

УДК: 623; 534.222

DOI: 10.53816/20753608\_2024\_1\_131

## ОБНАРУЖЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ МИКРОФОННЫХ РЕШЕТОК

### DETECTION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING MICROPHONE ARRAYS

*По представлению чл.-корр. РАН С.Н. Шарова*

*М.С. Андриющенко, А.М. Голик, С.А. Сахнов, С.Н. Терешин*

*Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии*

*M.S. Andryushchenko, A.M. Golik, S.A. Sahnov, S.N. Tereshin*

В статье рассмотрены возможности повышения дальности обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по характеристикам их акустического излучения с помощью микрофонных решеток. Рассмотрены принципы работы микрофонных решеток, алгоритмы формирования их диаграмм направленности, приведены примеры применения микрофонных решеток и акустических камер для обнаружения БПЛА.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, обнаружение, распознавание, акустический сенсор, микрофонная решетка, диаграмма направленности, алгоритм «задержки и суммирования».

There is the discussion of possible increasing the detection range of UAVs based on the characteristics of their acoustic radiation using microphone arrays in this article. The article describes the basics of the operation of microphone arrays, algorithms for forming their radiation patterns, provides examples of the use of microphone arrays and acoustic cameras for detecting UAVs.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, detection, recognition, acoustic sensor, microphone array, radiation pattern, algorithm «delay and sum».

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) представляют собой угрозу наземным войскам и объектам критической инфраструктуры [1–3]. Они характеризуются разнообразием траекторий движения, а благодаря наличию на борту средств разведки и наведения видимого, инфракрасного и радиолокационного диапазонов могут выполнять боевые задачи в сложных условиях и в любое время суток. БПЛА способны нести боевую нагрузку, достаточную не только для непосредственного поражения объектов, но и для доставки средств высокоточного оружия [4].

Для эффективного противодействия необходимо своевременно их обнаружить. БПЛА, как небольшие низкоскоростные летательные аппараты, характеризуются слабыми демаскирующими признаками в радиолокационном, инфракрасном и оптическом диапазонах [1–6].

В работах [7–9] рассмотрены возможности обнаружения БПЛА по их акустическим характеристикам. БПЛА обычно имеют характерную акустическую сигнатуру, которую можно обнаружить с помощью чувствительных микрофонов. С помощью микрофонной решетки (МР) можно проводить детальный анализ сигналов,

определять направление на цель, а с помощью триангуляции — дальность до нее [10].

В данной статье мы рассмотрим особенности применения МР и акустических камер, являющихся более сложными вариантами микрофонных решеток.

Принципы работы микрофонных решеток. В случае когда микрофоны, составляющие МР, являются всенаправленными, они принимают звуки со всех направлений. Совместная обработка этих сигналов позволяет определить направление звука, приходящего от БПЛА.

Задавая разные параметры обработки многоканального сигнала МР или многоканальной фонограммы, можно выделить акустическую сигнатуру воздушного объекта. Базовыми структурами МР являются так называемые Broadside array (антенная решетка поперечного излучения) и Endfire array (продольно-направленная антенная решетка) [10]. Схемы этих базовых структур представлены на рис. 1.

Для выделения прямого звука воздушного объекта основным (базовым) алгоритмом обработки сигналов МР является алгоритм формирования диаграммы направленности (ДН), вариантами которого являются алгоритмы «задержки и суммирования» («delay-and-sum») и «фильтрации и суммирования» («filter-and-sum») [10]. Суть этих алгоритмов состоит в том, что сигналы микрофонов складываются с разными задержками (разным сдвигом фаз), выравнивая для каждой ча-

стоты фазы сигналов, приходящих с выбранного направления (цели). При этом алгоритм формирования ДН позволяет усилить сигналы, формируемые звуком, приходящим с направления от цели, т.е. осуществить своеобразную «фокусировку» звуков. На рис. 2 поясняется алгоритм «задержки и суммирования» [11].

На рисунке показана МР из  $M$  элементов с индексами  $m = 0, \dots, M - 1$ . Используемые обозначения:

$\mathbf{x}_m = [x_m, y_m, z_m]$  — вектор координат  $m$ -го элемента МР в пространстве;

$f(\mathbf{x}, t)$  — фронт плоской волны;

$y_m(t) = f(\mathbf{x}_m, t)$  — принятый сигнал на  $m$ -м элементе МР.

Диаграммообразующая схема алгоритма применяет задержку  $\tau_m$  и амплитудный весовой коэффициент  $w_m$  к сигналу с каждого элемента антенной решетки, после чего сигналы с  $M$  элементов суммируются.

Задержки  $\tau_m$  выбираются таким образом, чтобы максимизировать чувствительность приема сигнала антенной решеткой (АР) с заданного направления прихода. Изменяя задержки  $\tau_m$ , можно управлять диаграммой направленности МР. Управляя весовыми коэффициентами  $w_m$ , можно также усиливать чувствительность приема МР с заданного направления и ослаблять ее с остальных углов прихода.

Сигнал на выходе данной диаграммообразующей схемы можно представить выражением [11]:

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m \cdot y_m(t - \tau_m).$$

Сдвиг фаз может задаваться исходя из приближения «дальнего поля», для которого звуковые волны считаются плоскими, или «ближнего поля», для которого звуковые волны считаются сферическими. Дистанции, для которых справедливо приближение «дальнего поля», определяются обычным соотношением [11]:

$$L > 2D^2 / \lambda,$$

где  $L$  — дистанция;  $D$  — линейный размер (апертура) МР;  $\lambda$  — длина звуковой волны.

Рис. 3 поясняет концепцию алгоритма «задержки и суммирования» для решетки, состоящей из трех микрофонов [12].

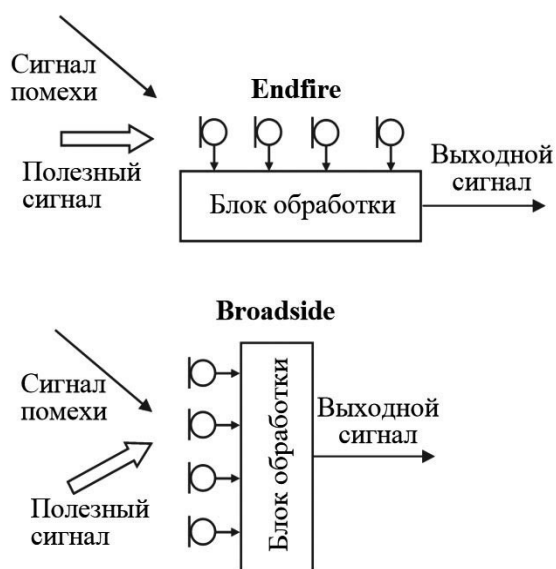


Рис. 1. Базовые структуры микрофонных решеток

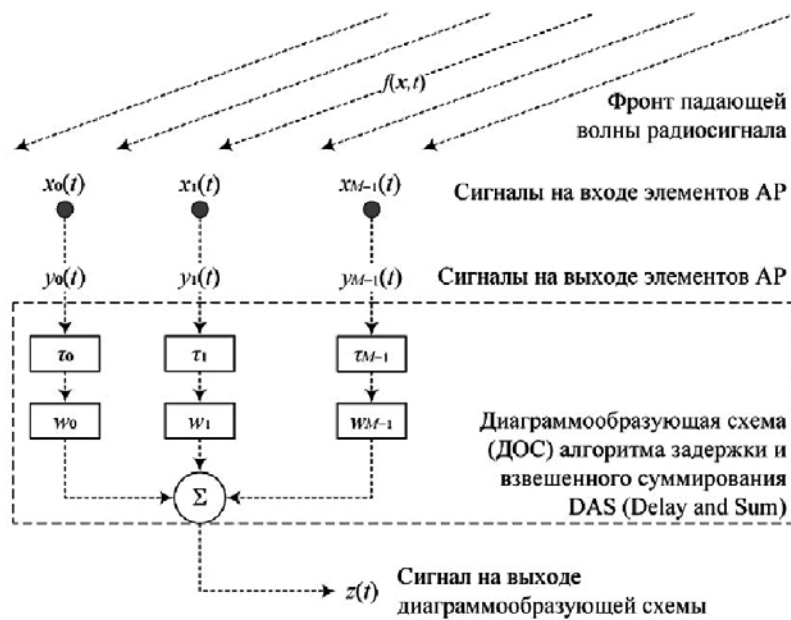


Рис. 2. Диаграммообразующая схема алгоритма «задержки и суммирования»

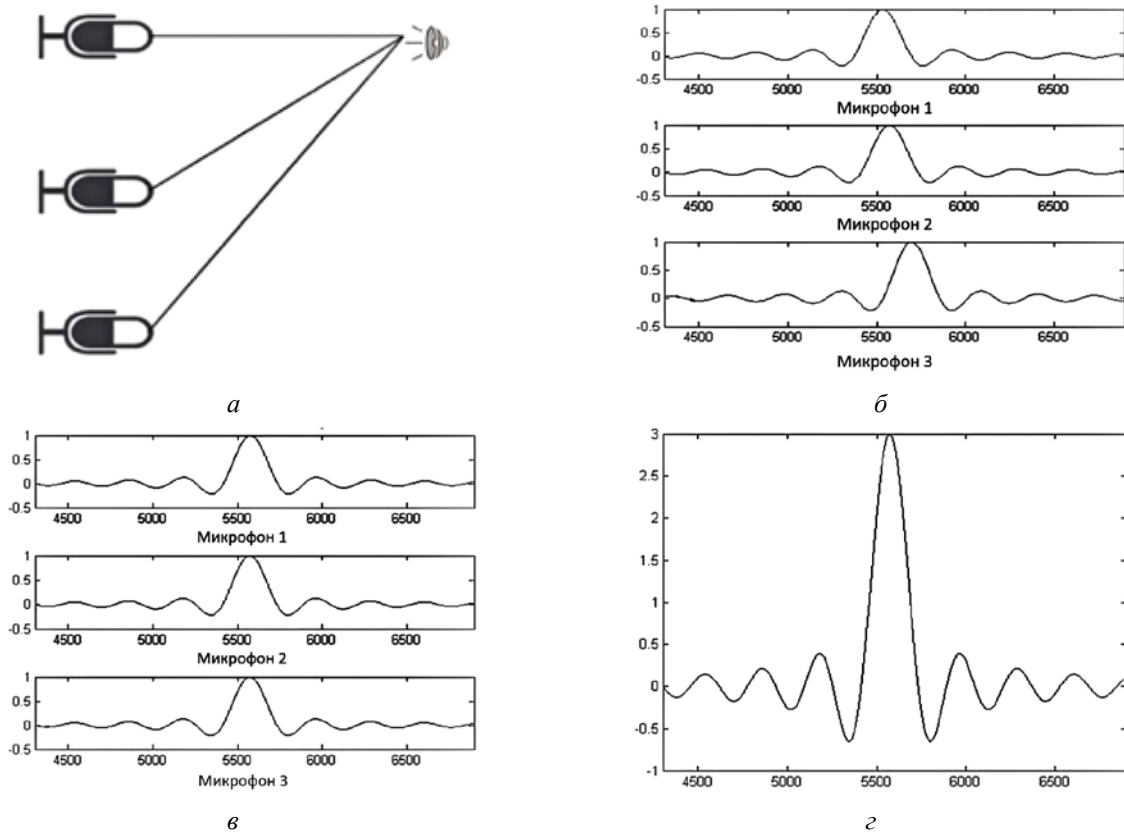


Рис. 3. Результат обработки сигналов в диаграммообразующей схеме «задержки и суммирования» для трех микрофонов: а — упрощенная схема решетки с источником звукового сигнала, поступающего на каждый микрофон; б — импульсы сдвинуты во времени для каждого микрофона; в — импульсы после преобразования в диаграммообразующей схеме; г — результирующий импульс с амплитудой, в три раза превышающей амплитуду каждого отдельного импульса

Диаграмма направленности является основной характеристикой МР. Она зависит от геометрии МР (числа и расположения микрофонов) и алгоритмов обработки сигналов. На рис. 4 приведены диаграммы направленности эквидистантной восьмиэлементной микрофонной линейки с апертурой  $D = 35$  см,  $d = 5$  см для 1; 2; 4 кГц [10]. Горизонтальная ось — угол прихода акустического сигнала, вертикальная — амплитуда выходного сигнала МР в линейном масштабе.

Ширина луча, формируемого решеткой микрофонов, зависит от частоты излучения цели и расстояния между элементами микрофонной решетки. Поэтому, с точки зрения рационального применения, должна быть обеспечена возможность изменения положения элементов с последующей процедурой калибровки для определения местоположения микрофонов.

Угловое разрешение МР зависит от линейного размера МР, длины волны, направления луча и метода обработки [10, 13]:

$$\Delta\alpha = 1,22 / \cos(\alpha) \times \lambda / D,$$

где  $\Delta\alpha$  — угловое разрешение (радиан);  $D$  — апертура;  $\lambda$  — длина волны;  $\alpha$  — угол направления луча. Пространственное разрешение в плоскости, находящейся на дистанции  $L$ , зави-

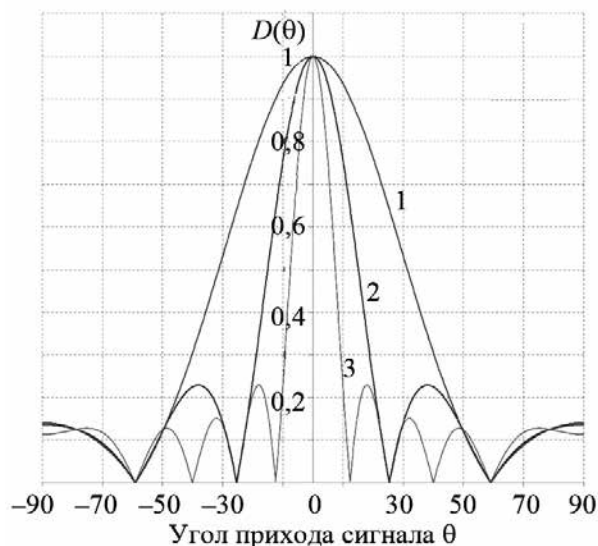


Рис. 4. Зависимость диаграммы направленности эквидистантной восьмиэлементной микрофонной линейки с апертурой  $D = 35$  см,  $d = 5$  см от частоты сигнала: 1 — 1 кГц; 2 — 2 кГц; 3 — 4 кГц

сит от угла направления луча следующим образом [10, 14]:

$$\Delta X(\alpha) = 1,22 / \cos^3(\alpha) \times \lambda L / D.$$

Рассмотрим некоторые примеры применения микрофонных решеток и акустических камер для обнаружения БПЛА.

Технологический институт Стивенса («Stevens Institute of Technology») разработал и построил систему акустического обнаружения дронов (далее система ТИС), которая может обнаруживать, отслеживать и классифицировать БПЛА с использованием акустических характеристик шумов пропеллера. Она состоит из трех и более микрофонных узлов. Микрофонный узел имеет форму тетраэдра с настраиваемым размером (рис. 5). При тестировании сторона тетраэдра составляла около 53 см. Среднее расстояние между узлами 80–120 м. Данные с микрофонов передаются через WiFi в режиме реального времени на центральный компьютер для обработки. Разнесение узлов системы на расстояние 60–120 метров позволяло локализовать БПЛА методом триангуляции.

Система ТИС была исследована в сравнительных испытаниях вместе с другими системами, среди которых были [17]:

- 16-канальная двухрядная перекрестная решетка;
  - 40-канальная фазированная решетка «OptiNav» (рис. 6);
  - параболические и направленные микрофоны.
- В качестве объектов использовались мультироторные БПЛА разных размеров: DJI Phantom 4 (1,3 кг) (рис. 7), DJI Matrice 600 (9,6 кг) (рис. 8), DJI S1000 (9,6 кг) (рис. 9), Inspire 2 (3,4 кг) (рис. 10), Intel Falcon 8+ (1,2 кг) (рис. 11).

Приведем некоторые из результатов исследований. Система ТИС позволяет обнаруживать и определять направление на БПЛА DJI Phantom 4 на расстоянии до 350 м со средней точностью 4 градуса. При низком уровне фонового шума (45–50 дБ) обеспечивалось слежение за БПЛА «DJI S1000» на дальностях до 250 м. В другом эксперименте, проведенном с БПЛА Inspire 2, при более высоком уровне шума (50–60 дБ), предельная дальность составила 200 м.

В исследованиях использовался алгоритм классификации, позволявший обнаружить



Рис. 5. Микрофонный узел системы акустического обнаружения ТИС, развернутый в полевых условиях (слева). Микрофон (справа)



Рис. 6. Акустическая камера OptiNav ACAM 120



Рис. 7. DJI Phantom 4



Рис. 8. DJI Matrice 600



Рис. 9. DJI S1000



Рис. 10. Inspire 2



Рис. 11. Intel Falcon 8+

мультироторный БПЛА по характеристикам звука на расстоянии порядка 100 м.

В таблице приведены сравнительные результаты опытов по определению направлений на БПЛА, полученные с помощью системы ТИС и акустической камеры OptiNav ACAM 120.

Система ТИС позволяет обнаруживать и определять направление на БПЛА DJI Phantom 4 на дальности до 360 м с точностью примерно 4 градуса. Было продемонстрировано слежение за БПЛА на расстояние до 250 м.

В работе [15] приведено описание системы DARA (рис. 12), которая является усовершенствованной версией системы ТИС. Здесь

количество микрофонов в узле было увеличено до семи, изменено программное обеспечение и улучшен алгоритм тестирования для оценки производительности системы. Это позволило увеличить дальность обнаружения в разных экспериментах на величину от 30 до 50 %.

В работе японских исследователей [16] реализован подход к формированию диаграммы направленности МР в двух плоскостях. Для этого была использована крестообразная МР (рис. 13) и описанный выше алгоритм «задержки и суммирования».

На рис. 14 и 15 приведены результаты измерений мощности звукового излучения для

**Дальность определения направления на БПЛА**

Условия эксперимента	Акустическая система	Тип БПЛА	Точность, град	Дальность определения направления, м
Ветер 2–5 м/с, температура 25 °С, фон (45–50 дБА)	ТИС	DJI Phantom 4	3,4	360
Ветер 5–15 м/с, температура 4 °С, фон (45–50 дБА)	ТИС	DJI Matrice 600	4,8	265
	ТИС	DJI S1000	4,1	265
Ветер 2-5 м/с, температура 32 °С, фон (52–60 дБА)	ТИС	Inspire 2	5,5	150
	OptiNav	Inspire 2	5,5	135
	ТИС	Intel Falcon 8+	4,5	145
	OptiNav	Intel Falcon 8+	5,3	135



Рис. 12. Система DARA

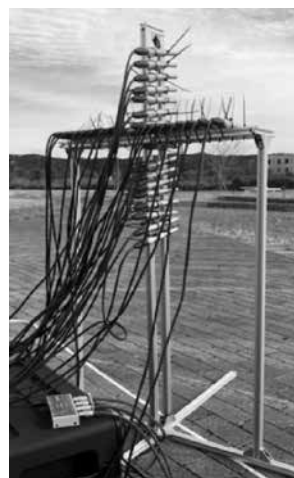


Рис. 13. Крестообразная микрофонная решетка [15]

различных положений БПЛА («DJI Matrice 200»), а также оценки его углового положения в двух плоскостях (кружками отмечены положения максимальной мощности).

Объединение большого количества микрофонов в единую систему может увеличить дальность обнаружения, точность локализации и классификации БПЛА, т.е. значительно повысит вероятность правильного обнаружения угрозы при уменьшении количества ложных срабатываний. На практике это положение реализуется в разработках акустических камер. В качестве примера приведем два из возможных вариантов размещения микрофонов в акустической камере SoundEye (рис. 16 и 17) [17]. Оба варианта состоят из массива микрофонов и размещенной в его центре оптической камеры.

Работа камеры основана на использовании описанных выше алгоритмов «задержки и суммирования» для формирования акустического изображения. Зона обзора камеры составляла  $\pm 44^\circ$  по вертикали и  $\pm 58^\circ$  по горизонтали. Диапазон частот обрабатываемых сигналов от 800 Гц до 12,5 кГц (базовый вариант), от 100 Гц до 12,5 кГц (расширенный вариант). На рис. 18 представлена характеристика направленности акустической камеры в частотном диапазоне от 100 до 1000 Гц (максимальный уровень сигнала регистрируется при угле, равном  $90^\circ$ ). На рис. 19 и 20 приведены фотографии, полученные на дальности 170 м от видеокамеры и с помощью акустической камеры соответственно.

Акустические камеры появились относительно недавно. В настоящее время их стоимость довольно высока (более 10 тысяч долларов) [15].

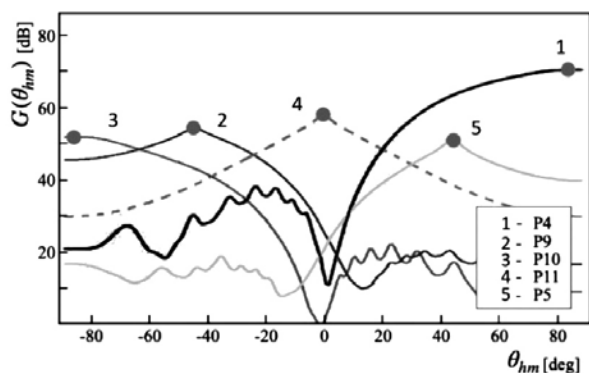


Рис. 14. Результаты измерений мощности звукового излучения в горизонтальной плоскости  $G(\theta_{hm})$  для различных положений (P4, P5, P9 — P11) БПЛА DJI Matrice 200

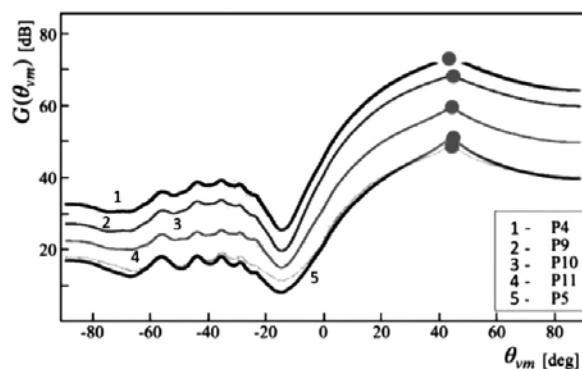


Рис. 15. Результаты измерений мощности звукового излучения в вертикальной плоскости  $G(\theta_{vm})$  для различных положений (P4, P5, P9 — P11) БПЛА DJI Matrice 200

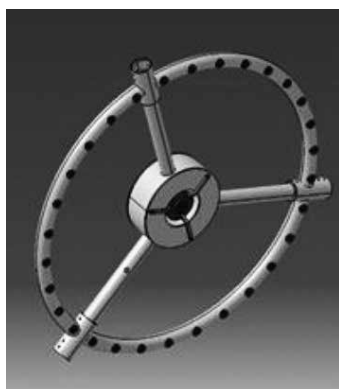


Рис. 16. Базовый вариант акустической камеры «SoundEye» (30 микрофонов)

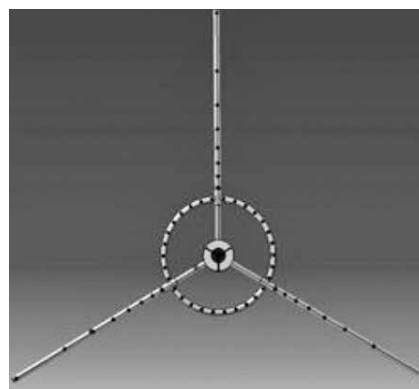


Рис. 17. Расширенный вариант акустической камеры «SoundEye» (54 микрофона)

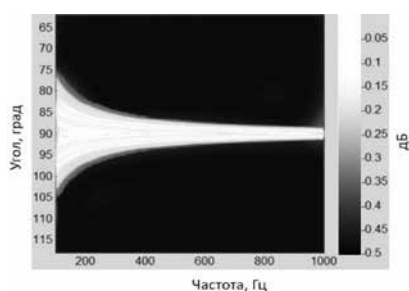


Рис. 18. Характеристика направленности акустической камеры в частотном диапазоне от 100 до 1000 Гц



Рис. 19. Видеоизображение БПЛА на дальности 170 м



Рис. 20. Акустическое изображение БПЛА на дальности 170 м

## Выводы

1. Увеличение количества микрофонов, объединение их в микрофонные решетки позволяет за счет применения алгоритмов «задержки и суммирования» и «фильтрации и суммирования» сформировать диаграмму направленности

акустической системы и повысить дальность обнаружения БПЛА по сравнению с обычными системами акустического наблюдения.

2. Дальнейшим развитием микрофонных решеток являются акустические камеры, способные формировать акустические изображения в реальном масштабе времени.

### Литература

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. СПб.: Изд-во «Наукоемкие технологии», 2020. 204 с.
2. Андрющенко М.С., Голик А.М., Сахнов С.А. Подходы к организации противодействия беспилотным летательным аппаратам // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1 (126). С. 15–21.
3. Сильников М.В., Карпович А.В., Лазоркин В.И. [и др.]. Научно-методическое обоснование способов применения беспилотных летательных аппаратов для разведки и поражения целей: Монография. СПб.: Научно-производственное объединение специальных материалов, 2022. 412 с.
4. Степанов В.В., Андрющенко М.С. Зарубежные средства доставки высокоточного оружия // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3(88). С. 91–96. EDN UIWTVJ.
5. Алешин И.Н., Андрющенко М.С., Куртц Д.В. Защита объектов БТВТ от беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН, в 5-ти т., Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2020 года. М.: ФГБУ «Российская академия ракетных и артиллерийских наук», 2020. Том 3. С. 426–431.
6. Степанов В.В., Алешин И.Н., Андрющенко М.С., Куртц Д.В. Системы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. В 7-ми т., Санкт-Петербург, 31 марта — 03 апреля 2021 года. Москва: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2021. Том 1. С. 327–334.
7. Heutschi K., Ot B., Nussbaumer T., Wellig P. Virtual microphone signals of flying drones. In Proceedings of the NATO STO MSG-SET-183 Specialists' Meeting on Drone Detectability: Modelling the Relevant Signature, Wakefield, MA, USA, 27–29 April 2021.
8. Thirtyacre D., Brookshire G., Callan S., Arvizu B., Sherman P. (2021). Small Unmanned Aircraft Systems Acoustic Analysis for Noninvasive Marine Mammal Response: An Exploratory Field Study // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 8(2).
9. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2017. Вып. 191. С. 181–187.
10. Столбов М.Б. Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 661–675.
11. Фокин Г.А. Анализ работы диаграммообразующей схемы антенной решетки по алгоритму задержки и суммирования в задачах позиционирования / Сб. мат. 78-й Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. Секция 2 «Статистическая обработка сигналов, радиолокация, радионавигация», 2023. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 30–36.
12. Case E.E., Zelnio A.M., Rigling B.D. Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking. 2008. IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, OH, USA, 2008. Pp. 110–113.
13. Peral-Orts R., Velasco-Sanchez E., Campillo-Davo N., Camello-Vicente H. Using microphone arrays to detect moving vehicle velocity // Archives of Acoustics. 2013. V. 38. № 3. Pp. 407–415.
14. Microphone Arrays. Signal Processing Techniques and Applications / Eds. M. Brandstein, D. Ward. Springer Verlag, 2001. 402 p.
15. Kadyrov Daniel et al. Improvements to the Stevens drone acoustic detection system. Proc. Mtgs. Acoust 23 May 2022; 46 (1): 045001.
16. Madokoro, Hirokazu & Yamamoto, Satoshi & Watanabe, Kanji & Nishiguchir, Masayuki & Nix, Stephanie & Woo, Hanwool & Sato, Kazuhito. (2021). Prototype Development of Cross-Shaped Microphone Array System for Drone Localization Based on Delay-and-Sum Beamforming in GNSS-Denied Areas. Drones. 5. 123. 10.3390/drones5040123.
17. Jurica Ivošević, Tomislav Radišić, Mario Muštra, Ivan Bubljić, Ivan Tudor, Darije Varžić (2018) Detecting UAVs Using Acoustic Camera. The Third International Conference on Advances in Signal, Image and Video Processing. 2018. Pp. 56–61.