

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.А. ПОСОШЕНКО, канд. техн. наук,
В.В. ВОРОНИН, канд. техн. наук, В.И. КОЛЕСНИК, А.И. КАПУСТА,
Н.В. РЫБНИКОВ, Е.В. ПЕРШИН*

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ-РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ, АКУСТИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ И ИНФРАКРАСНЫХ СИГНАЛОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Введение

Одна из актуальных задач заключается в защите разнообразных объектов от воздействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), несущих потенциальную угрозу в военной, хозяйственной и повседневной областях деятельности человека [1, 2]. Относительно невысокая стоимость БПЛА и трудности их наблюдения и контроля приводят к повышению безнаказанности и массовости противоправных действий с их использованием [1 – 3]. Для решения задачи обнаружения, распознавания и измерения координат беспилотных летательных аппаратов используются оптический, инфракрасный, радиолокационный и акустический методы и соответствующие средства [3].

Каждый из известных методов имеет свои достоинства, недостатки и ограничения, характеризуется некоторой областью возможностей, которая определяет множество измеряемых параметров с соответствующими точностными характеристиками и пространственно-временным разрешением, диапазоном дальностей и т. д. Поскольку области возможностей различных методов не совпадают, то появляется предпосылка совместного использования систем различного вида для повышения эффективности их функционирования [4].

Операции измерения координат во всех информационных каналах предшествует задача обнаружения. Известные методы энергетического обнаружения сигналов БПЛА недостаточно эффективны, поскольку операция выполняется, как правило, на фоне разнообразных помех, имеющих определенные структурные сходства с сигналом БПЛА. Вследствие этого задача обнаружения БПЛА на фоне ему подобных объектов на практике во всех рассматриваемых информационных каналах реализуется как задача «обнаружения-распознавания», т.е. при решении задачи обнаружения принимается во внимание наличие некоторых информативных признаков у принимаемого сигнала.

В настоящее время имеется большое количество публикаций, посвященных описанию систем, работающих на разных физических принципах, которые предназначены для обнаружения и наблюдения БПЛА на фоне разнообразных помех и различных объектов, сходных по ряду признаков с БПЛА. В обширной литературе по данному вопросу рассматриваются различные методы приема, обработки информационных сигналов и их последующего интеллектуального анализа. В соответствии с этим актуальной является задача анализа, обобщения и систематизации имеющихся в литературе данных.

Данная статья является обзорной и посвящена анализу возможностей каждого из рассматриваемых методов обнаружения, измерения координат и параметров движения БПЛА, а также комплексной обработке информации, получаемой по каждому из каналов.

Радиолокационный метод

Радиолокационные станции (РЛС) являются традиционным, широко распространенным средством для обнаружения летательных аппаратов. По сравнению с другими методами данная технология позволяет обнаруживать объекты на значительных удалениях (десятки километров), при этом состояние окружающей среды не оказывает определяющего влияния на дальность и основные тактические характеристики станций.

Разработана широкая номенклатура РЛС для решения разнообразных задач при работе по летательным аппаратам [5], имеющим значительную эффективную площадь рассеяния (ЭПР), однако они малопригодны для обнаружения БПЛА. Для наблюдения за специфическими целями потребовалась разработка специализированных РЛС для отделения БПЛА от птиц, имеющих схожие с БПЛА радиолокационные характеристики. Возможности распознавания и деления обнаруживаемых целей на подклассы у классических РЛС достаточно слабые, в то время как у специализированных РЛС по обнаружению БПЛА эти качества являются определяющими.

РЛС, предназначенные для обнаружения БПЛА, являются активными, т.е. они излучают зондирующий сигнал, и получают полезную информацию из сигнала, отраженного от объектов и поступающего на вход. Используются различные виды зондирующего сигнала – импульсный когерентный (в том числе с малой скважностью), непрерывный (в том числе с непрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом). Реализуются различные методы обзора – параллельный, а в РЛС кругового обзора – последовательный.

Наиболее распространенная характеристика радиолокационного сигнала РЛС для обнаружения БПЛА – микродоплеровская сигнатура (МДС). МДС широко используется для классификации разнообразных целей при решении различных задач, в том числе в последнее время для классификации БПЛА. Статистические характеристики МДС описывают вращение лопастей винта беспилотного летательного аппарата или вертолета, работу турбин реактивного двигателя, взмах крыльев птиц. В литературе рассматриваются различные методы обработки сигналов при получении сигнатуры, процесса формирования информативных признаков и непосредственно работы классификатора.

Авторы [6, 7] предложили формировать МДС с использованием спектрограммы (на основе кратковременного преобразования Фурье (STFT) [6] и кепстрограммы [7]. Они сосредоточили внимание на формировании признаков, позволяющих выделять из сигнала радара такие характеристики как скорость вращения и наклон лопастей, диаметр и количество винтов, с целью классификации винтовых БПЛА. В [8] предложено использовать кратковременное преобразование Фурье (STFT) и извлекать собственные векторы из корреляционной матрицы МДС в качестве признаков для обучения трех классификаторов: линейного, нелинейного метода опорных векторов и байесовского классификатора, с целью классификации десяти различных винтовых БПЛА и птиц.

В [9] использовалась процедура обработки, аналогичная [8], с последующим применением декомпозиции сингулярных значений (SVD) к спектрограмме. Авторами предложены три основные функции, позволяющие классифицировать скорость цели, периодичность спектра и ширину спектра.

В [10] предложено использовать двумерное регуляризованное комплексное логарифмическое преобразование Фурье и объектно-ориентированную методику уменьшения размерности сигнала с целью повышения информативности и надежности подпространства, специально разработанного для решения задачи распознавания БПЛА на фоне птиц.

В [11] использовался метод эмпирической модовой декомпозиции: полученный сигнал раскладывался на набор осциллирующих колебаний, из которых формировались восемь статистических и геометрических признаков. Использовался нелинейный метод опорных векторов (SVM), который обеспечил более высокие результаты выявления БПЛА, чем в [8].

РЛС кругового обзора для обнаружения БПЛА имеет вращающуюся вкруговую антенну и обеспечивает хорошие поисковые возможности при обнаружении объектов, а также для измерения их координат, но время облучения целей в этом случае получается достаточно малым в силу специфики их работы, что не позволяет формировать МДС. В этом случае классификация объектов осуществляется на основе признаков, описывающих движение цели – траекторной информации.

Авторы [11] использовали выходные данные РЛС кругового обзора, вероятностные модели движения целей, учитывающие направление и скорость движения, а также применяли

фильтр Калмана для сглаживания получаемых оценок. Далее осуществлялся анализ вероятностей описания с помощью используемых моделей наблюдаемых траекторий перемещения БПЛА и птиц. Эффективность предложенных алгоритмов подтверждена результатами компьютерного моделирования и с использованием реальных данных.

В [11] задача классификации БПЛА и птиц по данным РЛС кругового обзора решалась путем формирования девяти поляриметрических параметров, а также использованием алгоритма нахождения ближайшего соседа. Показано, что высокая вероятность правильной классификации может быть достигнута даже без учета признаков, отображающих движение объектов.

В [11] используется двухкоординатная РЛС кругового обзора с непрерывным линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом (LFMCW). Рассматривается двухэтапный процесс автоматической классификации целей: вначале БПЛА отделяются от всех иных объектов (люди, самолеты, автомобили, птицы), а затем БПЛА разделяются на два класса – винтовые и невинтовые. Алгоритм классификации использует набор параметров, основанных на радиолокационной сигнатуре (отношение сигнал-шум (SNR) и траекторная информация (включая информацию о скорости). Используется оптимизированный классификатор SVM, обученный по трем различным схемам. Результаты проведенных экспериментов показали высокую точность решения задачи на обоих этапах, особенно на первом этапе – отделения БПЛА от остального мира.

В последнее время все большее распространение получают методы машинного обучения, применяемые в различных областях, в том числе в области обработки изображений, видео- и аудио-. Применительно к решению разнообразных радиолокационных задач эти достижения скромнее, что связано, прежде всего, с необходимостью использования достаточно представительного массива входных данных для обучения. Кроме того, радиолокационные данные являются достаточно специфическими, и для их использования в системе машинного обучения требуется соответствующая обработка и интерпретация радиолокационных сигналов с целью извлечения необходимой тонкой пространственно-временной радиофизической информации об объектах. Подобная интерпретация сигналов может быть выполнена только соответствующими специалистами.

Несмотря на сложности, методы машинного обучения находят в последнее время все большее применение для обработки радиолокационных данных в различных задачах, в том числе применительно к БПЛА. Основная задача заключается в формировании спектра отраженного сигнала БПЛА, формировании МДС объекта и последующем использовании полученных данных в обучаемой сети.

Авторы [12], используя РЛС с непрерывным частотно-модулированным зондирующим сигналом, получили спектры БПЛА, предложили метод улучшения МДС и провели экспериментальные исследования с различным типами БПЛА, используя GoogleNet.

В [13] с помощью РЛС с непрерывным зондирующим сигналом в S диапазоне были получены функции спектральной корреляции (SCF) БПЛА, отображающие доплеровские особенности целей. Полученные в эксперименте результаты сопоставлялись с четырьмя эталонными SCF, далее осуществлялось их взвешивание и подача на вход глубокой сети доверия (DBN).

В [13] предложен метод обнаружения БПЛА на основе анализа спектра с помощью сверхточной нейронной сети CNN. При этом использовались различные окна для доплеровских спектров целей, на фоне разнообразных помех и при различных отношениях сигнал-шум. Осуществлялось перемещение окна в диапазоне значений доплеровской частоты и решалась задача обнаружения БПЛА на фоне помех.

Аналогичная задача – классификация типов БПЛА путем анализа доплеровских спектров БПЛА с использованием DNN (CNN) решалась в [36]. Эксперименты, проведенные в X диапазоне радиоволн, показали хорошие результаты.

В [13] выполнялось обучение сети непосредственно по отраженному сигналу, поступающему с выхода РЛС и представленному в комплексном виде. Нейронная сеть, состоящая из пяти отдельных ветвей, обучалась на наличие винтов у БПЛА, а затем определялось количество лопастей. Качество решения задачи в значительной степени зависит от отношения сигнал-шум.

Оптический метод

Известно значительное количество публикаций, в которых рассматриваются вопросы обнаружения БПЛА с использованием видеокамер видимого диапазона волн. При этом в качестве детектора, выносящего решение об обнаружении-распознавании БПЛА, используются, как правило, нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения, что было обусловлено успехами алгоритмов в классификации изображений по наборам данных базы ImageNet. Предварительно происходит обучение сети [14], как правило, с использованием данных о БПЛА из общедоступной базы ImageNet.

Большое количество экспериментов с использованием сетей глубокой нейронной сети DNN проведено авторами, в которых наилучшие результаты показала сеть VGG-16 [15, 16]. Результаты экспериментов также показывают, что наличие птиц увеличивает количество ложных срабатываний и для повышения эффективности работы алгоритмов предлагается не исключать птиц из видео, используемых в процессе обучения, что позволит обучить систему и выявлять тонкие различия между птицами и БПЛА.

Изображения БПЛА, птиц, а также некоторые фоновые изображения представлены на рис. 1 [35].

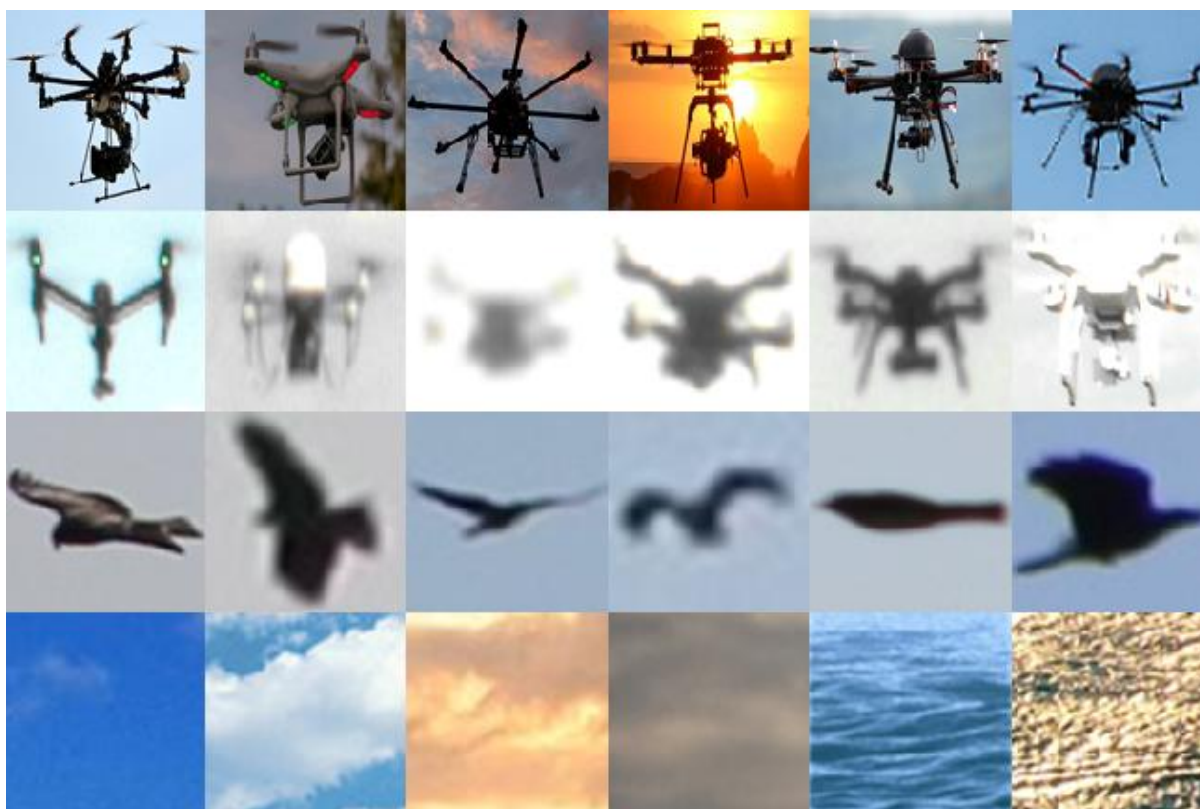


Рис. 1. Изображения БПЛА (первый и второй ряд), изображения птиц (третий ряд), фоновые изображения (четвертый ряд)

В работах [17 – 19, 79, 80, 81] рассмотрены новые подходы к обработке изображений, вероятностные характеристики различных объектов.

Авторами [20] предложена сеть на основе сверточной сети VGG в сочетании с RPN для целей обнаружения-распознавания БПЛА и птиц. Авторы подготовили обширную базу изображений птиц, БПЛА и фотографий фона, заимствованных из Интернета, провели обучение сети с использованием этих данных и пришли к выводу, что использование более разнообразных данных в процессе обучения обеспечивает лучшие результаты обнаружения-распознавания объектов.

В [21] предлагается перед основным классификатором расположить U-сеть, выполняющую функции предварительной обработки совокупности последовательных кадров и выделения областей движения в изображениях, которые могут содержать БПЛА. Далее выделенные области обрабатываются основной сетью, выносящей окончательное решение. В статье [22] также используется модуль предварительной обработки изображений, построенный на основе сети глубокого обучения с использованием метода SISR (Single image super-resolution – сверхвысокое изображение одиночного изображения), позволяющий существенно увеличить разрешение изображения, поступающего с видеокамеры. Это позволяет улучшить качество обнаружения и увеличить максимальную дальность, на которой может быть выявлен БПЛА.

В работе [23] при обнаружении БПЛА использовались традиционные методы компьютерной обработки изображений, основанные на сопоставлении исходного и образцового изображений и формировании функции взаимной корреляции. Для уменьшения влияния освещенности на качество обнаружения применялась морфологическая фильтрация, позволяющая расширить возможности обнаружения БПЛА в различных условиях, особенно при достаточно ярких и темных изображениях БПЛА.

В [24] также используются традиционные методы обработки, такие как формирование гистограммы градиентов, для описания малых БПЛА. Кроме того, при проведении машинного обучения применялся каскадный метод классификации для вынесения ряда последовательных оценок на нескольких этапах, характеризующихся все более сложным набором признаков. Если все этапы пройдены успешно, то объект считается обнаруженным. Алгоритм регрессии опорных векторов (SVR) обучался для сетки различных расстояний с целью вынесения оценки дальности до БПЛА при его обнаружении.

Ряд алгоритмов обработки изображений, основанных на методах компьютерного зрения, изложены в работах [25 – 28].

В [29] задача обнаружения БПЛА решается по видеопотоку стационарной видеокамеры. Обработка изображения состоит из этапов обнаружения движущихся объектов и классификации этих объектов с использованием нейросети. При обнаружении БПЛА использованы методы выделения движущихся объектов на неподвижном фоне и анализа истории движения. Для классификации движущихся объектов создана и обучена модель нейросети, позволяющая классифицировать 12 типов подвижных объектов. Проверка работы алгоритма выполнена с использованием экспериментальных видеоданных.

В [30] использовалась сверточная нейронная сеть класса YOLO для детектирования БПЛА на изображениях, которая обеспечивает достаточно быстрое и качественное решение задачи. В статье приведен новый набор данных, который может быть использован для обучения нейронных сетей. Данные получены путем отделения БПЛА от фона на имеющихся изображениях и добавлением изображения БПЛА к различным естественным изображениям с разнообразным и сложным фоном. Созданная база данных позволяет производить глубокое обучение сетей при использовании БПЛА, находящихся в разных условиях и на различных дальностях.

Инфракрасный метод

Видеокамеры инфракрасного диапазона или тепловизионные датчики работают в невидимом диапазоне электромагнитных волн, как правило, в длинноволновом инфракрасном диапазоне с длиной волны 9 – 14 мкм, и принимают излучение, формируемое нагретыми

объектами или отдельными элементами их конструкции. Основным достоинством инфракрасных тепловизионных видеокамер является возможность визуализации окружающего мира и определенных объектов независимо от степени освещения (даже в условиях полной темноты) и погодных условий [31]. Тепловизионные камеры обладают худшим разрешением, чем камеры видимого диапазона, но более устойчивы к изменениям освещенности. Они также более дороги, чем камеры видимого диапазона волн.

Изображения БПЛА, полученные с помощью тепловизионной камеры [35], представлены на рис. 2.

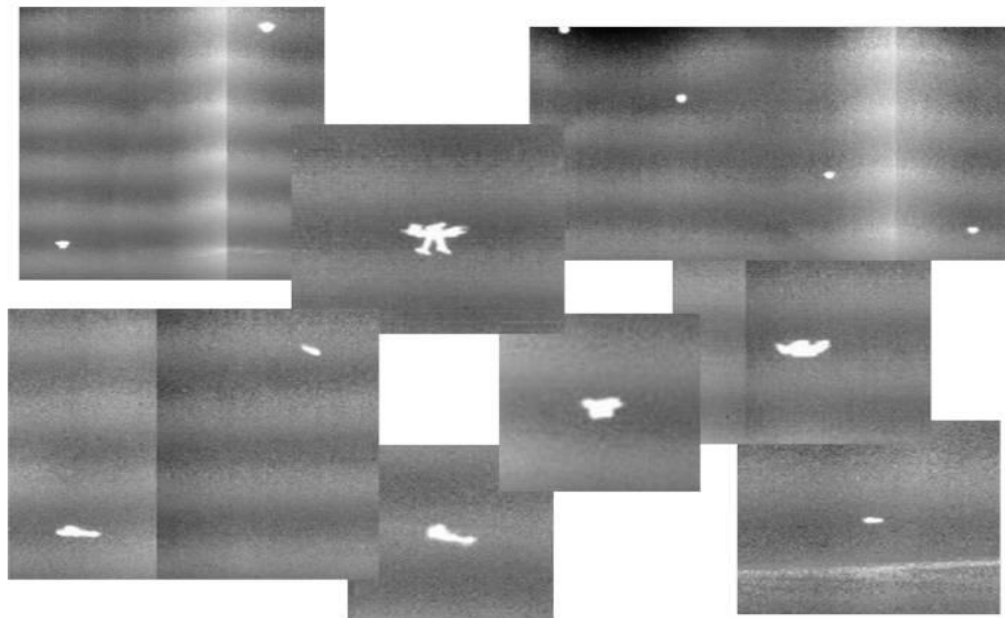


Рис. 2. Изображения БПЛА, полученные с помощью тепловизионной камеры

В [32, 84] исследовалась возможность обнаружения БПЛА при неблагоприятной фоновой обстановке – на фоне деревьев при колеблющейся листве. В [33] выполнено сравнение эффективности обнаружения дронов с использованием тепловизионных камер различных участков инфракрасного диапазона – длинноволнового инфракрасного (LWIR), средневолнового (MWIR) и коротковолнового (SWIR). В [34] рассматривается возможность определения угловых координат БПЛА на плоскости и в пространстве при использовании нескольких тепловизионных видеокамер.

В целом, количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных обнаружению БПЛА, с использованием тепловизионных видеокамер сравнительно невелико. Хотя возможности использования тепловизионных видеокамер для решения других прикладных задач – обнаружения пешеходов, животных, браконьеров, для распознавания лиц рассматриваются в литературе достаточно часто. Наиболее широко для обработки телевизионных изображений при решении различных задач используются сверточные нейронные сети CNN и методы глубокого обучения [35].

Акустический метод

Значительное внимание при решении задачи обнаружения и измерения координат БПЛА уделяется акустическому информационному каналу, развитию этого направления посвящено значительное число работ [35].

Структура и параметры акустического сигнала, излучаемого БПЛА, зависят от вида объекта, его формы, количества двигателей, количества несущих винтов и т.д. В свою очередь акустическая локационная станция (содар) должна строиться с учетом особенностей струк-

туры принимаемого сигнала. Исследованию особенностей акустического сигнала, формируемого и излучаемого БПЛА, посвящены работы [36 – 46].

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 – 12 КГц [36, 42].

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 [37, 45]. Указанные особенности акустического сигнала БПЛА наблюдаются на спектрограмме рис. 3 [42].

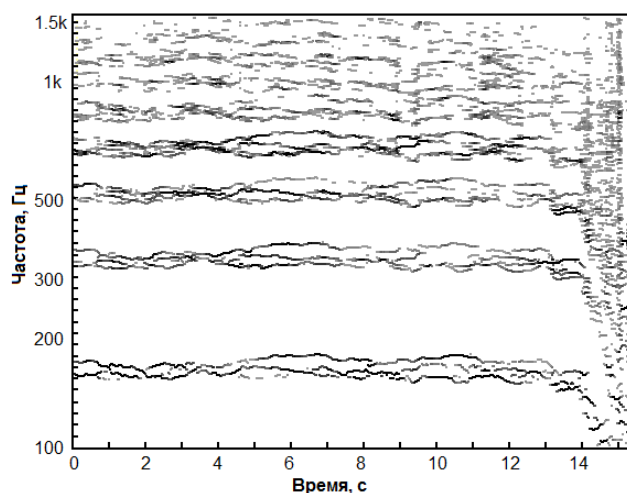


Рис. 3. Спектрограмма акустического сигнала квадрокоптера

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 [42].

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 [39] сделан вывод о том, в первом приближении БПЛА может считаться изотропным источником излучения.

В то же время эксперименты [42, 45, 82] 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 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. 4. 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.

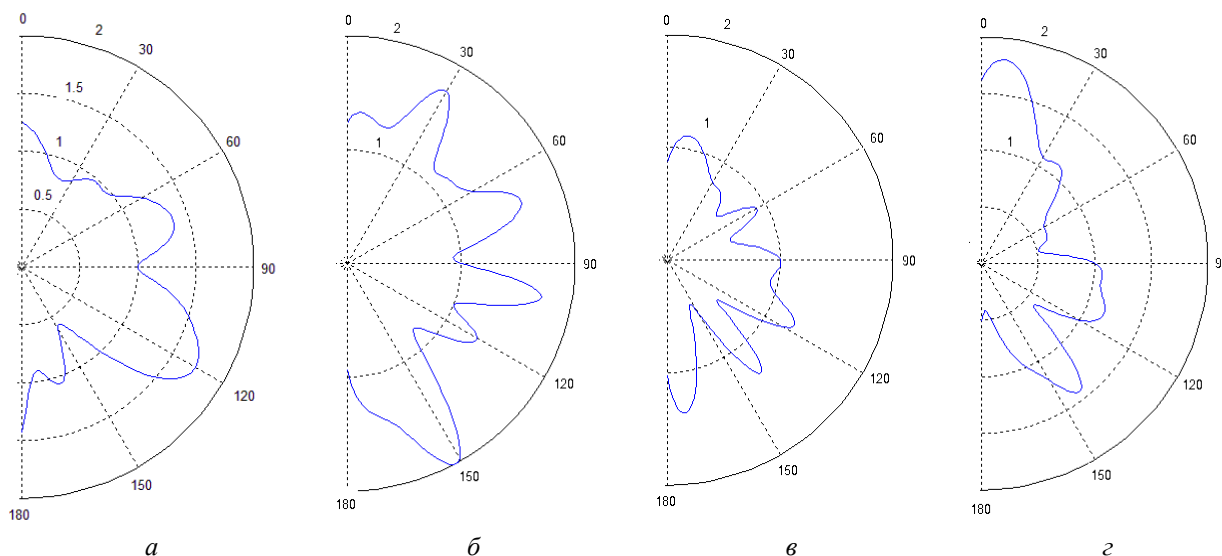


Рис. 4. Нормализованные характеристики направленности акустического излучения квадрокоптера DJI Phantom 3 в вертикальной плоскости на гармониках лопастной частоты винта: *а* – 1-я гармоника, *б* – 2-я гармоника, *в* – 3-я гармоника, *г* – 4-я гармоника

Как видно из рис. 4, 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 является величиной статистической, зависящей от ракурса наблюдения.

Авторами [47 – 49] синтезированы и апробированы на практике алгоритмы обнаружения БПЛА по характерным особенностям спектра и распознавания на основании Mel-Frequency Cepstral Coefficients – MFCC. Основная трудность при решении задач обнаружения и распознавания заключается в различении информационного сигнала от помех, имеющих идентичные с АИ БПЛА спектральные особенности. К таким помехам следует отнести АИ автомобильных двигателей и звуки речи человека.

В публикациях [50 – 52] для обнаружения БПЛА авторы использовали записанные заранее акустические образы, соответствующие различным типам дронов, и вычисление корреляции между сигналами, поступающими на вход и имеющимися в базе. Алгоритм не позволил работать в режиме реального времени и имел ограниченную базу образов.

В [53] для обнаружения БПЛА использовались меп-кепстральные коэффициенты MFCC и алгоритм SVM. В [54] использована приемная акустическая система с одним микрофоном, в которой реализован алгоритм *k*-ближайших соседей, работающий по получаемым спектрам быстрого преобразования Фурье. В работе [55] эти же авторы повысили вероятность правильного решения с 0,83 до 0,86 путем использования нейронной сети и сформировали помеховые фоновые сигналы, соответствующие звукам различных источников, используя базу данных UrbanSound8K [56].

В [57] рассмотрен бинарный алгоритм распознавания, основанный на рекуррентной нейронной сети. Авторы также выполнили расширение набора входных данных, используемых при обработке, путем аддитивного суммирования сигналов дронов с различными фоновыми звуками.

В работе [58] использовалась комплексная система РЛС-сонар, данные которой поступали в нейронную сеть с прямой связью.

Существует необходимость в формировании базы звуков БПЛА, которая могла бы быть использована разработчиками и научным сообществом при синтезе, анализе и верификации алгоритмов обнаружения-распознавания дронов.

Ряд других алгоритмов обработки акустических сигналов представлены в работах [53 – 57, 59 – 63].

В статье [64] для решения задачи обнаружения-распознавания БПЛА по акустическому сигналу используется составная модель авторегрессии, которая адекватно описывает корреляционные свойства сигнала на значительных временных интервалах, и обеспечивает повышение спектрального разрешения в области низкочастотных составляющих спектра исследуемого сигнала. Составная модель авторегрессии позволяет выделять низкочастотный пик акустического сигнала, наличие которого является эффективным информационным признаком БПЛА. На практике рекомендуется использовать шестой порядок составной модели авторегрессии.

Проведены экспериментальные исследования с использованием предложенной математической модели, которые показали существенные отличия спектральной плотности мощности (СПМ) АИ БПЛА от СПМ акустических шумов различных источников, что позволило повысить эффективность решения задачи обнаружения-распознавания БПЛА.

Показано, что в задаче распознавания бывает удобнее использовать информацию о частотах пиков спектра, а не сам спектр. Предложен алгоритм определения частот пиков СПМ на базе предложенной модели авторегрессии без вычисления спектра, который позволяет сравнительно просто рассчитывать параметрические оценки частот пиков СПМ и который целесообразно использовать в содарах обнаружения БПЛА при работе в реальном масштабе времени.

Использование методов классического спектрального анализа, для которых характерна работа с сигналами большой длительности, при обнаружении сигнала БПЛА связано с рядом затруднений [65]. Сигнал БПЛА представляет собой набор дискретных гармоник, параметры которых изменяются на сравнительно небольших интервалах времени, в частности, вследствие изменения режимов работы двигателей. Определенная таким образом спектральная плотность приближается по форме к непрерывной. Естественно, при этом теряются характерные особенности формы спектра БПЛА, составляющие основной набор информационных признаков при решении задачи обнаружения-распознавания. Анализ свойств сигнала на небольших промежутках времени позволит выявить его истинную структуру и эффективно решить задачу обнаружения БПЛА на фоне помех.

При обработке акустических сигналов БПЛА необходимо учитывать состояние атмосферы и особенности распространения колебаний в существующих условиях [66 – 69].

Ряд работ посвящен вопросам пеленгования БПЛА по их акустическому излучению, исследованию возможностей различных методов. В [70] показано, что при использовании классических методов для пеленгования БПЛА по их акустическому излучению процесс пеленгования возможен только при наличии в диаграмме направленности содара лишь одного объекта. Наличие в диаграмме направленности антенны (ДНА) нескольких объектов (например, роя БПЛА), приводит к появлению аномальных погрешностей результатов измерений угловых координат. Это обусловлено формированием амплитудно-фазового распределения звукового поля в раскрыве антенны путем суперпозиции волн, полученных от отдельных БПЛА. Вследствие небольших размеров антенной системы содаров обнаружения БПЛА угловое разрешение отдельных БПЛА в этом случае затруднительно.

Неадаптивный метод Бартлетта достаточно прост при реализации системы пеленгации БПЛА с использованием АР, но его угловое разрешение ограничено релейским пределом, а для повышения пространственного разрешения необходимо увеличивать число элементов микрофонной решетки.

Более высокие характеристики пространственного разрешения источников акустического излучения обеспечивают методы сверхразрешения – Кэйпона, методы MUSIC, а также его разновидности ROOT-MUSIC и ESPRIT.

Недостаток данных методов заключается в формировании выборочных корреляционных матриц, а также выполнении сингулярного разложения или разложения по собственным векторам полученных матриц. При пеленговании малых БПЛА в условиях быстро меняющейся динамической обстановки, это условие накладывает определенные ограничения на временные и вычислительные ресурсы содара.

При использовании методов Бартлетта и Кейпона предполагается использование узкополосных сигналов. Вследствие этого при приеме и обработке широкополосного излучения БПЛА требуется некоторая адаптация данных алгоритмов.

Для определения направления прихода АИ широкополосных сигналов широко используется метод взаимной корреляционной функции (МВКФ) [71, 83, 85, 86]. Сдвиг времени прихода широкополосного акустического сигнала τ к отдельным микрофонам антенной решетки измеряется путем вычисления положения во времени максимумов ВКФ сигналов, принимаемых различными элементами антенной решетки. С целью повышения эффективности работы алгоритма МВКФ при обработке акустических сигналов БПЛА следует принимать меры для уменьшения влияния низкочастотных природных акустических шумов. Эксперименты по определению пеленга БПЛА в широкой полосе частот в открытом пространстве с использованием метода МВКФ показывают хорошее соответствие результатов эксперимента заданным значениям пеленга [72].

Анализ показывает, что сегодня не представляется возможным выделить среди алгоритмов пеленгования БПЛА наилучший, превосходящий все другие методы при различных условиях функционирования. Выбор метода пеленгования БПЛА при разработке содара следует производить с учетом имеющейся априорной информации о наблюдаемых объектах, существующей сигнально-помеховой обстановки, с учетом конфигурации микрофонной антенной решетки, количества элементов и ее геометрических размеров.

Выводы

Радиолокационные наблюдения БПЛА – активно развивающаяся область научных исследований и инженерных разработок. Радиолокационный метод – единственный активный метод (используется излучение зондирующего сигнала), применяемый при наблюдении за БПЛА. Основные показатели качества разрабатываемых и сравниваемых алгоритмов обнаружения БПЛА – вероятность ложной тревоги и вероятность правильного обнаружения. В соответствии с этим при обнаружении целесообразно использовать критерий Неймана – Пирсона, заключающийся, как известно, в максимизации вероятности правильного обнаружения при фиксированном значении вероятности ложной тревоги (порога обнаружения).

Сегодня развиваются два основных метода решения задачи обнаружения-распознавания БПЛА: метод формирования микродоплеровской сигнатуры – МДС и метод, основанный на анализе кинематики движения объекта.

Наиболее часто в литературе рассматривается первый метод, основанный на формировании МДС, параметрами которой являются количество лопастей БПЛА, ракурс облучения объекта, параметры зондирующего сигнала – частота излучения и период следования импульсов, а также время облучения цели. Несмотря на большое количество работ в данной области, все же отмечается недостаток в результатах натурных экспериментов, в результатах анализа этих экспериментов, а следовательно, неудовлетворенность в эффективности и надежности предлагаемых алгоритмов. В значительной части работ эксперименты проводились на небольших дальностях до БПЛА (порядка нескольких сотен метров), либо использовались данные моделирования. Это связано, видимо, с недоступностью соответствующих РЛС, вследствие их цены, для многих исследовательских коллективов, работающих, прежде всего,

в университетах. Отсутствуют и общедоступные наборы данных в Internet, которые могли быть использованы исследователями.

Менее развита область, направленная на обнаружение БПЛА по результатам зондирования, получаемым на выходе РЛС кругового обзора, которые описывают траекторию движения объекта. Перспективность данного направления связывают с возможностью развития методов, основанных на классификации траекторий с использованием методов глубокого обучения.

В целом, по оценкам экспертов, применение методов глубокого обучения к получаемым радиолокационным данным позволит существенно повысить эффективность решения задачи обнаружения-распознавания БПЛА.

Оптическим наблюдениям БПЛА с использованием изображений, получаемых стандартными оптическими камерами RGB, посвящено большое количество публикаций. Обработка изображений осуществляется традиционными методами компьютерного зрения с ручным формированием признаков, описывающих БПЛА, а также с использованием подходов, основанных на глубоком обучении. Вторая группа методов обеспечивает существенно лучшие результаты.

Основные показатели качества рассматриваемых алгоритмов – эффективность решения задачи обнаружения-распознавания (например, по критерию Неймана-Пирсона) и скорость выполнения алгоритмов (предъявляются требования по реализации алгоритмов в реальном масштабе времени).

Малые размеры БПЛА на изображении (малое число пикселей) и свойственные им траектории перемещения учитываются путем использования нескольких последовательных кадров или путем использования методов сверхразрешения.

Выполнено сравнение процедур Faster RCNN [73], SSP [74], YOLO [75]. Алгоритмы YOLO и SSP обеспечивают лучшее быстродействие, Faster RCNN – лучшее качество обнаружения. Известные методы не обеспечивают запросов практики, и требуется улучшать их показатели качества, в частности путем комбинирования и комплексирования известных алгоритмов.

Методы обнаружения БПЛА с использованием оптических камер рассматриваются на ряде Международных конференций, в том числе по системам компьютерного зрения.

Инфракрасные наблюдения, реализуемые с использованием тепловизионных камер, широко используются на практике в системах, предназначенных для обнаружения БПЛА, однако исследования и публикации по данной тематике практически не известны. Это связано, в первую очередь, с дороговизной тепловизионных камер, обладающих высоким разрешением.

Предполагается, что методы обнаружения-распознавания БПЛА, апробированные для видеокамер оптического диапазона, могут быть с успехом использованы применительно к тепловизионным датчикам [35].

Акустические наблюдения БПЛА широко используются на практике, особенно при обнаружении малых аппаратов на небольших расстояниях. Им также посвящено значительное число публикаций. Основным достоинством акустического канала обнаружения БПЛА является его относительная простота, демократичность и информативность.

Недостатки – значительный уровень акустических фоновых шумов, присутствующих практически повсеместно, и небольшая дальность действия сонаров по обнаружению БПЛА (до 150 м.).

Перспективные направления улучшения характеристик сонаров – использование современных методов обработки сигналов, в частности методов пространственно-временной обработки широкополосного акустического излучения БПЛА [76], а также комплексирование сонаров с другими станциями.

Для создания надежных и эффективных алгоритмов для конкретных задач обнаружения БПЛА актуальна задача по созданию представительной общедоступной базы данных, вклю-

чающей звуковые сигналы различных БПЛА. Это может представлять собой серьезную задачу с учетом многообразия используемых дронов, необходимости записи сигналов дронов на различных удалениях, при различных частотах дискретизации, уровнях квантования и т.д.

Перспективным направлением исследований является использование комплексной обработки данных, получаемых с использованием рассмотренных информационных каналов, в единой интегрированной системе обнаружения и распознавания БПЛА [77, 78].

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.
3. 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.
4. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
5. Карташов В.М., Ситник О.В. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
6. De Wit J.M., Harmanny R., Premel-Cabic G. Micro-Doppler analysis of small UAVs // Proceedings of the 2012 9th European Radar Conference; Amsterdam, The Netherlands. 31 October–2 November 2012. P. 210–213.
7. Harmanny R., De Wit J., Cabic G.P. Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram // Proceedings of the 2014 11th European Radar Conference; Cincinnati, OH, USA. 11–13 October 2014. P. 165–168.
8. Molchanov P., Harmanny R.I., de Wit J.J., Egiazarian K., Astola J. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures // J. Microw. Wirel. Technol. 2014. 6:435–444.
9. De Wit J., Harmanny R., Molchanov P. Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition // Proceedings of the 2014 International Radar Conference. Lille, France. 13–17 October 2014. P. 1–6.
10. Ren J., Jiang X. Regularized 2D complex-log spectral analysis and subspace reliability analysis of micro-Doppler signature for UAV detection // Pattern Recognit. 2017. 69:225–237.
11. Oh B.S., Guo X., Wan F., Toh K.A., Lin Z. Micro-Doppler mini-UAV classification using empirical-mode decomposition features // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2017. 15:227–231.
12. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Boston, MA, USA. 7–12 June 2015. P. 1–9.
13. Mendis G.J., Randeny T., Wei J., Madanayake A. Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification // Proceedings of the MILCOM 2016-2016 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD, USA. 1–3 November 2016. P. 924–929.
14. Freund Y., Schapire R.E. Large margin classification using the perceptron algorithm. Mach. Learn. 1999. 37:277–296.
15. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv. 20141409.1556.
16. Zeiler M.D., Fergus R. Visualizing and understanding convolutional networks // Proceedings of the European Conference on Computer Vision; Zurich, Switzerland. 6–12 September 2014. P. 818–833.
17. Strelkova T., Kartashov V., Lytyuga A., Strelkov A. Theoretical Methods of Images Processing in Optoelectronic Systems. Chapter 6 // Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez. (341p.) USA, Herhey, IGI Global, 2016. P.180-205.
18. 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. P. 361-381.
19. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez // IGI Global, 2016. 341p.
20. Schumann A., Sommer L., Klatt J., Schuchert T., Beyerer J. Deep cross-domain flying object classification for robust UAV detection // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017. P. 1–6.
21. Craye C., Ardjoune S. Spatio-temporal Semantic Segmentation for Drone Detection // Proceedings of the 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Taiwan, China. 18–21 September 2019.
22. Vasileios Magoulanitis D.A., Anastasios Dimou D.Z., Daras P. Does Deep Super-Resolution Enhance UAV Detection // Proceedings of the 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Taiwan, China. 18–21 September 2019.

23. Opromolla R., Fasano G., Accardo D. A Vision-Based Approach to UAV Detection and Tracking in Cooperative Applications. *Sensors*. 2018. 8:3391.
24. Gökçe F., Üçoluk G., Şahin E., Kalkan S. Vision-based detection and distance estimation of microunarmed aerial vehicles. *Sensors*. 2015. 15:23805–23846.
25. Ivanov M., Sergiyenko O., Mercorelli P., Tyrsa V., Kartashov V., Hernandez W., Sheiko S., Kolendovska M. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS // Proceedings of 44th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Washington DC, USA. 2018. P. 3187-3192.
26. Ivanov M., Sergiyenko O., Mercorelli P., Hernandez W., Rodriguez Quinonez J.C., Kartashov V., Kolendovska M., Iryna T. Effective informational entropy reduction in multi-robot systems based on real-time TVS // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June, 8781209, 2019. P. 1162–1167.
27. Oleksandr Sotnikov, Vladimir Kartashov, Oleksandr Tymochko, Oleg Sergiyenko, Vera Tyrsa, Paolo Mercorelli, Wendy Flores-Fuentes. Methods for Ensuring the Accuracy of Radiometric and Optoelectronic Navigation Systems of Flying Robots in a Developed Infrastructure. Chapter 16 // *Machine Vision and Navigation*; Springer, Cham. P.537–578. Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo.
28. Lindner L., Sergiyenko O., Rivas-López M., Gurko A., Kartashov V.M. Machine vision system for UAV navigation // IEEE, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC, 2016. P.1–6.
29. Kartashov V., Oleynikov V., Zubkov O., Sheiko S. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.
30. Aker C., Kalkan S. Using deep networks for drone detection // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017. P. 1–6.
31. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М., Тимошенко Л.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В. Комплексование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // *Радиотехника*. 2020. Вып. 201. С. 120–129.
32. Müller T. Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras // Proceedings of the Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VIII, International Society for Optics and Photonics; Anaheim, CA, USA. 4 May 2017. P. 1019018.
33. Birch G.C., Woo B.L. Counter unmanned aerial systems testing: Evaluation of VIS SWIR MWIR and LWIR passive imagers. Sandia Rep. 2017.
34. Thomas A., Cotinat A., Gilber M. UAV localization using panoramic thermal cameras // Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision Systems (ICVS); Thessaloniki, Greece. 23–25 September 2019.
35. Samaras S., Diamantidou E., Ataloglou D., Sakellariou N., Vafeiadis A., Magoulianitis V., Lalas A., Dimou A., Zarpalas D., Votis K., Daras P., Tzovaras D. Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications // A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2019 Nov 6. 19(22): 4837. Published online 2019, Nov 6.
36. 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. P. 1–16.
37. 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. P. 1–14.
38. Zaslavsky Yu. M., Zaslavsky V. Yu. Acoustic noise of a low flying quadcopter // *NOUSE Theory and Practice*. V.5, №3, 2019. P. 21–27.
39. Sinibaldi G., Marino L. Experimental analysis on the noise of the propellers for small UAV // *Applied Acoustics*, 74 (2013). P. 79–88.
40. Intaratep N., Alexandre W. 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. P. 1–6.
41. Moshkov P. M., Samokhin V. F. Assessment of the influence of the number of blades and diameter on the noise of the propeller // *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, V. 15, No 3, 2016. P. 25–34. (In Rus.).
42. 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.
43. 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. P.1885–1892.
44. Карташов В.М., Харченко О.И., Чумаков В.И. Использование эффекта стохастического резонанса для анализа спектров акустического излучения малых беспилотных летательных аппаратов // *Радиотехника*. 2019. Вып. 197. С. 100-106.

45. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. V.77 (10). P. 915–924.
46. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Тимошенко Л.П. Комплексные модели случайных сигналов в задачах акустического зондирования атмосферы // *Радиотехника*. 2016. Вып. 185. С. 81–86.
47. Oleynikov V. N., Zubkov O. V., Kartashov V. M., Koryttsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic emission // *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019. V. 78, Issue 9. P. 759–770.
48. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals // *International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 Proceedings 31 January 2019*. P. 392–396.
49. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Sheyko S., Zubkov O., Babkin S., Selieznov I. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles // *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 25-29 Feb. 2020. P.1–4.
50. Chowdhury A.S.K. Master's Thesis. University of Nevada. Las Vegas, NV, USA: 2016. Implementation and Performance Evaluation of Acoustic Denoising Algorithms for UAV.
51. 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. P. 509–518.
52. Bernardini A., Mangiatordi F., Pallotti E., Capodiferro L. Drone detection by acoustic signature identification // *Electron. Imaging*. 2017. P.60–64.
53. 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. P. 402–406.
54. Kim J., Park C., Ahn J., Ko Y., Park J., Gallagher J.C. Real-time UAV sound detection and analysis system // *Proceedings of the 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*; Glassboro, NJ, USA. 13–15 March 2017. P. 1–5.
55. Kim J., Kim D. Neural Network based Real-time UAV Detection and Analysis by Sound // *J. Adv. Inf. Technol. Converg*. 2018. 8:43–52.
56. Salamon J., Jacoby C., Bello J.P. A dataset and taxonomy for urban sound research // *Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Multimedia*. ACM; Mountain View, CA, USA. 18–19 June 2014. P. 1041–1044.
57. Oleynikov V.N., Kartashov, V.M., Babkin, S. I., Zubkov, O.V., Koryttsev I.V., Sheiko, S.A., Seleznev I.S. Structure and Parameter Unmanned Aerial Vehicles Sound Fields // *Telecommunications and Radio Engineering*. New York. 2020. Vol. 79, №17. P.1539-1550.
58. 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. P. 1–4.
59. A. Bernardini, F. Mangiatordi, E. Pallotti, L. Capodiferro, F. Ugo Bordoni. Drone detection by acoustic signature identification // *Electronic Imaging, Imaging and Multimedia Analytics in a Web and Mobile World*. 2017. P. 60–64.
60. Vasilchenko A., Kartashov V.M. Analysis of influence exerted by longitudinal Doppler effect upon output signal of sodar antenna array // *Telecommunications and Radio Engineering*. Vol. 66, Issue 9. P. 841–847.
61. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array // *Electrical Engineering*. Wright State University, 2007. 55 p.
62. Kozeruk S. A., Korzyhuk A.V. Identification of small aircraft by acoustic radiation // *Visnyk NTUU KPI. Series Radiotekhnika Radiobuduvannia*. 2019. Iss. 76. P. 15–20.
63. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R. Acoustis signature of an unmanned air vehicle exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // *Eronautical DEF SCI J*. 2001 Vol. 51 №3. pp. 279–283.
64. 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.
65. Semenets V. V., Kartashov V.M., Leonidov V. I. Registration of refraction Phenomenon in the Problem of acoustic Sounding of Atmosphere in Airport Zone // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, Iss. 5. P.461–468.
66. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Особенности построения и применения комплексных систем дистанционного зондирования атмосферы // *Радиотехника*. 2016. Вып. 186. С. 184–185.
67. 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 // *Радиотехника*. 2013. №173.С. 63–78.

68. 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.
69. Карташов В.М., Куля Д.Н., Пашенко С.В. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. №4/9(58). С. 57-61.
70. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Кoryтцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А., Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып. 199. С. 29–37.
71. Карташов В.М., Кoryтцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И., Левский Н.А., Селезнев И.С. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. 2019. Вып. 196. С. 22–31.
72. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev 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. P.175–178.
73. Saqib M., Khan S.D., Sharma N., Blumenstein M. A study on detecting drones using deep convolutional neural networks // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017.
74. Mrunalini Nalamati A.K., Muhammed Saqib N.S., Blumenstein M. Drone Detection in Long-range Surveillance Videos // Proceedings of the 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Taiwan, China. 18–21 September 2019.
75. Aker C., Kalkan S. Using deep networks for drone detection // Proceedings of the 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS); Lecce, Italy. 29 August–1 September 2017. P. 1–6.
76. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev 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. 2020. V. 79, №9. P.769–780.
77. Карташов В.М., Олейников В.Н., Воронин В.В., Рябуха В.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В., Селезнев И.С. Методы комплексной обработки и интерпретации радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С. 173-182.
78. Карташов В.М., Олейников В.Н., Леонидов В.И., Воронин В.В., Капуста А.И., Селезнев И.С., Першин Е.В. Комплексная обработка сигналов интегрированной системы наблюдения беспилотных летательных аппаратов с использованием целеуказания // Радиотехника. 2020. Вып. 203. С. 148-161.
79. Карташов В.М., Кoryтцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасном диапазонах // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С. 125-135.
80. Карташов В.М., Кoryтцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С. 153-159.
81. Карташов В.М., Кoryтцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И. Эффективность детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку стационарной видеокамеры // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С. 136-146.
82. Semenets V.M., Kartashov V.M., Leonidov V.I. Features of Acoustic Noise of Small Unmanned Aerial Vehicles // Telecommunications and Radio Engineering. New York. 2020. Vol. 79, №11. P. 985-995.
83. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Sheiko S., Zubkov O., Babkin S.. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 25, 2020. Vol. 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). P. 35-39.
84. 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.
85. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Шейко С.А., Бабкин С.И., Кoryтцев И.В. Исследование эффективности обнаружения и распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 209-217.
86. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Кoryтцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2018. Вып. 195. С. 235-243.

Поступила в редколлегию 02.04.2021

Сведения об авторах:

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

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

Воронин Виталий Валериевич – канд. техн. наук, Светловодский политехнический колледж Центральноукраинского национального технического университета, преподаватель радиотехнических дисциплин; Украина; e-mail: vvvoronin2016@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-9024>

Колесник Виктория Ивановна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, факультет информационных радиотехнологий и технической защиты информации; Украина; e-mail: valeriia.kolesnyk@nure.ua

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

Рыбников Николай Владимирович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, факультет информационных радиотехнологий и технической защиты информации; Украина; e-mail: mykola.rybnykov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1340-8788>

Першин Евгений Васильевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, факультет информационных радиотехнологий и технической защиты информации; Украина; e-mail: yevhenii.pershyn@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4573-9381>