

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,  
В.И. ЛЕОНИДОВ, канд. техн. наук, В.В. ВОРОНИН, канд. техн. наук,  
А.И. КАПУСТА, И.С. СЕЛЕЗНЕВ, Е.В. ПЕРШИН*

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ**

### **Введение**

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) способны выполнять широкий спектр полезных функций, но в то же время они представляют потенциальную угрозу для различных областей деятельности человека – хозяйственной, повседневной и военной [1]. Значительные технические возможности, широкая номенклатура и сравнительно невысокая стоимость БПЛА в сочетании с трудностями их наблюдения и контроля, приводящими к повышению безнаказанности и массовости противоправных действий с их использованием [2 – 5], – основные особенности данной проблемы.

При обнаружении и измерении координат беспилотных летательных аппаратов используют, радиолокационные, акустические, оптические и инфракрасные методы и средства [6 – 12], а также комплексные системы, в которых указанные средства интегрированы в единую структуру [13 – 23].

Первой информационной задачей локационных систем является задача обнаружения. Однако хорошо разработанные методы энергетического обнаружения сигналов по отношению к БПЛА не показывают достаточной эффективности [24, 25, 43, 44]. Вследствие этого на практике обнаружение БПЛА при наличии подобных ему объектов реализуют как задачу «обнаружения-распознавания», т.е. решение задачи обнаружения дрона сопровождается анализом наличия некоторых дополнительных признаков у принимаемого сигнала.

Известные системы комплексной обработки сигналов информационных каналов, используемые для обнаружения и наблюдения БПЛА, рассматриваются в ряде публикаций. В [26] рассмотрена система, включающая радиолокационный, оптический и радиочастотный информационные каналы. Исследуются особенности функционирования мультисенсорных систем обнаружения БПЛА, особенности измерения пространственных координат в комплексной системе, а также различные варианты объединения результатов и решений отдельных информационных каналов. Алгоритм обработки информации содержал сопоставление данных в различных каналах, обнаружение целей, определение местоположения. В условиях присутствия нескольких целей в зоне обзора предварительно осуществлялось обнаружение целей непосредственно в имеющихся информационных каналах, а далее происходило сопоставление и совмещение решений об обнаружении на предмет принадлежности их к определенному объекту. Результатом такой комплексной обработки являются решения о соответствии определенных отметок целям, либо о соответствии их ложной тревоге, вынесенной в канале. Анализировался также вклад каждого информационного канала в принятие решения об обнаружении. Далее осуществлялась комплексная обработка данных с целью измерения координат и определения пространственного местоположения объектов.

В работе [27] обсуждаются вопросы объединения информации в комплексной системе, включающей радиолокационный, акустический и оптические каналы – в видимом и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах, при решении задач обнаружения, распознавания наблюдаемых БПЛА и определения их пространственных координат. Комплексная сис-

тема обеспечивает погрешности измерения пеленга по азимуту и углу места соответственно 1,5 и 2,5 град. Определение направления в акустическом канале реализовано с использованием сверхразрешающих методов пространственного спектрального анализа.

Отмечается, что комплексирование радиолокационного и акустического каналов обеспечило значительное сокращение количества наблюдаемых ложных тревог, а комплексирование изображений видимого и инфракрасного спектральных диапазонов обеспечивает более оперативное и достоверное обнаружение БПЛА при наличии различного рода помех, дыма и неблагоприятного фона на изображениях.

В [28] осуществлялось наблюдение БПЛА с использованием статических и мобильных пунктов, расположенных в городской черте. Комплексная система включала радиолокационные, акустические, оптические средства и лазерный локатор. В акустическом канале осуществлялась пеленгация и определение местоположения с использованием метода триангуляции, обеспечивающего определение местоположения с ошибкой в 6 м.

В ряде известных работ при объединении данных различных информационных каналов комплексных систем обнаружения БПЛА применялись методы и средства искусственного интеллекта.

В [29] для предварительного обнаружения БПЛА использовалась радиолокационная станция, а далее информация об обнаруженных объектах использовалась акустической системой. Выходная информация последней использовалась для выявления БПЛА с помощью предварительно обученного алгоритма глубокого обучения, состоящего из трех ветвей MLP. Комплексная система обеспечивала малую вероятность ложных тревог и успешное обнаружение БПЛА в полевых условиях на дальности порядка 50 м. Хотя дальность оказалась не большой, но и стоимость такой комплексной системы также невелика.

Для объединения информации радиолокационного, акустического, видимого и инфракрасного каналов комплексной системы [30] использовался фильтр Калмана. Решение формировалось с использованием классификатора ближайшего соседа. Система обеспечивала наблюдение воздушных транспортных средств на удалении до 800 м.

Комплексная система [31] включала 30 видеокамер и 3 микрофона. Информация оптического и акустического каналов анализировалась с использованием классификаторов SVM, обученных предварительно с использованием изображений дронов и акустических сигналов, порождаемых БПЛА. Система успешно работала при полетах БПЛА на высотах до 100 м и на дальности до 200 м.

Количество работ, обнаружению и наблюдению БПЛА на фоне разнообразных помех, существующим методам и системам, предназначенным для решения этих задач, постоянно увеличивается. Внимание в литературе уделяется и мультисенсорным системам, построенным с использованием различных физических датчиков. Анализируются различные методы приема, обработки сигналов, их последующего интеллектуального анализа. Однако эффективность функционирования комплексных систем и соответствующих методов обработки сигналов на практике является недостаточной. В целом проблема наблюдения и противодействия БПЛА не получила удовлетворительного решения, она является сложной, многогранной, и требует комплексного, системного подхода при её решении.

Статья посвящена анализу возможностей систем с комплексной обработкой информации, получаемой по каждому из используемых каналов, синтезу и анализу эффективных методов комплексной обработки сигналов в интегрированной комплексной системе наблюдения беспилотных летательных аппаратов, построенных с учетом естественного пространственного эшелонирования различных информационных каналов и с использованием целеуказания.

### **Постановка задачи комплексной обработки**

При наличии нескольких информационных каналов в комплексной системе обнаружения БПЛА вначале происходит канальная обработка сигналов, принимаются некоторые достаточно простые решения, не требующие длительной выборки, значительной информативности входных сигналов, длительного времени анализа и значительных вычислительных ресур-

сов. Например, вначале принимается решение об энергетическом обнаружении целей в канале. Далее полученные входные сигналы и извлеченная из них информация, а также вновь поступившая на вход сигналы используются при последующей обработке и принятии более сложных решений.

В то же время полученную предварительную информацию об обнаруженных по энергетическому критерию целях, среди которых будут присутствовать как БПЛА, так и птицы и иные объекты, целесообразно использовать далее для целеуказания иным информационным каналам интегрированной системы. Это позволит облегчить и ускорить процесс нахождения ими уже обнаруженных ранее другим каналом целей, а информацию и сигнал наиболее «дальнозоркого» канала следует использовать совместно с информацией сигналов других каналов при принятии более сложных и обоснованных решений (например, об обнаружении, распознавании, классификации целей и т.д.).

Под целеуказанием будем понимать информационное сообщение о пространственных координатах, векторе движения и иных характеристиках БПЛА, переданное от одного канала комплексной системы обнаружения БПЛА, другому информационному каналу с целью более быстрого обнаружения объекта последним. «Энергетическим» будем называть процесс обнаружения объектов, выполняемый без учета информационных свойств, отделяющих БПЛА от иных находящихся в зоне обзора объектов.

Заметим, что цифровые методы обработки сигналов позволяют сохранять входные выборки, которые использовались при принятии решений на ранней стадии обработки – при формировании предварительных решений. Также позволяют сохранять извлеченную ранее из сигналов информацию в виде некоторых решений (об обнаруженных целях, результатах измерения их координат) и использовать все это при принятии более сложных решений на последующих этапах обработки.

Рассмотрим информационные возможности каждого из методов и соответствующих средств, входящих в состав комплексной системы обнаружения, измерения координат и параметров движения БПЛА.

Радиолокационный метод имеет достаточно хорошие поисковые возможности, значительную дальность действия, обеспечивает измерение пространственных координат (дальности и угловых координат), траектории перемещения объекта и оценку микродоплеровской сигнатуры, в виде набора информационных параметров, характеризующих особенности конструкции планера, двигателя и т.д. [2, 12, 22, 24, 25, 43, 44].

Оптический и инфракрасный методы имеют неплохие, но более скромные, чем радиолокационный метод, поисковые возможности. Они обеспечивают измерение пеленга, дальности, траектории и вектора скорости движения (по совокупности отметок целей), позволяют формировать «портреты» объектов в оптическом и инфракрасном диапазонах, используемые при решении задачи обнаружения-распознавания [6, 7, 17, 19].

Акустический метод имеет сравнительно невысокую дальность действия, но достаточно хорошие поисковые возможности. Этот метод обеспечивает измерение пеленга в двух плоскостях, позволяет определять пространственное местоположение объекта триангуляционным методом (но реализация этих возможностей на практике представляется труднореализуемой), позволяет формировать частотный портрет объекта, используемый далее в процессе решения задачи обнаружения-распознавания [4, 5, 8 – 10, 13, 14].

При наличии совокупности взаимосвязанных методов и средств обработки сигналов БПЛА, в условиях дефицита времени и ресурсов, обработка должна строиться таким образом, что вначале используются методы, имеющие лучшие поисковые возможности, затем последовательно подключаются другие методы в соответствии с их поисковыми, энергетическими и информационными возможностями.

Часть целей может быть отбракована еще на этапе последовательного подключения возможностей комплексной системы. По мере приближения объекта включаются все большие информационные возможности и соответствующие алгоритмы, и более сложные ситуации (в частности по распознаванию и отделению БПЛА от птиц и иных объектов) обрабатывают-

ся и принимаются решения с заданными показателями качества тогда, когда интегральная информативность комплексного (векторного) сигнала обеспечивает такую возможность.

Таким образом, обеспечивается последовательное подключение имеющихся в комплексной системе информационных ресурсов с учетом наличия у соответствующих методов поисковых возможностей.

Следует отметить, что в каждом канале вначале происходит энергетическое обнаружение объекта (обнаружение объекта на фоне шумов и помех), а затем либо в одном канале, либо по информации, получаемой из нескольких каналов, происходит информационное обнаружение БПЛА (распознавание его на фоне сходных с ним по некоторым признакам объектов). Далее осуществляется разрешение, оценка параметров, формирование траекторий и т.д. На каждом из указанных этапов решение может приниматься по сигналам одного, либо нескольких каналов.

Комплексирование различных каналов, методов и средств, применяемых при обнаружении БПЛА в интегрированной системе происходит с целью последовательного накопления и повышения качества и объема получаемой от объекта (объектов) информации в силу естественного пространственного эшелонирования имеющихся средств обнаружения и наблюдения, а также с целью повышения качества имеющихся или формирующихся решений об обнаружении, распознавании, разрешении, оценки координат и параметров движения объекта.

### **Пространственное эшелонирование информационных каналов**

Рассмотрим более детально энергетические и поисковые возможности методов и средств, входящих в состав комплексной системы обнаружения БПЛА, с целью организации целесообразной комплексной обработки сигналов с учетом естественного пространственного эшелонирования.

Возможности различных средств обнаружения, распознавания и сопровождения малых БПЛА приведены в таблице.

Радиолокационной энергетической характеристикой БПЛА является эффективная площадь рассеяния, которая имеет единицы измерения  $\text{м}^2$  и зависит от размеров объекта, его формы, материала из которого он изготовлен, длины волны и поляризации падающего поля. При решении задач распознавания и классификации БПЛА пользуются сигнатурой (или микро-доплеровской сигнатурой), которая представляет собой, по сути, радиолокационный портрет объекта. Сигнатура определяется кинематическими свойствами цели, а также модулирующей зондирующего сигнала при рассеянии движущимися элементами объекта – винтов, лопаток турбореактивного двигателя и т.д., геометрическими и физическими и особенностями цели.

В [36] приведены результаты выполненных расчетов дальности обнаружения БПЛА, имеющих различные характеристики. Результаты получены для РЛС с длиной волны 3 см. В расчетах использовались следующие характеристики БПЛА: масса аппаратов  $m$  изменялась в диапазоне от 5 до 200 кг, а ЭПР  $\sigma$  в диапазоне 0,05 – 5  $\text{м}^2$ .

Как видно из рис. 1, на высоте 3 км дальность обнаружения БПЛА с  $m=200$  кг ( $\sigma=5 \text{ м}^2$ ) составляла 11,8 км, а для БПЛА с  $m=5$  кг ( $\sigma=0,05 \text{ м}^2$ ) – 2,1 км. На высоте 2 км: при  $m=200$  кг ( $\sigma=5 \text{ м}^2$ ) дальность составляла 10,6 км, при  $m=5$  кг ( $\sigma=0,05 \text{ м}^2$ ) – 2 км. На высоте 0,5 км при  $m=200$  кг ( $\sigma=5 \text{ м}^2$ ) дальность обнаружения – 6 км, при  $m=5$  кг ( $\sigma=0,05 \text{ м}^2$ ) – 1,1 км.

Таким образом, уменьшение массогабаритных характеристик БПЛА сопровождается существенным уменьшением дальности их обнаружения. В случае использования радиопрозрачных (композиционных) материалов в конструкции летательных аппаратов процесс их обнаружения и наблюдения с использованием радиолокационных средств затрудняется еще более.

Возможности различных типов средств разведки при решении задач идентификации сопровождения малых БПЛА [35, 36]

Характеристика	Радио		Оптические			Акустические
	Средства РЛР (РЛС)	Средства РРТР	Средства ОЭР в видимом диапазоне	Средства ОЭР в ИК диапазоне	Лазерные средства	Средства АР
Обнаружение дневное время	+	+	+	-	+	+
Обнаружение в ночное время	+	+	-	+	+	+
Обнаружение в условиях естественных помех	+	+	+	+	+	+
Обнаружение БПЛА среди естественных объектов (прежде всего – птиц)	-	+	-	-	-	±
Обнаружение в сложных погодных условиях	±	+	-	-	-	-
Идентификация БПЛА	-	+	±	±	-	+
Селекция одиночных и групповых целей	+	+	+	+	+	+
		(по различным каналам)				(для БПЛА различных типов)
Сопровождение и формирование траектории	+	+	+	+	+	+
		(для многопоз. системы)				(для многопозиционной. системы)
Дальность действия	высокая	высокая	средняя	средняя	средняя	низкая

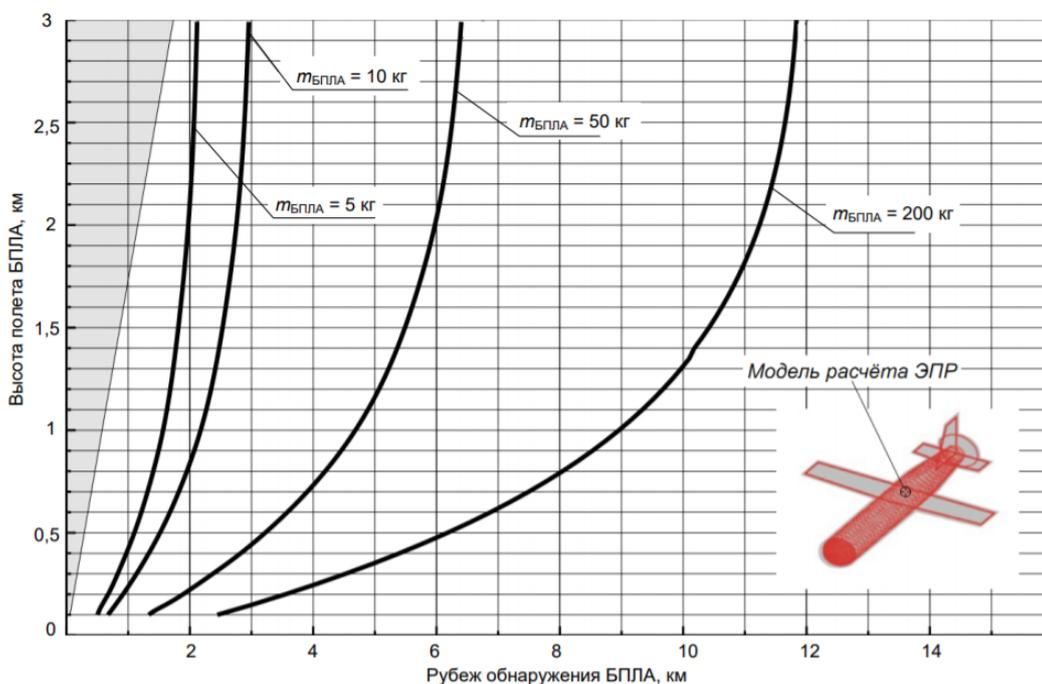


Рис. 1. Дальности обнаружения БПЛА, имеющих различные характеристики, РЛС с длиной волны  $\lambda=3$  см [36]

Методы и технические средства оптического обнаружения и наблюдения БПЛА (методы и средства оптико-электронной разведки – ОЭР), работающие в видимом диапазоне волн, обеспечивают достаточно хорошие характеристики по обнаружению БПЛА, в том числе малоразмерных и малоскоростных. В то же время эффективность оптического наблюдения летательных аппаратов зависит в значительной степени от состояния атмосферы, имеющихся погодных условий и времени суток.

Наблюдение БПЛА средствами ОЭР становится возможным при обеспечении формирования проекции его визуального облика на плоскость приемной сигнальной матрицы. С этой целью используются различные способы повышения контрастности и восстановления пропущенных элементов визуального графического образа наблюдаемого объекта. Для этого может быть использовано комплексирование изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра [17].

Увеличение дальности наблюдения БПЛА средствами ОЭР обеспечивается путем уменьшения поля зрения, зоны обзора и увеличения времени поиска. В этом смысле средства ОЭР БПЛА в видимом диапазоне спектра не обладают значительными поисковыми возможностями и им требуются внешние целеуказания, чтобы реализовать их возможности по наблюдению и сопровождению БПЛА.

Особенности процесса наблюдения БПЛА в видимом диапазоне спектра по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами обусловлены незначительной контрастностью их относительно наблюдаемого фона, сравнительно небольшими габаритными размерами, отсутствием на БПЛА световых маяков, меньшей площадью отражения, отсутствием (или уменьшенным размером) факела двигателя [38]. Критерии обнаружения и распознавания БПЛА техническими средствами оптического наблюдения сформулированы в [40].

На рис. 2 представлены дальности обнаружения БПЛА средствами ОЭР, приведенные в [36]. Данные получены расчетным путем для БПЛА с различными массогабаритными характеристиками при использовании объектива, имеющего угол поля зрения  $20^{\circ}$  и фокусное расстояние  $f=230$  мм. Расчет производился при коэффициенте рассеяния атмосферы в видимой области спектра  $\gamma \leq 0,0392$ , что соответствует метеорологической дальности видимости не менее 100 км.

С приведенными на рис. 2 результатами неплохо соотносится информация о дальности обнаружения БПЛА, полученная расчетным путем в [39]. Для нано-, микро- БПЛА дальность обнаружения оптическими средствами составляет 300 – 500 м; а для средних БПЛА (типа «Тахион», «Орлан») дальность находится в диапазоне 500 – 5000 м в зависимости от различных условий.

Результаты полигонных испытаний [37, 41] показывают, что средняя дальность оптического наблюдения БПЛА имеющимися средствами ОЭР при наблюдении полета БПЛА с боковых ракурсов составляет 150 – 700 м, а спереди – 100 – 400 м. Эксперименты полигонных испытаний показали, что при полете малых БПЛА на высотах 300 – 1000 м их оптическое (визуальное) обнаружение достаточно затруднительно [37, 41].

Использование средств оптического увеличения, используемых в качестве дублир-прицелов в российских зенитно-ракетных и зенитно-артиллерийских комплексах, обеспечивает увеличение дальности обнаружения БПЛА в 4,5-14 раз [37]: при использовании 4,5-кратного увеличения – до 2,2 км; при использовании 14-кратного – до 6,7 км.

Очевидно, что при использовании оптического увеличения ухудшаются поисковые возможности средств ОЭР вследствие уменьшения области обзораемого пространства [37].

В реальных условиях прозрачность атмосферы будет меньшей, чем та, что заложена в расчетах, что, следовательно, приведет к уменьшению дальности наблюдения БПЛА, а при

наличии в атмосфере осадков, тумана, пыли оптический метод наблюдения становится практически неэффективным [36].

Дополнительным средством обнаружения БПЛА являются средства ОЭР, работающие в ИК-диапазоне, которые наиболее эффективны в ночное время.

В литературе отсутствуют данные о дальности обнаружения БПЛА с использованием тепловизионных камер в различных условиях, однако отмечается, что дальность такого метода в целом не превышает дальности наблюдения БПЛА в видимом диапазоне электромагнитных волн.

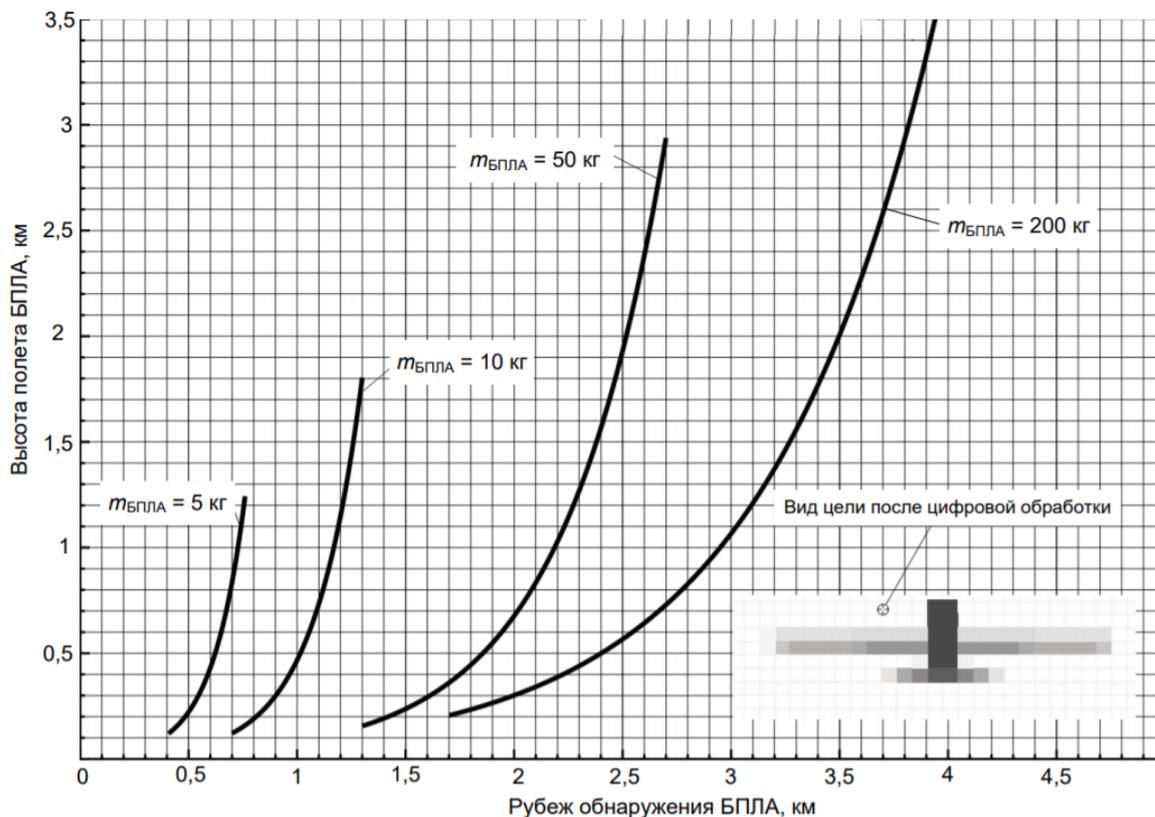


Рис. 2. Дальности обнаружения БПЛА оптическими средствами

Использование и прием акустических волн, излучаемых БПЛА в процессе полета, позволяет повысить достоверность обнаружения БПЛА в условиях, когда «традиционные» средства – оптические и радиолокационные, не могут обеспечить требуемых качественных показателей его обнаружения.

Применение средств акустической разведки (АР) позволяет [36] осуществлять обнаружение объекта, определять пеленг на БПЛА; определять класс (тип) БПЛА.

Средства АР являются пассивными по принципу действия и обладают следующими особенностями и достоинствами [42]:

- обеспечивают скрытность функционирования системы обнаружения и возможность работы в условиях интенсивного радиоэлектронного противодействия;
- обеспечивают достаточно надежное автоматическое обнаружение малоскоростных маловысотных БПЛА в условиях плохой оптической видимости, при сложных погодных условиях, в условиях сложных рельефов местности, при наличии застройки и в помещениях;
- имеют малые габаритные размеры, низкое энергопотребление и более высокие показатели по критерию «эффективность – стоимость» (в сравнении с радиолокационными и оптико-электронными средствами).

Акустические системы нашли применение в системах охраны территорий и объектов, в пограничных структурах и неплохо показали себя при обнаружении одиночных БПЛА в относительно незашумлённых условиях [36].

Основные недостатки акустических систем, которые ограничивают возможности их применения при обнаружении БПЛА, следующие [36]: сравнительно невысокая точность оценки координат БПЛА (в том числе вследствие рефракции распространения акустических волн в атмосфере); небольшие дальности обнаружения БПЛА: до 1 км по высоте и до 1,5 – 2 км по дальности.

В [39] приведены значения дальностей обнаружения БПЛА различных типов средствами АР: БПЛА с поршневым двигателем – до 2 км; вертолетный БПЛА с электрическим двигателем – 200 – 300 м; планерный БПЛА с электрическим двигателем – 100 – 200 м.

Таким образом, наилучшими поисковыми возможностями обладает радиолокационный метод, далее следуют по убывающей оптический (инфракрасный) и акустический методы. Зоны наблюдения различных методов и средств в комплексной системе графически могут быть представлены следующим образом [36] (рис. 3).

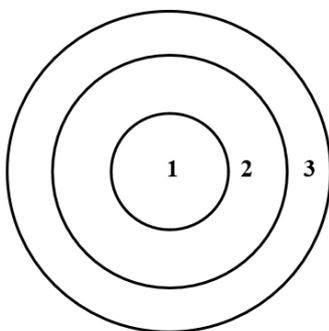
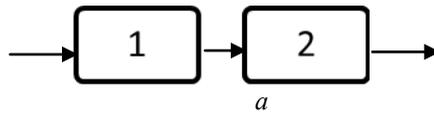


Рис. 3. Графическое представление зон обнаружения каналов комплексной системы обнаружения БПЛА:  
1 – акустический канал; 2 – оптический канал; 3 – радиолокационный канал

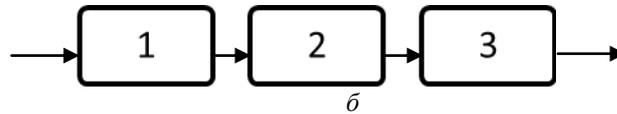
### **Методы комплексной обработки сигналов с использованием целеуказания**

Одной из задач РЛС комплексной интегрированной системы наблюдения БПЛА является выдача координат и параметров движения целей на рубеже целеуказания с точностью, позволяющей средствам ОЭР произвести по данным целеуказания, полученным от РЛС, энергетическое обнаружение анализируемой цели без дополнительно поиска (допоиска), или, по крайней мере, ограничить зону допоиска до приемлемых пространственных объемов. Таким образом, происходит «завязывание» процесса обработки информации по каждой радиолокационной цели, выявленной РЛС, который включает все большие аппаратные, вычислительные и интеллектуальные ресурсы по мере приближения цели к охраняемому объекту, позволяя производить все более «тонкую» обработку поступающих на вход комплексной системы входных сигналов и извлекая из них все большее количество информации. В свою очередь цель, по мере приближения к охраняемому объекту, предоставляет, обеспечивает возможность для получения все большего количества информации, как бы втягиваясь в невидимую «информационную паутину».

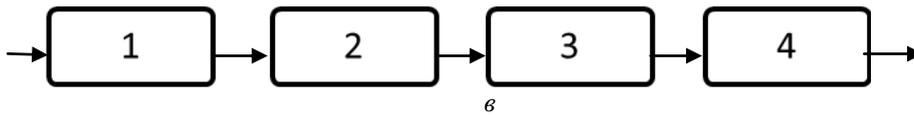
Последовательное решение задач обнаружения и распознавания в комплексной интегрированной системе наблюдения БПЛА по мере приближения цели к охраняемому объекту отображено на рис. 4.



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
2 – распознавание в радиолокационном канале



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
2 – энергетическое обнаружение в оптическом канале;  
3 – совместное распознавание по данным радиолокационного и оптического каналов



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
2 – энергетическое обнаружение в оптическом канале;  
3 – энергетическое обнаружение в инфракрасном канале;  
4 – совместное распознавание по данным радиолокационного, оптического и инфракрасного каналов

Рис. 4. Последовательность решения задач обнаружения и распознавания комплексной системой наблюдения БПЛА: *a* – в радиолокационном канале; *б* – в радиолокационном и оптическом каналах; *в* – в радиолокационном, оптическом и инфракрасном каналах

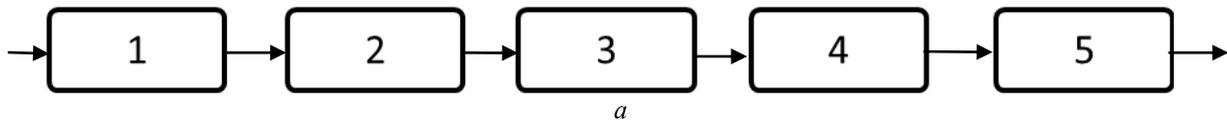
Последовательное выполнение задач обнаружения, оценки координат, целеуказания и распознавания по мере приближения цели в комплексной системе наблюдения БПЛА представлены на рис. 5.

В соответствии с представленными алгоритмами (рис. 4, 5) комплексируются каналы получения информации путем их объединения в комплексную систему, выполняющую совместную обработку полученной информации и обеспечивающую повышение основных показателей качества системы – помехозащищенности, надежности, точности измерений, вероятности правильного обнаружения и классификации (распознавания) целей [17, 23].

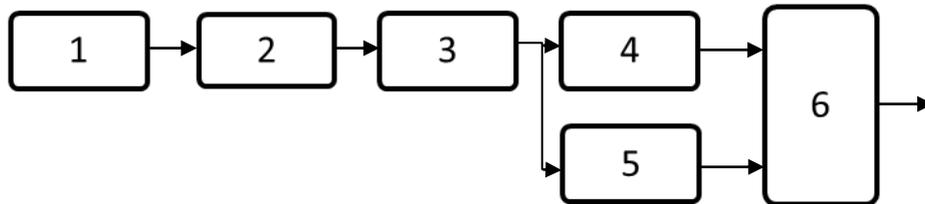
Многомодальная интеграция или многомодальное объединение в итоге уменьшает общую неопределенность и обеспечивает повышение точности, с которой признаки оцениваются системой. В этом случае реализуется наличие в сигналах каналов избыточной и взаимно дополняющей информации, избыточность информации также служит цели повышения надежности системы в случае появления аномальных ошибок, промахов или сбоев в каналах. Очень важно, что дополнительная информация из нескольких модальностей позволяет использовать признаки, которые невозможно однозначно воспринять и интерпретировать, имея лишь информацию от каждой модальности в отдельности. Также благодаря возможности реализовать параллельную обработку данных в используемых каналах несколько модальностей обеспечивают предоставление более оперативной информации. Подобное решение (обнаружение, распознавание), в принципе, можно получить и при использовании одного или меньшего количества информационных каналов, но для этого потребуется большее время для накопления информации.

Объединение информации в комплексной системе, реализуемое в соответствии с алгоритмами (рис. 4, 5) возможно на уровне сигналов, на уровне признаков и на уровне решений [23, 32]. При этом могут быть реализованы следующие стратегии объединения данных:

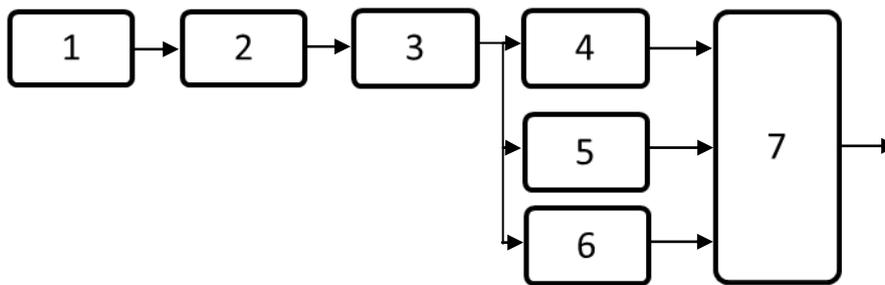
- раннего объединения, реализуемые на уровне сигналов;
- раннего объединения, реализуемые на уровне признаков описания;
- позднего объединения, реализуемые на семантическом уровне принятия решения;
- гибридного объединения.



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
 2 – оценка координат в радиолокационном канале;  
 3 – формирование целеуказания;  
 4 – энергетическое обнаружение в оптическом канале;  
 5 – совместное распознавание по данным радиолокационного и оптического каналов



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
 2 – оценка координат в радиолокационном канале;  
 3 – формирование целеуказания;  
 4 – энергетическое обнаружение в оптическом канале;  
 5 – энергетическое обнаружение в инфракрасном канале;  
 6 – совместное распознавание по данным радиолокационного, оптического и инфракрасного каналов



- 1 – энергетическое обнаружение в радиолокационном канале;  
 2 – оценка координат в радиолокационном канале;  
 3 – формирование целеуказания;  
 4 – энергетическое обнаружение в оптическом канале;  
 5 – энергетическое обнаружение в инфракрасном канале;  
 6 – энергетическое обнаружение в акустическом канале;  
 7 – совместное распознавание по данным радиолокационного, оптического, акустического и инфракрасного каналов

Рис. 5. Последовательность выполнения задач обнаружения, оценки координат, целеуказания и распознавания комплексной системой наблюдения БПЛА: *a* – в радиолокационном и оптическом каналах; *б* – в радиолокационном, оптическом и инфракрасном каналах; *в* – в радиолокационном, оптическом, инфракрасном и акустическом каналах

Использование различных видов стратегии объединения, в частности стратегии гибридного объединения многомодальных сигналов информационных каналов комплексной интегрированной системы, позволяет производить эффективную обработку и объединение информации с учетом специфики решаемых данной системой задач и возможностей имеющихся в каналах технических средств.

В настоящее время открываются значительные возможности для объединения канальной информации в интегрированных системах при использовании нейронных сетевых технологий. Данные методы имеют ряд особенностей. В частности, объединение информационных каналов в этом случае осуществляется не на уровне признаков, формируемых в отдель-

ных концептах, а путем объединения имеющейся частной информации в единое мультимодальное семантическое представление (мультимодальная функция) [34].

Сигналы и результаты униполярного анализа в каналах при использовании нейронных сетей (НС) и раннего объединения сливаются до того, как соответствующие каналные представления детально изучены и сформированы соответствующие признаки. При использовании позднего слияния вначале осуществляется изучение канальной информации с помощью НС. В этом случае полученные оценки унимодальных функций образуют вектор оценок мультимодальной функции, которые далее являются входными данными для системы машинного обучения и интерпретации полученной многоканальной информации.

При использовании последовательного пространственного эшелонирования и целеуказаний в комплексной системе реализуется последовательное накопление информации из последовательно подключаемых каналов, далее осуществляется ее обработка с использованием нейросетевых либо традиционных технологий интерпретации и принятия решений.

## **Выводы**

1. Анализ известных комплексных систем обнаружения БПЛА, реализованных в виде совокупности интегрированных информационных каналов, применяемых в них технических решений, методов и средств обработки многомодальных сигналов и изображений, показал, что известные системы и методы обработки информации не позволяют решать актуальные задачи на практике с необходимой эффективностью и требуется их дальнейшее усовершенствование.

Проблема эффективного обнаружения и противодействия БПЛА сегодня не решена, она является многогранной, сложной и требует системного подхода при ее решении.

2. Проанализированы информационные, энергетические и поисковые возможности методов и средств, входящих в состав комплексной системы обнаружения БПЛА, с целью организации целесообразной комплексной обработки сигналов с учетом естественного пространственного эшелонирования.

Показано, что наилучшими поисковыми возможностями обладает радиолокационный метод, далее следуют по убывающей оптический (инфракрасный) и акустический методы.

3. Синтезированы новые эффективные методы комплексной обработки многомодальных сигналов и изображений в интегрированной комплексной системе наблюдения беспилотных летательных аппаратов, построенные с учетом естественного пространственного эшелонирования различных информационных каналов и с использованием целеуказания. Показаны особенности объединения многомодальной информации с использованием нейросетевых технологий при использовании целеуказаний в комплексной системе.

4. Использование предложенных методов обработки и объединения многомодальной информации в комплексных интегрированных системах наблюдения БПЛА позволит осуществлять гибкое объединение разнородной информации, сигналов и изображений, получаемых в используемых каналах, с учетом возможностей имеющихся технических средств и специфики решаемых задач.

## **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. 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. 2019. Volume 78. Issue 9. P. 771-781.

4. 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, Vol.77. Iss. 10. pp. 915–924.
5. 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.
6. 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.
7. 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*; Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo; pp.537-578.
8. 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, Volume 78, Issue 9; pp. 759-770.
9. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals. 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications // *Science and Technology (PIC S and T 2018) – Proceedings*, 31 January 2019; pp. 392-396.
10. 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; pp. 1-4.
11. 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. Vol. 79, Iss. 9. P. 769-780.
12. 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, pp. 175–178.
13. Semenets V.V., Kartashov V.M., Leonidov V.I.. Features of Acoustic Noise of Small Unmanned Aerial Vehicles // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. Vol. 79, Iss. 11. P. 985-995. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.80.
14. 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. №81; С. 38-46.
15. 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. Vol. 79, Iss. 9. P. 769-780.
16. Kartashov V. M., Tikhonov V. A. , Voronin V. V. Features of Construction and Application of Complex Systems for the Atmosphere Remote Sounding // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Volume 78, Issue 8. P.743-749.
17. 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.
18. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V., Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, Iss. 20. P. 1885-1892.
19. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez; 2016, IGI Global, 341 p.
20. Sytnik O., Kartashov V. Methods and Algorithms for Technical Vision in Radar Introspection. Chapter 13 // *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*. IGI Global, 2019; pp. 373-391.
21. 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.
22. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2011. 234 с.
23. 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.
24. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации : учеб. пособие для вузов. Москва : Радио и связь, 1992. 304 с.

25. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
26. Koch W., Koller J., Ulmke M. Ground target tracking and road map extraction. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2006; 61:197–208. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2006.09.013.
27. Hengy S., Laurenzis M., Schertzer S., Hommes A., Kloeppe F., Shoykhetbrod A., Geibig T., Johannes W., Rassy O., Christnacher F. Multimodal UAV detection: Study of various intrusion scenarios // Proceedings of the Electro-Optical Remote Sensing XI International Society for Optics and Photonics; Warsaw, Poland. 11–14 September 2017; p. 104340P.
28. Laurenzis M., Hengy S., Hammer M., Hommes A., Johannes W., Giovanneschi F., Rassy O., Bacher E., Schertzer S., Poyet J.M. An adaptive sensing approach for the detection of small UAV: First investigation of static sensor network and moving sensor platform // Proceedings of the Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVII International Society for Optics and Photonics; Orlando, FL, USA. 16–19 April 2018; p. 106460S.
29. Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T., Lee K., Kolodzy P.J., Slater J.C., Scherrek M., Sam M., Gallagher J.C., et al. Combination of radar and audio sensors for identification of rotor-type unmanned aerial vehicles // Proceedings of the 2015 IEEE SENSORS; Busan, Korea. 1–4 November 2015; pp. 1–4.
30. Charvat G.L., Fenn A.J., Perry B.T. The MIT IAP radar course: Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging // Proceedings of the 2012 IEEE Radar Conference; Atlanta, GA, USA. 7–11 May 2012; pp. 0138–0144.
31. 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.
32. Басов О.О., Карпов А.А. Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации // Обработка информации и управления. 2015. №2. С.7-14.
33. 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.
34. Atrey P. K., Hossain M. A., Kankanhalli M. S. Multimodal Fusion for Multimedia Analysis: a Survey // Multimedia Systems. 2010. Vol. 16. Iss. 6. P. 345–379.
35. Countering rogue drones. FICCI Committee on Drones, EY, 2018; 31 p.
36. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2020. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye\\_letatelny\\_e\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelny_e_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_problemy_i_perspektivy_protivostoania) (дата обращения 18.10.2020).
37. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс]. 29.01.2015. № 6 (14). – URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpkvzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата доступа 18.10.2020).
38. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нуждин В. М., Расторгуев В. В., Соколов П. В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.
39. Изделия и комплексы противодействия беспилотным летательным аппаратам [Доклад]. СПб. : АО «НИИ «Вектор», 2018. 51 с.
40. Годунов А. И., Шишков С. В., Бикеев Р. Р. Взаимосвязь машинного (технического) зрения с компьютерным зрением при идентификации малогабаритного беспилотного летательного аппарата // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 213-217.
41. Зайцев А. В., Назарчук И. И., Красавцев О. О., Кичулкин Д. А. Особенности борьбы с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2013. № 5. С. 37-43.
42. Гейстер С. Р., Джеки А. М. Решение задачи обнаружения маловысотных легкомоторных летательных аппаратов путем использования акустических и сейсмических полей // Наука и военная безопасность. 2008. № 1. С. 42-46. URL: <http://militaryarticle.ru/nauka-i-voennayabezopasnost/2008/12105-reshenie-zadachi-obnaruzhenija-malovysotnyh> (дата обращения 18.10.2020).
43. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
44. Shirman Y.D., Manzhos V.N. The theory and technique of processing radar information against the background of interference. Moskva : Radio and communications, 1981. 416 p.

*Поступила в редколлегию 30.10.2020*

*Сведения об авторах:*

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

**Олейников Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: [vladimir.oleinikov@nure.ua](mailto:vladimir.oleinikov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7197-9760>

**Леонидов Владимир Иванович** – канд. техн. наук, с. н. с. кафедры биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: [volodymyr.leonidov@nure.ua](mailto:volodymyr.leonidov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5218-3177>

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

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

**Селезнёв Иван Сергеевич** – аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-7540>

**Першин Евгений Васильевич** – аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: [yevhenii.pershyn@nure.ua](mailto:yevhenii.pershyn@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4573-9381>