

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Введение

В последние два столетия человеческой истории автоматика прочно входит во все виды человеческой деятельности. Начав свое триумфальное шествие по земному шару с автоматизации производственных технологических процессов, автоматика с завидным упорством стала проникать в другие виды человеческой деятельности: в воздухе, на земной поверхности, под водой. Созданы роботизированные системы, выполняющие многие сложные задачи. Ярким примером замены человека в экстремальной ситуации стал робот, отбирающий образцы грунта в районе четвертого блока Чернобыльской АЭС. Разработан ряд глубоководных аппаратов для исследования морских глубин без участия в экспериментах человека. Известны примеры создания подводных автономных систем военного назначения. Наконец наука добралась и до венца творения природы – человека. Появились человекоподобные роботы – домохозяйки, спортсмены, официанты. Эти роботы в состоянии узнавать вещи, лица и т.д.

Настоящий краткий обзор посвящен беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) – истории, их типам, видам использования таких аппаратов, обнаружению и распознаванию малых БПЛА.

1. Использование беспилотных летательных аппаратов

Работы, направленные на создание беспилотных летательных аппаратов, начались давно [1], еще в годы первой мировой войны. В 1930-е годы появились первые дистанционно-пилотируемые воздушные мишени. А во время второй мировой войны появляется первый ударный беспилотный самолет – немецкий самолёт-снаряд Фау-1. Впоследствии ударные самолёты-снаряды большой дальности относили к крылатым ракетам и не называли беспилотными самолётами. В конце 1950-х годов появляются беспилотные разведчики. 70-ми годами 20 века датируются научно-исследовательские разработки и в области боевых (ударных) БПЛА, а также беспилотных самолетов с большой высотой и продолжительностью полета, предназначенных для длительного наблюдения и использования в составе разведывательно-ударных комплексов. В 1970-х – 1980-х годах этой тематикой занимались конструкторские бюро П. О. Сухого, А. Н. Туполева, В. М. Мясищева, А. С. Яковлева, Н. И. Камова. В КБ им. А. Н. Туполева созданы беспилотные разведчики "Ястреб", "Стриж", "Рейс", а также ударный "Коршун", созданный совместно с НИИ "Кулон". В КБ им. А.С. Яковлева спроектирован комплекс "Пчела".

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все больше находят широкое применение и в других видах деятельности человечества. К примеру, в сельском хозяйстве БПЛА с GPS- навигацией используются для опыления растений на полях. При этом достигается значительная экономия химикатов и более тщательная обработка посевов по сравнению с пилотируемой авиацией. Они используются для доставки медикаментов и гуманитарных грузов в труднодоступные районы, могут применяться для проверки линий электропередачи трубопроводов. Дроны, другое название БПЛА, могут использоваться и государственной службой по чрезвычайным ситуациям для мониторинга и прогнозирования, а также при контроле опасных объектов (безопасность и охрана окружающей среды) и многие другие. В частности, в качестве несущей платформы метеорологических измерительных комплексов могут использоваться БПЛА мультикоптерного типа [2]. Они имеют преимущества по отношению к БПЛА

самолетного типа, которые, в силу высокой скорости перемещения в атмосфере, не обеспечивают достаточного пространственного и временного разрешения измерений, обладают низкой чувствительностью, не позволяют исследовать турбулентные процессы. В настоящее время доступные и относительно недорогие мультикоптеры обеспечивают подъем с полезной нагрузкой 3 – 5 кг на высоту 2 – 4 км при длительности полета 30 – 40 минут. В современных БПЛА бортовая система навигации и управления может обеспечивать:

- полет по заданному маршруту (задание маршрута производится с указанием координат и высоты поворотных пунктов маршрута);
- изменение маршрутного задания или возврат в точку старта по команде с наземного пункта управления;
- облет указанной точки;
- стабилизацию углов ориентации БПЛА, - поддержание заданных высот и скорости полета (путевой либо воздушной),
- сбор и передачу телеметрической информации и параметрах полета и работе целевого оборудования, - программное управление устройствами целевого оборудования.

Все это позволяет обеспечить большую мобильность и оперативность измерений при невысокой стоимости эксплуатации БПЛА. Основные преимущества технологии измерений параметров атмосферного пограничного слоя (АПС) с помощью БПЛА мультикоптерного типа:

- прямые контактные измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС;
- возможность оперативных кратковременных измерений характеристик АПС в заданных точках атмосферы (на высотах от 0 до 4000 метров);
- высокое пространственное и временное разрешение;
- хорошая помехозащищенность;
- возможность измерения вертикальных профилей метеорологических, турбулентных и экологических характеристик АПС посредством контролируемого подъема (спуска) БПЛА по заданной программе;
- небольшие вес и габариты устройства;
- относительно невысокая цена.

Основные недостатки технологии измерений параметров АПС с помощью БПЛА мультикоптерного типа:

- небольшая длительность измерений (20 – 40 минут);
- относительно низкая грузоподъемность несущей платформы (требуется создание специализированных измерительных комплексов, имеющих малый вес, небольшие габариты и низкое энергопотребление).

Многие малые БПЛА стали доступными для обычных пользователей, причём их оснащение достаточно сложное и включает фото- и видеокамеры, систему автопилота и навигации, что делает управление такими БПЛА достаточно простым.

Повсеместное использование малых БПЛА помимо, несомненно, позитивных сторон породило ряд проблем, связанных с неадекватным поведением некоторых владельцев БПЛА, несанкционированным мониторингом объектов и территорий государственной важности, участвовавшими случаями вторжения в личную жизнь, возникновением возможности использованием БПЛА в террористических и разведывательных целях. Независимо от области применения, полномасштабное выполнение миссий БПЛА может включать такие подзадачи как обнаружение, локализация и идентификация целей, сопровождение и целеуказание [3,4]. Как свидетельствуют различные источники информации, в настоящее время в нашей стране и за рубежом по результатам оценки вклада различных технических средств в эффективность боевых действий группировок вооруженных сил приоритеты отданы средствам получения разведывательной информации. Воздушная разведка по справедливости считается одной из самых опасных

боевых задач. Подлежащие разведке цели противная сторона стремится скрыть и защищает их мощной объектовой и войсковой ПВО. Особенно опасна воздушная разведка в начальный период боевых действий, когда ПВО противника ещё не подавлена, а также при отсутствии господства в воздухе. Поэтому особую актуальность приобретает использование комплексов на основе беспилотных летательных аппаратов для воздушной разведки [4].

В большинстве перечисленных случаев весьма актуальной становится задача обнаружения БПЛА в воздухе.

2. Типы БПЛА

Проанализировав существующие БПЛА, можно классифицировать их по особенностям их конструктивного исполнения [1].

Микро-БПЛА выполнены в большинстве своем по классической аэродинамической схеме, реже встречается схема «летающее крыло». По расположению крыла – высокопланы. Встречаются самолеты, имеющие поперечное V крыла. Двигатели электрические, в основном тянущие. Горизонтальное оперение – прямоугольное, расположенное низко относительно вертикального. Данные БПЛА осуществляют взлет с руки, а посадку – на парашюте. Мини-БПЛА выполнены по классической аэродинамической схеме. Крыло расположено высоко. Фюзеляжи представлены в виде как гондолы, так и однофюзеляжных схем. Вертикальное оперение представлено однокилевым, двухкилевым разнесенным, реже встречается V-образное. Двигатели в основном поршневые, толкающие или тянущие. Взлет осуществляют с пусковых установок, а посадку – на парашюте или по-самолетному. Миди-БПЛА отличаются от мини-БПЛА только тем, что осуществляют взлет и посадку по-самолетному, имеют неубирающееся трехопорное шасси с носовой опорой и поршневые двигатели. Макси-БПЛА выполнены по классической аэродинамической схеме. Крыло расположено низко. Оперение V-образное. Двигатели толкающие и представлены как ТРД, ТВД, так и ПД. Шасси убирающееся. Взлет и посадку выполняют по-самолетному.

"Беспилотники" различаются по массе (от аппаратов массой в полкилограмма, сравнимых с авиамodelью, до 10-15-тонных гигантов), высоте и продолжительности полета. Беспилотные летательные аппараты массой до 5 кг (класс "микро") могут взлетать с любой самой маленькой площадки и даже с руки, поднимаются на высоту 1...2 км и находятся в воздухе не более часа. Как самолеты-разведчики их используют, например, для обнаружения в лесу или в горах военной техники и террористов. "Беспилотники" класса "микро" массой всего 300...500 г, образно говоря, могут заглянуть в окно, поэтому их удобно использовать и в городских условиях. Следом за "микро" идут беспилотные летательные аппараты класса "мини" массой до 150 кг. Они работают на высоте до 3...5 км, продолжительность полета составляет 3 – 5 часов. Следующий класс – "миди". Это более тяжелые многоцелевые аппараты массой от 200 до 1000 кг. Высота полета достигает 5...6 км, продолжительность – 10 – 20 ч. И, наконец, "макси" – аппараты массой от 1000 кг до 8...10 т. Их потолок

– 20 км, продолжительность полета – более 24 ч. Вероятно, вскоре появятся машины класса "супермакси". Можно предположить, что их масса превысит 15 т. Такие "тяжеловозы" будут нести на борту огромное количество аппаратуры различного назначения и смогут выполнять самый широкий круг задач.

3. Каналы обнаружения БПЛА

Информация для выявления и последующей пеленгации БПЛА может быть получена путем приема специальными средствами отраженной и излучаемой энергии во всех диапазонах спектра электромагнитных и акустических волн.

Любому материальному объекту, в том числе и БПЛА, присущи демаскирующие признаки, которые выделяют его в окружающей среде, делая его заметным для наблюдения. В настоящее время степень заметности определяют значением его сигнатур в радиочастотном, инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах спектра, а также акустической сигнатурой. Современные легкие БПЛА имеют сигнатуры небольшого значения: их изготавливают из композитных материалов и пластика со специальной окраской и особенной комбинацией слоев; небольшие бензиновые или электрические двигатели излучают мало тепла и работают почти бесшумно [5].

Значительное разнообразие возможных вариантов построения и использования средств наблюдения в каждом из указанных диапазонов обуславливает трудности оценивания их эффективности.

Акустический канал. Суммарный спектр акустического излучения тактического БПЛА обусловлен гармоническими и широкополосными составляющими. Он включает в себя гармонические составляющие излучения двигателя, шума оборотов винта, излучение механической природы, а также высокочастотную и низкочастотную составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами. В шуме силовой установки БПЛА, имеющей поршневой двигатель воздушного охлаждения, при отсутствии в его выхлопном тракте глушителя определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель [3–11]. (2-9)

Оптический канал. Оптическое обнаружение БПЛА очень сильно зависит от факторов окружающей среды. Увеличение дальности обнаружения достигается за счет сужения поля зрения, уменьшения зоны обзора и увеличения времени поиска. Поэтому визуальные сенсоры являются неэффективными устройствами для проведения поиска. При поступлении внешних целеуказаний от более эффективного поискового средства оптические сенсоры могут быть эффективно использованы для сопровождения БПЛА [5,12]. Поскольку беспилотники являются значительно меньшими по размерам по сравнению с пилотируемыми средствами, то это усложняет их обнаружение с помощью оптических средств. Сравнительно с самолетом контрастность БПЛА относительно фона есть меньшей через отсутствие световых маяков, уменьшенный факел малого двигателя и меньшую поверхность отражения [13].

ИК канал. Тепло от БПЛА выделяется, в основном, силовой установкой и, в меньшей мере, электронными компонентами, а также точками торможения на несущих краях крыльев, пропеллеров и винтов. Разработчики беспилотников стараются предупредить излучение в ИК диапазоне в направлении размещенных на земле приемников и направить это излучение в сторону неба [5,12-13]. Кроме того, используют материалы с малой излучательной способностью, такие как серебро и алюминий [14]. В данном случае возможность БПЛА быть обнаруженным определяется его излучательной способностью, контрастом и площадью излучения.

Радиотехнический канал. Поиск БПЛА с помощью активных радиолокационных станций достаточно продуктивный, так как они имеют относительно большой импульсный объем поиска и значительную дальность обнаружения [14]. Однако РЛС могут быть определены противником по собственному излучению. Радиолокационное обнаружение БПЛА может быть приемлемым только тогда, когда не ставятся требования к скрытности работы или высокой мобильности [13]. Как уже отмечалось, большинство БПЛА изготавливают из композитных материалов, которые достаточно плохо отражают

электромагнитные волны. Радиоволны проникают через поверхность беспилотника и только частично отражаются от нее [13].

Канал радиотехнической разведки. БПЛА могут быть обнаруженными и средствами радиотехнической разведки путем приема и анализа радиосигналов линий связи и управления, радиолокационных высотомеров, постановщиков активных помех и радиолокационных станций. Однако этим методом можно установить лишь направление на БПЛА, причем точность определения повышается при увеличении времени наблюдения. Некоторые низкочастотные линии связи могут быть обнаружены на значительных дальностях. Излучение бортовых РЛС и постановка активных помех БПЛА могут быть обнаружены на еще больших дальностях. Этот метод требует минимального оборудования и позволяет быстро определить пеленг цели при дальнейшей выдаче целеуказаний на средства оптического или ИК наблюдения.

Перспективным направлением надежного обнаружения БПЛА является комплексирование информации, которая поступает по каналам разной физической природы.

В работе [15] описана комплексная сенсорная сеть обнаружения БПЛА, содержащая радиолокационный, акустический и телевизионный каналы. Однако предложенный алгоритм работы системы не учитывает эффективности каналов обнаружения с учетом разных физических признаков беспилотников. Результаты исследования по разработке метода обнаружения БПЛА на основе анализа их сигнатур в акустическом и радиолокационном диапазонах волн представлены в работе [16]. Другие виды и сети описаны в работах [17-18].

Оценивая преимущества и недостатки рассмотренных физических каналов обнаружения БПЛА можно сделать вывод, что для обнаружения малоразмерных и мало скоростных беспилотников (микро-БПЛА), т. н. БПЛА широкого применения, являющихся наиболее востребованными в решении как гражданских так и военных задач, оптимальным является акустический канал.

4. Обнаружение и распознавание БПЛА широкого применения

4.1 Источники акустических сигналов БПЛА.

Основными источниками шума микро-БПЛА являются двигатель, воздушный винт и планер. Поскольку скорости полета таких БПЛА дозвуковые, то аэродинамическим шумом планера можно пренебречь из-за его небольшой значимости. Источниками шума в поршневом двигателе являются процессы впуска свежего заряда (шум впускания), горения, выпуска отработанных газов (шум выпуска); механическое перемещение деталей, которое сопровождается ударами и трением в сочленениях и стыках. Последние совместно с процессом горения являются источниками корпусного шума. Акустический шум обычно увеличивается по мере увеличения мощности двигателя [19-20].

Электрические двигатели имеют более низкие шумовые характеристики, однако их использование ограничивается БПЛА малым радиусом действия.

Двигатели большинства не реактивных БПЛА являются достаточно небольшими для использования глушителей и снижению таким образом акустической заметности. Кроме того, природный и антропогенный шум окружающей среды усложняет обнаружение БПЛА по их акустическому портрету. Но поскольку беспилотники этого класса имеют малые ИК и радиолокационные сигнатуры, по сравнению с пилотируемой авиацией, то использование акустических каналов для их обнаружения становится весьма актуальным.

Акустические сенсоры позволяют наземным средствам производить поиск и обнаружение БПЛА в пассивном режиме, снижая таким образом вероятность определения противником собственных позиций. Поэтому модификация существующих акустических систем поиска или создание новых может обеспечить надежный метод обнаружения БПЛА [13].

Для детального анализа акустических сигналов используют решетки микрофонов, поскольку использование отдельного микрофона даст лишь грубую оценку акустического сигнала [7]. Акустические антенные решетки могут эффективно использоваться для обнаружения и сопровождения низко летающих БПЛА на тактических расстояниях. В то же время акустическая решетка, кроме пространственного накопления сигналов, позволяет оценивать время прихода фронта акустической волны в разные точки пространства, что, в свою очередь, содействует оценке угла распространения волны относительно решетки, т.е. можно вычислить пеленг на источник излучения. Для БПЛА среднего размера с двигателем внутреннего сгорания дальность обнаружения в пять раз превышает этот же показатель для беспилотника с электрическим двигателем [1, 8-9].

Характеристики направленности – одна из важнейших характеристик источников шума в авиации. Факторы направленности излучения различных источников используются в классических подходах авиационной акустики для расчета ожидаемых уровней шума самолетов на местности. Эти методы расчета также входят в методику прогноза границ слышимости и заметности малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с винтомоторной установкой. В работе [21] приведены результаты акустических испытаний малоразмерного БПЛА с поршневым двигателем в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. Показано, что при работе силовой установки на взлетном режиме в задней полусфере в направлениях 105° - 120° в суммарном шуме силовой установки доминирует излучение на частоте первой гармоники шума вращения винта. На оси коленчатого вала доминирующим является акустическое излучение от поршневого двигателя. Здесь же описаны факторы направленности суммарного акустического излучения силовой установки и отдельных его частей.

4.2 Информационные характеристики акустических сигналов БПЛА

При гармоническом обнаружении анализируются узкие полосы частот на коротких временных интервалах. Сигнал подают в виде суммы гармоник с неизвестными частотами и фазами. Если сигналы слабые, то гармонический детектор работает более надежно чем энергетический [10-11,22].

Суммарный спектр акустического излучения тактического БПЛА обусловлен гармоническими и широкополосными составляющими. Он включает в себя гармонические составляющие излучения от двигателя, шума вращения винта, излучение механического происхождения, а также высокочастотную и низкочастотную составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами. В шуме силовой установки БПЛА, включающего поршневой двигатель воздушного охлаждения, при отсутствии в его выхлопном тракте глушителя определяющим источником внешнего шума является поршневой двигатель.

Дискретные составляющие следуют с частотами $f_i = f_0 \times i$, которые кратны частоте зажигания f_0 , где $i = 1, 2, 3...$ - номер соответствующей гармоничной составляющей. На высоких частотах значимость периодических процессов в формировании спектра акустического излучения двигателя заметно ослабляется, поскольку более важную роль в суммарном акустическом излучении начинают играть процессы случайного происхождения. В частности, для шума выхлопа может быть существенной вихревая

составляющая. На самом же деле выхлопной тракт двигателя формирует в атмосфере последовательность импульсов давления, частотный частотный спектр которого представлен на рис.1 [4,5,23].

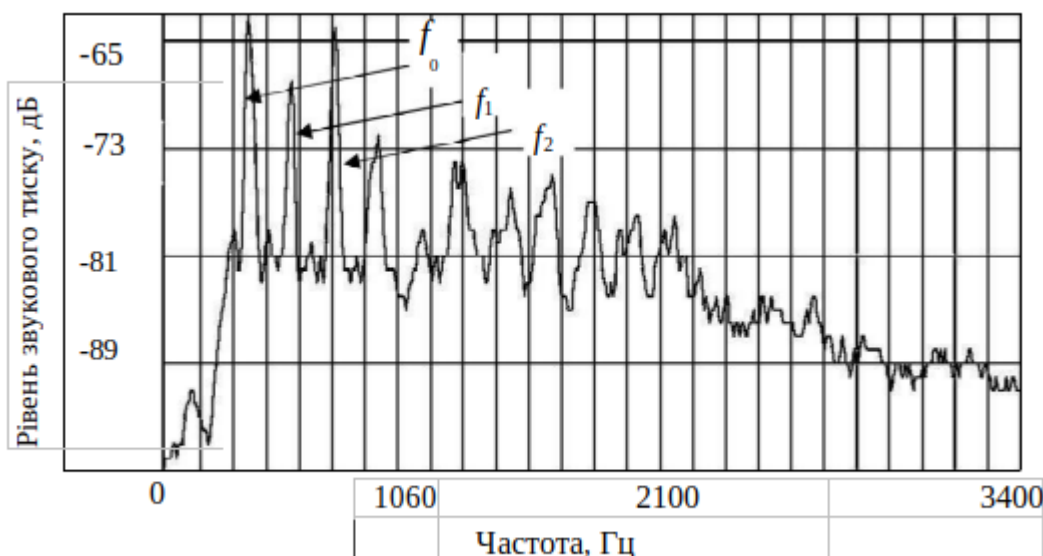


Рис. 1 Типовой спектр акустического излучения работы силовой установки БПЛА

Другой информационной характеристикой акустических сигналов БПЛА, используемой для их распознавания, является фазовый портрет этих сигналов [24].

Геометрическая дальность обнаружения акустических сигналов определяют зоной акустической освещенности, полученной в результате построения лучевой картины, которая зависит от стратификации атмосферы, рельефа подстилающей поверхности, высоты источника звука и характеристик его направленности.

4.3 Обнаружение и распознавание малозаметных БПЛА

Более тщательное исследование различных информационных характеристик акустических сигналов, малозаметных БПЛА двух видов проведено в работах [25-27]. Экспериментальная установка для исследований состояла из измерительного конденсаторного микрофона Superlux ECM-999, установленного в фокусе параболического отражателя диаметром 0,6 м. Выход микрофона подключался по симметричному аудиоинтерфейсу XLR ко входу внешней звуковой карты Behringer U-Phoria UM2. Звуковой сигнал оцифровывался с частотой дискретизации 48 кГц и разрядностью 24 бита. Эксперименты проводились в условиях города, во внутреннем дворе университета. Отношение сигнал/шум в обрабатываемых записях составило около 20 дБ. Исследованы акустические излучения квадрокоптера DJI Phantom 2 и моноплана Skywalker Falcon 1340 mm EPO Flying Wing. По результатам обработки записей получены спектры используемых БПЛА, их спектрограммы и нормированные автокорреляционные функции, а также фазовые портреты. Анализ полученных информационных характеристик позволил сделать такие выводы:

- экспериментальное исследование звуковых сигналов квадрокоптера и моноплана показало, что их спектры имеют ярко выраженные гармонические составляющие с частотами, кратными частоте вращения винта;

- гармонические составляющие звукового сигнала квадрокоптера шире, чем у моноплана, что объясняется некоторым различием режимов работы двигателей в процессе полета или при работе системы компенсации ветровых возмущений;

- при большом различии режимов двигателей квадрокоптера спектральные максимумы разделяются на несколько, что может являться одним из признаков для классификации БПЛА;

- в звуковых сигналах исследованных БПЛА, при наличии накопления спектров, уверенно наблюдаются гармоники с частотами до 8...10 кГц;

- при акустическом наблюдении БПЛА самолётного типа под малыми углами к направлению движения структура спектра изменяется незначительно, что даёт возможность применять временное накопление на длительных интервалах.

Для построения первичных признаков звукового образа БПЛА принимаемые пассивным содаром звуковые колебания БПЛА преобразуются в электрический сигнал, представляющий собой реализацию широкополосного случайного процесса, описание которого может быть дано энергетическим спектром. Поэтому информационными признаками звукового образа БПЛА могут служить оценки спектральных коэффициентов, определяемые по дискретной реализации, содержащей заданное количество отсчетов. Переход ко вторичным информационным признакам осуществляется путем построения ковариационной матрицы спектральных коэффициентов и ее диагонализации. После проведенных расчетов набор признаков, поступивший на вход системы, соответствует некоторому классу, если среднее значение коэффициента подобия по всем парам сравниваемых векторов больше определенной пороговой величины. Проведенные теоретические исследования позволяют разработать модуль формирования коллекции звуковых образов БПЛА и модуль, реализующий правило принятия решений.

Выводы

1. Создание и широкое применение, часто несанкционированное, БПЛА поставили насущную проблему разработки эффективных методов их оперативного обнаружения и распознавания.
2. Для решения проблемы обнаружения малозаметных и мало скоростных БПЛА наиболее эффективным является акустический канал.
3. При обнаружении БПЛА информационной характеристикой акустического канала является суммарный спектр его акустического излучения.
4. Другими характеристиками, которые могут быть использованы для обнаружения БПЛА, являются спектрограммы, нормированные автокорреляционные функции и фазовые портреты акустических сигналов.
5. Информационными признаками звукового образа БПЛА могут служить оценки спектральных коэффициентов, определяемые по дискретной реализации, содержащей заданное количество отсчетов.

Литература

1. Цепляева Т.П., Поздышева Е. М., Поштаренко А. Г. Анализ применения беспилотных комплексов. [Текст] Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков.- https://www.khai.edu/csp/portal//Archiv/OIKIT39/p_149-154.pdf. Дата обращения 16.09.2017 г.

2. Корольков В.А. Автоматизированные акустические и оптоэлектронные комплексы и системы для экологического и метеорологического мониторинга атмосферы. Дисс. ... д.т.н. по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Научн. конс. – д.т.н., проф. Тихомиров А.А. –Томск, 2017. – 471 с.
3. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами// Интернет-журнал “НАУКОВЕДЕНИЕ”. Том 9, № 1 (2017).<http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. С экрана. Яз. рус., англ.
4. Амелин К.С., Миллер А.Б.. Алгоритм уточнения местонахождения легкого БПЛА на основе калмановской фильтрации измерений пеленгационного типа./Санкт-Петербургский государственный университет// АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. Информационные процессы. Том 13, № 4, 2013, стр. 338–352.
5. Ю.В. Даник, М.В. Бугайов. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження// Збірник наукових праць ЖВІ ДУТ. Інформаційні системи'15. Вип.10. - 2015. – С.5-20.
6. Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – М. : Воениздат, 1979. – С. 16.
7. Sadasivan S. Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S.Sadasivan, M.Gurubasavaraj, S.R. Sekar // Eronautical DEF SCI J.- 2001. – Vol. 51, № 3. – Pp. 279–283.
8. Massey K. Noise Measurements of Tactical UAVs / K. Massey, R. Gaeta // Georgia Inst. of Technology / GTRI / ATAS, Atlanta. 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – P. 1-16.
9. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise / L. Marino // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University "La Sapienza", Rome, Italy. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – P. 1-14.
10. Pham T. TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs / T.Pham, N.Srour // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE.- 2004. – Vol. 54. – Pp. 24–29.
11. Zelnio A.M. Detection of small aircraft using an acoustic array. Thesis. B.S. / A.M. Zelnio. – Electrical Engineering, Wright State University. - 2007. – 55 p.
12. Соловьев В. А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами / В. А. Соловьев // Электронный математический и медико-биологический журнал. – Т. 10, 2011. – Вып. 3. – С. 1–13.
13. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models / J. J. Beel. – Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. – P. 36–46.
14. Moses A. Radar-based detection and identification for minia ture air vehicles / A. Moses, M. J. Rutherford, K. P. Valavanis // IEEE International Conference on Control Applications. – ?
15. Detecting, Tracking and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence / W. Shi, G. Arabadjis, B. Bishop, P. Hill // Sensor Fusion – Foundation and Applications . – Rijeka, Croatia : InTech Europe, 2001. – P. 139–158.
16. Ю.Г Даник, І.В.Пулеко, М.В.Бугайов. Виявлення безпілотник літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів//Вісник ЖДТУ. 2014, № 4 (71). С.71- 80.
17. Weiqun Shi, Ronald Fante, John Joder, and Gregory Crowford. Multi-Modal Netted Sensor Fence for Homeland Security. Approved for Public Release; Distribution Unlimited Case, #05-0354. Pp. 1-12.

18. Nanjaport Intrater, W. Nathan Alexander, William J. Davenport, Sheril M. Grace, and Amanda Dropkin. Experimental Study of Quadcopter Acoustic and Performance at static Thrust Conditions. Aeroacoustics Conferences. 30 May-1 June. 2016, Lyon, France. 22Nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Pp. 1-14.
19. Saravanakumar A. Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor / A. Saravanakumar, K. Senthilkumar // Defence Science Journal. – March 2014. – Vol. 64, No. 2. – P. 95–98.
20. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В. Ф. Самохин, С. П. Остроухов, П. А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – Вып. № 70. – С.1–24.
21. Мошков П.А. Прогнозирование и снижение шума на местности легких винтовых самолетов. Дис. ... канд. техн. наук. М. МАИ (НИУ), 2015. - 143 с.
22. Мошков П.А., Беляев И.В., Остриков Н.Н. Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2.// XI Международная научная конференция по амфибийной и безаэродромной авиации “Гидроавиасалон-2016”, г.Геленджик, 23-24 сентября 2016, Тез. докл. М.: ЦАГИ, 2016, с. 45.
23. Ю.О. Гордієнко, М.В. Бугайов, О.І. Солонець, О.А. Солопій. Особливості акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2016. № 1 (22). С.32-35.
24. Пащенко Р.Э., Коршунов В.В., Цюпак Д.О., Богданова О.А. Распознавание БПЛА мультироторного типа с использованием фазовых портретов. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2013, № 4 (13), с. 68-72.
25. Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И. Исследование характеристик акустического излучения малых беспилотных летательных аппаратов// Сборник научных трудов VI Международного радиоэлектронного форума “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ-2017)” Международная научная конференция “Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг”. 24-26 октября 2017 г. Харьков, Украина. – Изд. “Точка”. С.107- 110.
26. Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Обнаружение БПЛА на фоне акустических шумов и помех. Там же, с. 68-70.
27. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звуковых сигналов малых беспилотных летательных аппаратов// Радиотехника. Всеукр. Межвед. Науч.-техн. Сборник. Вып 191. - Харьков, 2017. - С. 181-187.