

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, О.И. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук,
В.А. ПОСОШЕНКО, канд. техн. наук, В.И. КОЛЕСНИК, А.Б. ЕГОРОВ, канд. техн. наук,
Л.П. ТИМОШЕНКО, канд. техн. наук, А.И. КАПУСТА*

ОБНАРУЖЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ СРЕДЫ, СОЗДАВАЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) получили значительное распространение, поскольку способны выполнять широкий спектр полезных для человечества функций. Они используются для контроля различных объектов и обширных территорий, в том числе морских акваторий, получения разнообразной информации о состоянии атмосферы и степени ее загрязнения, доставки грузов, проведения спасательных операций [1, 2] и т.д.

В то же время БПЛА являются источником потенциальных угроз в ряде областей деятельности человека. Грозным оружием БПЛА являются при использовании их организованными преступными группировками, контрабандистами, определенную опасность они могут представлять также при несанкционированном использовании их отдельными злоумышленниками [1, 2].

В последние годы сформировалась актуальная научно-техническая проблема обнаружения и наблюдения БПЛА с целью предотвращения выполнения ими несанкционированных действий. В соответствии с современными представлениями при обнаружении БПЛА используются следующие методы и средства: радиолокационные (как активные, так и пассивные) [3, 4], оптические, инфракрасные [9], акустические [5] методы, а также комплексные системы, в которых осуществляется совместная обработка информации, получаемой с использованием указанных информационных каналов. В данном направлении работают научные и инженерные коллективы во многих странах мира, однако в целом научно-техническая проблема наблюдения БПЛА, особенно малых БПЛА, остается нерешенной: эффективность обнаружения БПЛА с использованием всех указанных методов остается недостаточной, а потребности практики имеющимися средствами удовлетворяются далеко не в полной мере.

Известно, что существующая научно-техническая проблема не может быть решена на том уровне науки и технологий, на котором она порождена. Кроме того, в ряде работ [1, 2] отмечается, что технологии, используемые при проектировании и изготовлении БПЛА, развиваются намного быстрее, чем объективные средства их обнаружения и контроля.

Следовательно, для эффективного решения существующей научно-технической проблемы необходим новый, качественный скачок в развитии методов и средств обнаружения и наблюдения БПЛА.

Основным методом обнаружения БПЛА, обеспечивающим наибольшую дальность обнаружения и наилучшие поисковые возможности, остается активный радиолокационный метод [2 – 4]. Основная трудность радиолокационного наблюдения БПЛА заключается в том, что искомый объект имеет малую эффективную площадь рассеяния (ЭПР) в силу достаточно малых физических размеров, а также вследствие использования специальных технологий при проектировании и изготовлении БПЛА, направленных на уменьшение рассеяния радиоволн.

Процесс обнаружения летательных аппаратов с малым значением ЭПР может быть основан на использовании побочных эффектов, сопровождающих полет летательного аппарата [2, 4]. Это, в частности, инверсный след в атмосфере, акустические возмущения среды, формирование собственного электромагнитного излучения и др.

Определенный интерес представляет исследование возможности обнаружения БПЛА радиолокационным методом при использовании рассеяния радиоволн на акустических возмущениях среды, создаваемых летательным аппаратом. Впервые на принципиальную возможность рассеяния радиоволн на акустических волнах было указано в фундаментальной теоретической монографии [29]. Первый радиолокатор, использующий рассеяние радиоволн на возмущениях атмосферы, создаваемых излучаемой с поверхности земли звуковой волной, был создан в 1961 г. [35]. С тех пор в данной области получено значительное количество разнообразных научных и экспериментальных результатов.

Статья посвящена анализу известных научных и практических результатов для оценки возможности обнаружения БПЛА по радиосигналам, рассеянным на акустических возмущениях среды, создаваемых БПЛА, и формулированию соответствующих научных и технических задач в данной области знаний.

Акустическое излучение БПЛА

Источниками акустического сигнала БПЛА являются двигатель и несущие винты. Исследованию особенностей акустического сигнала, формируемого и излучаемого БПЛА, посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ. Показано, что структура и параметры акустического сигнала БПЛА зависят от вида объекта, его формы, количества двигателей, количества несущих винтов и т.д.

Следует заметить, что исследования акустического поля летательных аппаратов были начаты еще в начале XX века и достаточно интенсивно продолжались в 30-40-е годы прошлого столетия [33, 34]. Исследования выполнялись с целью развития акустического метода обнаружения летательных аппаратов, которые обладали к тому времени достаточно серьезными характеристиками: дальностью, скоростью, высотой полета, полезной нагрузкой.

Однако затем акустический метод обнаружения самолетов был вытеснен радиолокацией, позволившей обеспечить значительно лучшие характеристики по обнаружению летательных аппаратов – дальность, всепогодность и т.д., прежде всего вследствие лучшего распространения радиоволн в атмосфере Земли по сравнению с акустическими волнами.

В то же время необходимо отметить, что уже в указанный период были получены серьезные результаты в теоретическом плане по исследованию формирования акустических волн летательными аппаратами и распространению акустических колебаний в атмосфере, которые не утратили своего значения и в настоящее время. Отметим, что монография [32] представляет собой переиздание книги, впервые увидевшей свет в 1940 г. Определенные успехи в указанный период были достигнуты и в области развития акустической техники – акустических антенн и др. И теперь мы возвращаемся к акустическим методам обнаружения летательных аппаратов уже на новом, более совершенном этапе развития технологий.

Экспериментальные исследования структуры и параметров звукового поля БПЛА в виде квадрокоптера показали, что спектры его акустического излучения содержат ярко выраженные гармонические составляющие, имеющие частоты, кратные частоте вращения винта. Основной тон находится в полосе частот 80 – 240 Гц, а количество гармоник может быть от 10 до 40. Спектр сигнала простирается до частот более 10 – 14 КГц [14].

В режиме полета спектральные линии акустического излучения квадрокоптера размываются вследствие различия режимов работы (частоты вращения) имеющихся четырех двигателей при компенсации автоматикой БПЛА воздействия дестабилизирующих факторов, возникающих в процессе полета. Это фактор может являться одним из информационных признаков классификации БПЛА среди других объектов. Расширение спектральных линий проявляется сильнее при увеличении номера гармоники. Все указанные особенности акустического сигнала БПЛА наблюдаются на спектрограмме рис. 1.

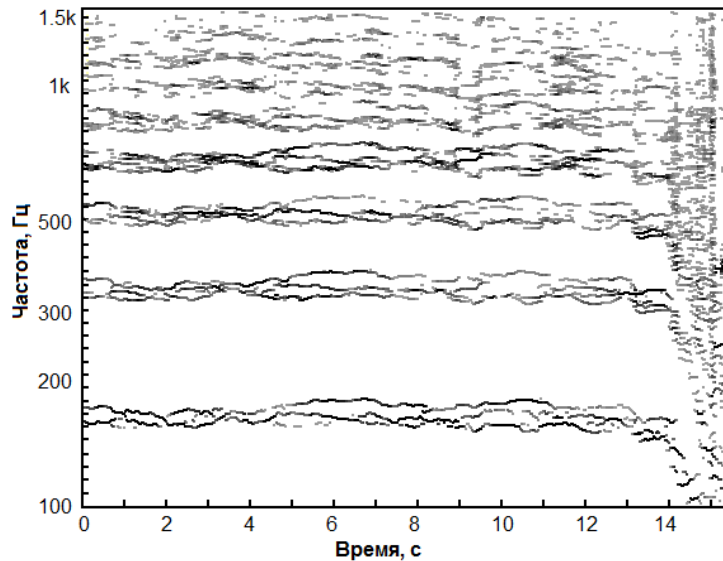


Рис. 1. Спектрограмма акустического сигнала квадрокоптера

Спектральные гармонические составляющие акустического сигнала квадрокоптера шире, чем у моноплана, что объясняется различием режимов работы двигателей в процессе полета или при обработке системой компенсации ветровых возмущений.

По мере увеличения расстояния, прошедшего акустической волной в атмосфере, происходят изменения в спектре акустического излучения (АИ), сопровождающиеся заметным ослаблением высокочастотных составляющих. Изменения формы спектров АИ БПЛА в реальных условиях наблюдения обусловлены дисперсионными свойствами среды, а также изменчивостью характеристик пространственной направленности излучения в полосе частот.

Большое значение для практики имеют диаграммы излучения БПЛА, характеризующие распределение излучаемой акустической энергии по направлениям. В ряде работ рассматривалась пространственная направленность звукового излучения БПЛА, в частности в [10] сделан вывод о том, что в первом приближении БПЛА может считаться изотропным источником излучения.

В то же время эксперименты показывают существенную направленность излучения как отдельных элементов конструкции аппарата – винтомоторной группы, электродвигателей квадрокоптера, так и всей конструкции в целом. Показано, что пространственные распределения как отдельных спектральных (гармонических) составляющих, так и полной энергии (во всем диапазоне частот) являются существенно анизотропными.

Нормализованные характеристики пространственной направленности акустического излучения квадрокоптера DJI Phantom 3 в вертикальной плоскости для первых четырех гармоник лопастной частоты воздушного винта представлены на рис. 2. Анализ представленных результатов показывает, что с повышением номера гармоники происходит усложнение формы характеристики направленности: она становится более изрезанной, увеличивается глубина провалов, уменьшается ширина лепестков и происходит изменение направления основного излучения.

Как видно из рис. 2, различным ракурсам наблюдения БПЛА соответствуют различные уровни спектральных гармонических составляющих излучения, определяемых характеристиками направленности. Из этого следует, что интенсивность акустического излучения в зависимости от угла наблюдения должна описываться некоторым законом распределения вероятностей, а дальность обнаружения БПЛА с использованием акустического метода является величиной статистической, зависящей от ракурса наблюдения.

Звуковые волны, порождаемые БПЛА, являются также источником информации в акустическом методе обнаружения и наблюдения БПЛА, который в настоящее время интенсивно развивается.

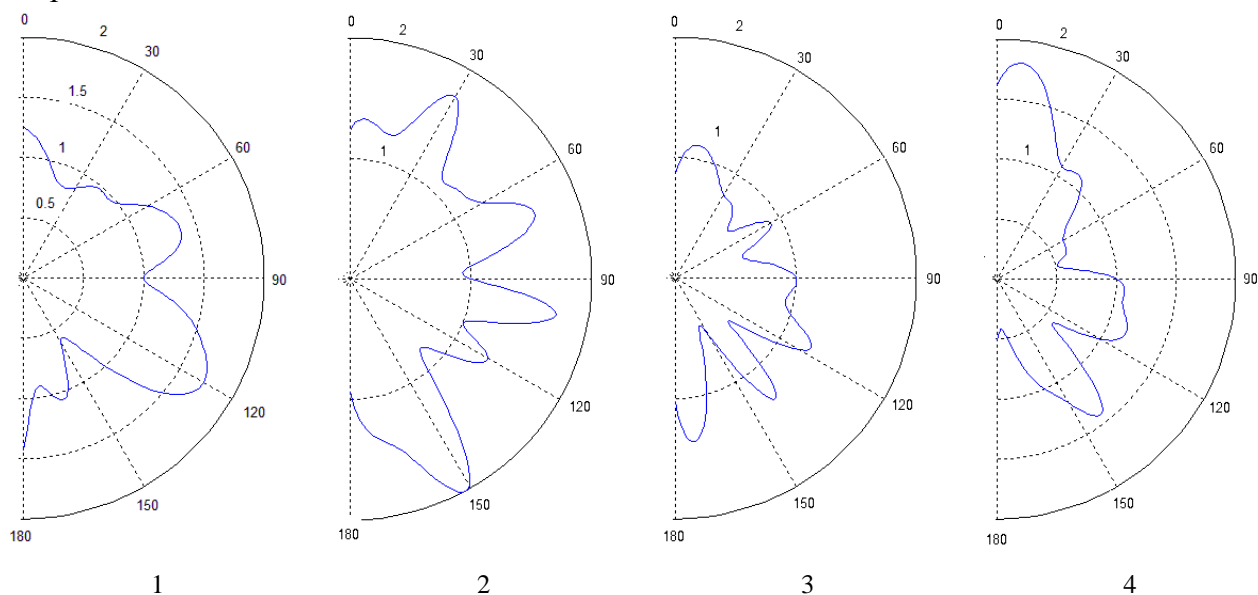


Рис. 2. Нормализованные характеристики направленности акустического излучения квадрокоптера DJI Phantom 3 в вертикальной плоскости на гармониках лопастной частоты винта: 1 – 1-я гармоника, 2 – 2-я гармоника, 3 – 3-я гармоника, 4 – 4-я гармоника

Теоретические и экспериментальные результаты рассеяния радиоволн на звуковых волнах

При радиолокации, распространяющейся в атмосфере звуковой волны, получение отраженного сигнала становится возможным в силу частичного отражения радиоволны от акустических колебаний, которые, распространяясь в атмосфере, модулируют плотность воздуха и, следовательно, создают неоднородности диэлектрической проницаемости.

В борновском приближении – приближении однократного рассеяния, выражение для рассеянного радиосигнала имеет вид

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = \frac{k_e^2}{4\pi} \int_V \frac{\exp\{jk_e|\vec{r} - \vec{r}'|\}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \varepsilon_{\approx}(\vec{r}') [\vec{n} [\vec{E}_0(\vec{r}') \vec{n}]] d^3\vec{r}', \quad (1)$$

где $\vec{E}_1(\vec{r})$ – рассеянное поле в точке \vec{r} ; $\varepsilon_{\approx}(\vec{r}')$ – переменная составляющая поля диэлектрической проницаемости; k_e – волновое число падающей электромагнитной волны; $\vec{E}_0(\vec{r}')$ – падающее на рассеивающий объем V электромагнитное излучение; $\vec{n}(\vec{r}, \vec{r}')$ – единичный вектор, направленный из переменной точки интегрирования \vec{r}' (точки рассеяния) в точку наблюдения.

Начало координат здесь совмещено с центром рассеивающего объема. Двойное векторное произведение, стоящее в подынтегральном выражении (1), описывает векторное сложение в точке приема волн, приходящих под различными углами.

Поле диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\vec{r}', t)$ в задаче рассеяния радиоволн на звуке представляется в виде

$$\varepsilon(\vec{r}', t) = \varepsilon_1(\vec{r}', t) + \varepsilon_s(\vec{r}', t), \quad (2)$$

где $\varepsilon_1(\vec{r}', t)$ – собственная диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_s(\vec{r}', t)$ – составляющая диэлектрической проницаемости, порожденная звуком.

В реальной атмосфере обычно всегда выполняется неравенство $\langle |\varepsilon_s| \rangle \ll 1$. Это позволяет получать решение задачи в приближении однократного рассеяния. Регулярный компонент диэлектрической проницаемости $\langle \varepsilon_1 \rangle$ с достаточной степенью точности можно считать равным единице, а турбулентные флуктуации много меньше единицы и на несколько порядков меньше величины $|\varepsilon_s|$ [35].

Влиянием турбулентных флуктуаций диэлектрической проницаемости на распространение радиоволн можно пренебречь, поэтому атмосферная турбулентность входит в окончательные формулы только через флуктуации величины ε_s . С учетом изложенного, не конкретизируя вид функции $\varepsilon_s(\vec{r}', t)$, выражение для диэлектрической проницаемости среды запишем в виде

$$\varepsilon(\vec{r}', t) \approx 1 + \varepsilon_s(\vec{r}', t). \quad (3)$$

Достаточный для обработки и регистрации уровень отраженного радиосигнала может быть получен только в случае выполнения некоторых условий. Во-первых, необходимо отражение от «цуга» акустических волн длиной $N_s \lambda_s$, при $N_s \gg 1$, во-вторых, требуется выполнение условия Брэгга

$$\lambda_e = 2\lambda_s \sin \theta, \quad (4)$$

где λ_e – длина электромагнитной волны; N_s – количество периодов (длин волн) акустической неоднородности, участвующих в формировании рассеянного радиосигнала; λ_s – длина волны акустических колебаний; θ – угол между фронтом акустической волны и направлением распространения радиоволны.

Выполнение условия Брэгга приводит к тому, что радиоволны, отраженные от различных участков акустического цуга, складываются синфазно и амплитуда суммарного отраженного радиосигнала увеличивается.

Впервые на принципиальную возможность рассеяния радиоволн на акустических волнах было указано в фундаментальной теоретической монографии [29]. Теоретические и экспериментальные основы развития атмосферной акустики были заложены трудами ученых Обухова А.М. [27], Каллистратовой М.А. [28], Татарского В.И. [29, 30].

Длина радиоволны первой экспериментальной радиоакустической системы зондирования атмосферы ЕМАС [35], созданной в 1961 г., составляла $\lambda_e = 3$ см, длина акустической волны – $\lambda_s = 1,5$ см, а максимальная дальность действия – 30 м. Полученная дальность разочаровала исследователей и следующая разработка появилась только в 1972 г., когда была выяснена причина малой дальности зондирования – значительное затухание высокочастотных акустических волн в атмосфере. Установка называлась RASS и имела следующие параметры [54, 58]: $\lambda_e = 8,15$ м; $\lambda_s = 4,075$ м. С помощью этой установки удалось получить отраженный сигнал с высоты 1,5 км, но минимальная высота зондирования составляла 600 м, а пространственная разрешающая способность – 200 м.

В большинстве последующих установок радиоакустического зондирования атмосферы [33, 35] применялись импульсное акустическое излучение и непрерывное монохроматическое радиоизлучение, использовались отдельные, разнесенные на некоторое расстояние приемная и передающая радиоантенны (рис. 3). Передающая акустическая антенна, как правило, располагается посередине между радиоантеннами. Такая схема расположения антенн в сово-

купности с указанной комбинацией зондирующих радио- и акустического сигналов (схема построения системы) получила название «основной».

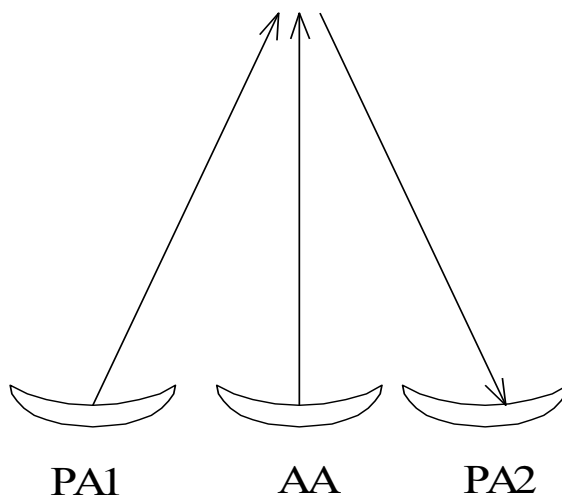


Рис. 3. Схема расположения антенн станции радиоакустического зондирования атмосферы: PA1 – передающая радиоантенна; AA – акустическая антенна; PA2 – приемная радиоантенна

К середине 80-х годов, когда сформировались принцип построения и структура доплеровской радиоакустической системы (РАС), в мире насчитывалось около 10 работающих установок РАЗ, большинство из которых были построены по основной схеме [35].

Все имевшиеся к тому времени системы (кроме ЕМАС и РАЗ-10) были стационарными. В качестве передающих и приемных радиоантенн чаще всего использовались параболические зеркальные антенны, в качестве акустических излучателей – решетки динамиков.

Отметим, что в бывшем Советском Союзе, а ныне в Украине исследования метода и систем радиоакустического зондирования (РАЗ) наиболее интенсивно проводились (и проводятся) именно в Харьковском институте радиоэлектроники (теперь ХНУРЭ). За период с 1965 по 2003 г. здесь созданы пять экспериментальных установок радиоакустического зондирования, в том числе первая в Европе, и выполнен большой объем атмосферных и аппаратных исследований [33, 37, 38].

Сегодня станции радиоакустического зондирования атмосферы разрабатываются в ряде стран отдельными научными коллективами для выполнения экспериментов по исследованию атмосферы, а также производятся некоторыми научно-производственными фирмами небольшими сериями [37, 38].

Радиоакустический метод обнаружения БПЛА

Радиоакустический метод локации БПЛА заключается в излучении зондирующего радиосигнала в исследуемую область пространства, приеме рассеянных на звуке радиосигналов, их обработке, и обнаружении принимаемых сигналов, свидетельствующих о наличии в сканируемой области пространства беспилотного летательного аппарата. Процесс зондирования пространства, рассеяния радиоволн, излучаемых радиолокационной станцией, на возмущениях среды, создаваемых акустическими волнами летящего БПЛА, представлен на рис. 4.

Излученный БПЛА звуковой сигнал сохраняет значительную интенсивность на расстоянии в несколько сотен метров, поэтому обнаружение некоторой возмущенной этим сигналом области позволит фактически обнаружить сам летательный аппарат, поскольку данное расстояние при достаточно больших удалениях БПЛА не является значительным.

Как показано выше, БПЛА излучает акустические волны в диапазоне частот от сотен герц до 10 – 15 кГц. Диапазон радиоволн, в котором может быть получен рассеянный радиосигнал, соответствующий указанному диапазону акустических волн, простирается от

$\lambda_e = 6,8$ м (соответствует частоте акустического сигнала $f_s = 100$ Гц ($\lambda_s = 3,4$ м)) до $\lambda_e = 5,4$ см (что соответствует частоте акустического сигнала $f_s = 15$ кГц ($\lambda_s = 2,7$ см)).

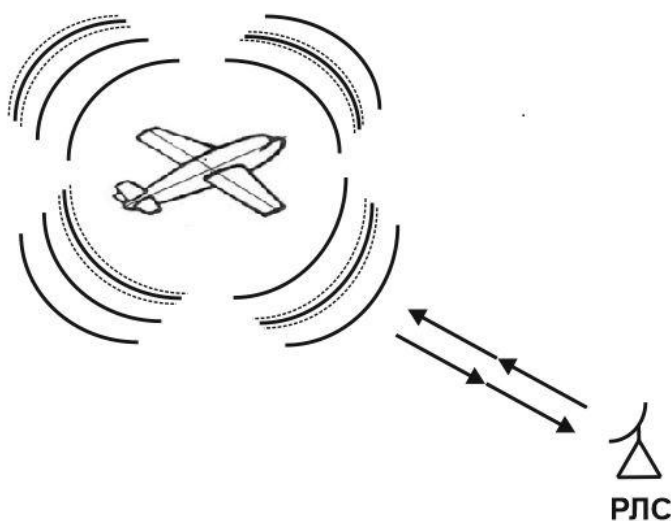


Рис. 4. Рассеяние радиоволн, излучаемых РЛС, на возмущениях среды, создаваемых акустическими волнами БПЛА

Выражение (1), описывающее рассеянный на звуке радиосигнал, является достаточно сложным, что затрудняет его использование на практике [37, 38]. При решении конкретных прикладных задач целесообразно иметь более простую, адекватную математическую модель, которая позволяла бы определять основные свойства и характеристики радиосигнала, рассеянного на звуковых волнах, порождаемых БПЛА.

В соответствии с изложенным при проведении последующих научных исследований в данном направлении необходимо разработать конструктивные математические модели, описывающие процесс рассеяния, и исследовать свойства радиосигналов, рассеянных на акустических волнах БПЛА: их спектральный состав сигналов, структурные особенности, энергетические свойства. Необходимо также разработать методы обработки радиосигналов, рассеянных на звуковых волнах БПЛА, с целью обнаружения принимаемых сигналов.

Выводы

1. Принципиальная возможность обнаружения беспилотных летательных аппаратов по радиосигналам, рассеянным на акустических возмущениях среды, создаваемых летательными аппаратами, вытекает из известных теоретических и экспериментальных результатов. С теоретических позиций вопрос рассеяния радиоволн на акустических волнах обоснован и достаточно детально проанализирован в трудах Татарского В.И., Каллистратовой М.А. и др. [28 – 30; 35].

На практике явление рассеяния радиоволн на звуке используется при построении станций радиоакустического зондирования атмосферы, позволяющих определять ряд важных характеристик атмосферы – температуру, скорость ветра, определяющих ее состояние.

2. Вопрос формирования и излучения акустических волн беспилотными летательными аппаратами, прежде всего их двигателями и несущими винтами, также достаточно обстоятельно исследован с теоретических и экспериментальных позиций. Исследованы их структура, интенсивность, спектральный состав, пространственная направленность. Акустические волны, излучаемые БПЛА, в соответствии со своими характеристиками могут быть источником рассеянных на них электромагнитных волн.

3. При проведении последующих исследований в данном направлении необходимо исследовать свойства радиосигналов, рассеянных на акустических волнах БПЛА: их структурные, частотные, энергетические, пространственные особенности, а также разработать методы

обработки радиосигналов, рассеянных на звуковых волнах БПЛА, с целью обнаружения принимаемых сигналов.

Список литературы:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
3. Вишневецький С. Д., Бейліс Л. В., Климченко В. Й. Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативного-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів // Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ. 2017. С. 92–98. DOI: 10.30748/nitps.2017.27.18.
4. Карташов В.М., Ситнік О.В. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
5. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 235-243.
6. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 78, Issue 9. P. 771-781.
7. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 16. // Biometrics: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications; Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.), IGI Global, 2017; pp. 361-381.
8. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez. IGI Global, 2016. 341p.
9. Koryttsev I., Sheiko S., Kartashov V., Zubkov O., Oleynikov V., Anohin M., Selieznov I. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. 5 p.
10. Massey K., Gaeta R. Noise Measurements of Tactical UAVs. // Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010, pp. 1–16.
11. Marino L., Experimental analysis of UAV-propellers noise // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University «La Sapienza», Rome, Italy, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010; pp. 1–14.
12. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of the propellers for small UAV. // Applied Acoustics, 74 (2013); pp. 79–88.
13. N. Intaratep W. Alexander N., Devenport W. J., Grace S. M., Dropkin A. Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions // Aeroacoustics Conferences 30 May – 1 June, 2016, Lyon, France, 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; pp. 1–6.
14. 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. 2017. Вып. 191. С. 181-187.
15. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. V. 75, Iss. 20. pp.1885–1892. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i20.80.
16. Mezei J., Molnár A. Drone sound detection by correlation // Proceedings of the 2016 IEEE 11th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI); Timisoara, Romania. 12–14 May 2016; pp. 509–518. DOI: 10.1109/SACI.2016.7507430.
17. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L. Drone detection by acoustic signature identification. Electron. Imaging. 2017;2017:60–64. doi: 10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168. DOI: <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2017.10.IMAWM-168>.
18. Liu H., Wei Z., Chen Y., Pan J., Lin L., Ren Y. Drone detection based on an audio-assisted camera array // Proceedings of the 2017 IEEE Third International Conference on Multimedia Big Data (BigMM); Laguna Hills, CA, USA. 19–21 April 2017; pp. 402–406. DOI: 10.1109/BigMM.2017.57.
19. Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T., Lee K., Kolodzy P.J., Slater J.C., Scherreik M., Sam M., Gallagher J.C., et al. Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type unmanned aerial vehicles (uavs) // Proceedings of the 2015 IEEE SENSORS; Busan, Korea. 1–4 November 2015; pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370533.
20. Vasilchenko A., Kartashov V.M. Analysis of influence exerted by longitudinal Doppler effect upon output signal of sodar antenna array // Telecommunications and Radio Engineering, Volume 66, Issue 9; pp. 841–847. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v66.i9.50.
21. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array // Electrical Engineering, Wright State University, 2007. 55 p.
22. Kozeruk S.A., Korzhyk A.V. Identification of small aircraft by acoustic radiation // Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radiobuduvannya. 2019. Iss. 76. pp. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.80.30-46>.

23. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R. Acoustics signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // *Eronautical DEF SCI J.* 2001. Vol. 51, №3. pp. 279–283.
24. Тихонов В.А., Карташов В.М., Олейников В.М., Леонидов В.И., Тимошенко Л.П., Селезнев И.С., Рыбников Н.В. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения // *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування.* 2020. Вип. №81, С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.38-46>.
25. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Korytsev I., Sheiko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // *2019 International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications – Science and Technology, PIC S and T 2019 – Proceeding»*, 2019; pp.175–178. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061337.
26. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles // *Telecommunications and Radio Engineering*, V. 79, №9. 2020, pp.769–780. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i9.40.
27. Обухов А.М. О рассеянии звука в турбулентном потоке // *Доклады АН СССР.* 1941. Т.30, №7. С.611 – 614.
28. Каллистратова М.А. Экспериментальное исследование рассеяния звуковых волн в атмосфере // *Атмосферная турбулентность.* Москва : Изд. АН СССР, 1961. С.203 – 258.
29. Татарский В.И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. Москва : Изд. АН СССР, 1959. 331 с.
30. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. Москва : Наука, 1967. 548 с.
31. Marschall J.M., Peterson A.M., Barnes A.A. Combined radar acoustic sounding system // *Appl. Opt.* 1972. Vol.2, №1. P. 108 – 112.
32. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. Москва : Наука, 1981. 207 с.
33. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли ; под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков : Бизнес Информ, 2002. 426 с.
34. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.
35. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 200 с.
36. Карташов В.М., Куля Д.Н., Кушнер М.В., Толстых Е.Г. Выбор модели изменения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы // *Радіотехніка.* 2013. №173. С. 63–78.
37. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
38. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2011. 234 с.

Поступила в редколлегию 21.09.2021

Сведения об авторах:

Карташов Владимир Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем; Украина, e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Харченко Оксана Игоревна – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем Украина; e-mail: oksana.kharchenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1553-0966>

Посошенко Виталий Александрович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: vitalii.pososhenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0867-9161>

Колесник Виктория Ивановна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ассистент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: viktoria.kolisnyk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-9124>

Егоров Андрей Борисович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры информационно-измерительных технологий, Украина; e-mail: andriy.yegorov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8528-6428>

Тимошенко Леонид Петрович – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: leonid.tymoshenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1924-5908>

Капуста Анастасия Игоревна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина; e-mail: anastasiia.kapusta@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2206-1552>