4)$$

где \hat{X}_k – k-й единичный вектор управляемого направления в пределах наблюдаемого пространства, X_m – вектор местоположения m-го микрофона, c – скорость звука.

В статье [7] авторы создали подобную микрофонную решетку меньших размеров на одном печатном узле (рисунок 2) для приема акустического сигнала в диапазоне от 100 до 3000 Гц. Микрофонная решетка выполнена в виде круговой матрицы с одинаковым разрешением во всех направлениях. Расстояние между датчиками, должно составлять половину длины волны акустического сигнала, а апертура матрицы составила не больше 5 см [7]. На рисунке 2 представлены несколько вариантов построенных микрофонных решеток. Деление микрофонной решетки с модулем, где производится усиление, фильтрация, обработка и возможная передача или запись полученного акустического сигнала (рисунок 7), позволило создать компактное устройство с размерами $\sim 4 \times 10$ см, позволяющее передавать данные об источнике акустического шума по Bluetooth, UART, а также записи звуковой дорожки на SD-карту [7].



Рисунок 7 – Микрофонная решетка и модуль усиления, фильтрации, обработки и передачи акустического сигнала, соединенные шлейфом

Одной из основных проблем использования микрофонных решеток являются внешние шумы, такие как ветер или громкие звуки на широкой полосе частот, которые необходимо подавлять с помощью фильтрации определенных частот, накоплением сигнала на определенной частоте, а также использованием машинного обучения для оптимизации идентификации БПЛА в воздушном пространстве. Также проблемой применение акустических решеток являются погодные условия. Дождь или град, могут вызывать шумы, создаваемые ударами по конструкции микрофонной решетки, попаданием на чувствительные элементы влаги, что будет вызывать процесс коррозии и забивание специальных отверстий датчиков. Также проблемой применение является очистка поверхностей решеток от мусора в виде грязи или снега, как пример.



Заключение

В данной статье были описаны основные способы построения микрофонных решеток в виде конструкций различных геометрических форм и печатных узлов с использованием МЭМС-микрофонов. Также была описана суть использования данных решеток и проблемы их использования в реальных условиях. В системах обнаружения БПЛА использование акустического метода крайне необходимо, т.к. позволяет обнаруживать и идентифицировать БПЛА в светлое и темное время суток, а также производить подобные устройства с меньшей ценой, по сравнению с использованием дорогих анализаторов спектра радиочастотного диапазона (при использовании метода анализа радиочастотного спектра), камер с высоким разрешением, болометров и тепловизоров (при использовании оптического метода). Однако, для повышения вероятности обнаружения и точности положения БПЛА необходимо комбинировать данные методы.

Список литературы:

1. H. Sedjelmaci, S.M. Senouci, N. Ansari Intrusion detection and ejection framework against lethal attacks in UAV-aided networks: A bayesian game-theoretic methodology. IEEE Trans. Intell. Transport. Syst., № 5, May 2017, pp. 1143–1153.
2. J. Su, A Stealthy GPS Spoofing Strategy for Manipulating the Trajectory of an Unmanned Aerial Vehicle. IFAC-PapersOnLine., № 22, 2016, pp. 291–296.
3. C. Zhao, J. He, J. Chen, Resilient Consensus with Mobile Detectors against Malicious Attacks, IEEE Trans. Signal Inf. Process., № 4, August 2018, pp. 60-69.
4. X. Shi, C. Yang, W. Xie, C. Liang, Z. Shi, J. Chen. Anti-Drone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges. IEEE Communications Magazine №56 (4), April 2018, pp. 68-74.
5. X. Chang, C. Yang, J. Wu, X. Shi and Z. Shi, A Surveillance System for Drone Localization and Tracking Using Acoustic Arrays. 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2018, pp. 573-577.
6. M. Benyamin, G. H Goldman. Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array. Sensors and Electron Devices Directorate, ARL. U.S. Army Research Laboratory. September 2018. p. 34.
7. X. Zhang, J. Huang, E. Song, H. Liu, B. Li, X. Yuan. Design of Small MEMS Microphone Array Systems for Direction Finding of Outdoors Moving Vehicles. Sensors, №14, March 2014 pp. 4384-4398.
8. A. Sedunov, D. Master, N. Sedunov, A. Yakubovsky, Passive Acoustic System for Tracking Low-Flying Aircraft, IET Radar, Sonar & Navigation 10 (9), August 2016, pp. 1561-1568.
9. B.G. Ferguson, W. Kam, Passive wideband cross correlation with differential Doppler compensation using the continuous wavelet transform, J. Acoust. Soc. Am. 106, 1999, pp. 3434–3444.
10. С.А. Козлов, Пассивная акустическая система обнаружения БПЛА, ФГУП «НИИПА», 2024, стр. 19.
11. S. Ding, X. Guo, T. Peng, X. Huang, X. Hong, Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches, Advanced Intelligent Systems 5 (10), July 2023.

