

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук,  
В.П. РЯБУХА, канд. техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук,  
В.В. ВОРОНИН, канд. техн. наук, А.И. КАПУСТА, И.С. СЕЛЕЗНЕВ*

## **МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ, АКУСТИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ И ИНФРАКРАСНЫХ СИГНАЛОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

### **Введение**

В настоящее время известно большое количество различных типов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), способных выполнять широкий спектр полезных функций, а с другой стороны, способных нести потенциальную угрозу для различных областей деятельности человека – хозяйственной, повседневной и военной [1]. Трудности их обнаружения и наблюдения с использованием современных технических средств, а также сравнительно невысокая стоимость беспилотных аппаратов приводят к повышению безнаказанности и массовости противоправных действий с использованием БПЛА [2 – 5]. В соответствии с этим – задача защиты разнообразных объектов от воздействия БПЛА представляет собой одну из актуальных задач современности.

С целью обнаружения, распознавания и измерения координат беспилотных летательных аппаратов используют, прежде всего, радиолокационные, акустические, оптические и инфракрасные методы и средства [6 – 12].

Каждый из используемых методов обладает определенными достоинствами, недостатками и ограничениями. При этом каждый из методов характеризуется собственной областью возможностей, которая определяется множеством измеряемых информационных параметров сигнала с соответствующими показателями качества, диапазоном дальностей, пространственно-временным разрешением и т. д.

Поскольку области возможностей различных методов не совпадают, то появляется предпосылка совместного использования систем различного вида для расширения набора измеряемых параметров, диапазона наблюдаемых дальностей и повышения информативности получаемых данных путем совместной (комплексной) их обработки [13 – 19].

Во всех информационных каналах операции измерения координат БПЛА предшествует задача обнаружения. Хорошо разработанные методы энергетического обнаружения сигналов в данном случае не показывают достаточной эффективности [20, 21, 34, 35]. Это обусловлено тем, что обнаружение искомого объекта реализуется на фоне помех, имеющих определенные сходства с сигналом БПЛА, чаще всего, на фоне помех, формируемых птицами. Поэтому обнаружение дрона при наличии подобных ему объектов в используемых информационных каналах на практике реализуют как задачу «обнаружение-распознавание». Вследствие этого решение задачи обнаружения сопровождается анализом наличия некоторых дополнительных признаков у принимаемого сигнала.

Комплексная обработка сигналов различных информационных каналов может осуществляться как на этапе обнаружения, так и на этапе измерения координат. Причем, на этапе обнаружения она будет наиболее востребована в силу сложности задачи обнаружения-распознавания.

Рассмотрим известные в литературе системы комплексной обработки информации, используемые для обнаружения БПЛА. Целью публикации [22] является изучение работы мультисенсорных систем, предназначенных для решения задач обнаружения БПЛА, определения их пространственных координат, а также изучение различных схем объединения данных используемых информационных каналов. Система содержит радиолокационный, оптический и радиочастотный каналы. Обработка информации включала такие этапы: сопоставление данных, обнаружение целей и измерение их пространственных координат. Вначале

выполнялось обнаружение целей отдельно в различных информационных каналах, затем осуществлялось сопоставление и совмещение результатов обнаружения по принадлежности к определенной цели. На этом этапе выявлялось, какие решения соответствуют целям, а какие – представляют собой ложную тревогу, определялся также вклад каждого канала в обнаружение. Далее реализовывался алгоритм слияния данных в процессе комплексного измерения пространственных координат объектов.

В [23] рассмотрено объединение информации, поступающей по радиолокационному, акустическому и оптическому каналам с целью обнаружения, классификации наблюдаемых БПЛА и определения их местоположения. Комплексная система обеспечивает погрешности измерения угловых координат – азимута и угла места соответственно 1,5 и 2,5 град. Пеленгование по акустическому каналу осуществляется с использованием алгоритма MUSIC-MUSIC.

Комплексирование радиолокационного и акустического каналов позволило существенно уменьшить вероятность ложных тревог, а комплексирование изображений видимого и инфракрасного диапазонов (последнее получено в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR)) позволило обеспечить более быстрое и достоверное обнаружение БПЛА при наличии помех, дыма и плотного фона на изображениях.

Обнаружение и отслеживание БПЛА в городской черте [24] осуществлялось с использованием статических и мобильных пунктов, которые включали радиолокационные, акустические, оптические средства наблюдения и лазерный локатор – лидар. Пеленгация и определение местоположения осуществлялось с использованием многоканальной акустической системы и метода триангуляции. Система позволяет обнаруживать дрон и определять его местоположение со средней ошибкой в 6 м.

В ряде работ рассмотрено объединение данных различных информационных каналов, предназначенных для обнаружения БПЛА, с использованием средств искусственного интеллекта.

В [25] предварительное обнаружение БПЛА осуществлялось с помощью радиолокационной станции. Совокупность акустических датчиков, информация с которых подавалась на предварительно обученный алгоритм глубокого обучения, состоящий из трех MLP, использовалась для выявления БПЛА. Система продемонстрировала успешное решение задач по обнаружению БПЛА в полевых условиях при малой вероятности ложных тревог. Стоимость такой комплексной системы достаточно мала, однако дальность обнаружения дронов составляет всего 50 м.

Недорогое оборудование, включающее радиолокационный, акустический, видимый и инфракрасный каналы, использовалось в комплексной системе [26]. Для объединения информации указанных каналов использовался фильтр Калмана, с которого информация подавалась на классификатор ближайшего соседа для вынесения решения. Система позволяла отслеживать воздушные транспортные средства на расстоянии до 800 м.

В системе [27] использовался комплекс из 30 видеокамер и трех микрофонов. В оптическом и акустическом каналах использовались классификаторы SVM, обученные соответственно по изображениям беспилотников и акустическим сигналам, порождаемым БПЛА. Система показала успешную работу при полетах различных видов БПЛА на высотах до 100 м и на удалении до 200 м.

Число публикаций, в которых рассматриваются методы и системы, предназначенные для обнаружения и наблюдения БПЛА на фоне разнообразных помех и различных объектов, постоянно увеличивается. Определенное внимание в литературе уделяется и комплексным системам, построенным с использованием различных физических датчиков – мультисенсорным системам. Рассматриваются различные методы приема, обработки сигналов, их последующего интеллектуального анализа. Однако эффективность функционирования систем с комплексной обработкой сигналов на практике является недостаточной.

Авторы многих публикаций не вполне осознают сложность задачи обнаружения и противодействия БПЛА, рассматривают только отдельные, частные аспекты этой проблематики, не обладая сведениями о реальных возможностях существующих технических средств и комплексов. Вместе с тем, проблема эффективного наблюдения и противодействия БПЛА (особенно малым БПЛА) до настоящего времени не имеет удовлетворительного решения, является сложной, многогранной и требует комплексного, системного подхода при ее решении.

Статья посвящена анализу возможностей систем с комплексной обработкой информации, получаемой по каждому из используемых каналов, а также разработке новых более эффективных методов комплексирования радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных информационных каналов комплексных систем обнаружения и измерения координат БПЛА.

### **Стратегии и методы объединения информации многоканальных систем**

Увеличение числа используемых в комплексной системе измерителей, работающих как на одних, так и на различных физических принципах, позволяет улучшить показатели качества системы [28].

Дублирование даже однотипных измерителей, определяющих одни и те же параметры (координаты), приводит к структурной избыточности, что повышает надежность системы, поскольку выход из строя одного из измерителей не приводит к отказу всей комплексной системы в целом. Объединение различных измерителей, особенно работающих на разных физических принципах (например, радиолокационных и акустических), повышает помехозащищенность системы, так как каждый из каналов подвержен воздействию различных помех [28, 29].

Создание структурной избыточности сопровождается появлением информационной избыточности. В этом случае один и тот же параметр измеряется в различных каналах, что обеспечивает получение большего количества информации. В результате обработки полученной информации становится возможным уменьшить погрешности результатов измерений и повысить точность показателей качества системы.

Таким образом, под комплексированием каналов получения информации понимается их объединение в комплексную систему, реализующую совместную обработку полученной информации и обеспечивающую повышение основных показателей качества системы – помехозащищенности, надежности, точности измерений, вероятности правильного обнаружения и классификации (распознавания) целей [30].

В литературе также говорят о многомодальном объединении, обеспечивающем синергетическое использование информации, полученной из разных информационных каналов (модальностей). Термин «многомодальная интеграция/многомодальное объединение» может соответствовать любой стадии процесса интеграции, где присутствует совместное использование информации, полученной от различных источников. Объединение данных имеет смысл в том случае, когда используемые данные составляют избыточную и взаимно дополняющую информацию [31]. Интеграция в итоге уменьшает общую неопределенность и обеспечивает повышению точности, с которой признаки оцениваются системой. 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.

Обобщенная структурная схема системы комплексной обработки сигналов информационных каналов, используемых при обнаружении БПЛА, приведена на рис. 1.

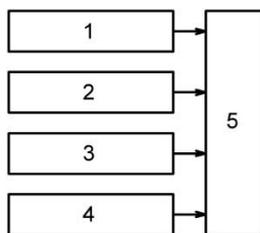


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы комплексной обработки сигналов, используемых при обнаружении БПЛА:  
1 – радиолокационный канал, 2 – акустический канал, 3 – оптический канал, 4 – инфракрасный канал, 5 – устройство обработки и принятия решения

Объединение информации в комплексной системе возможно на уровне сигналов, на уровне признаков и на уровне решений.

*Стратегии объединения данных*, получаемых с использованием различных каналов и датчиков получения входной информации об изучаемом объекте, разделяют на основные группы [28]:

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

При раннем объединении информационные признаки формируются с использованием сигналов, поступающих по используемым информационным каналам (с использованием сигналов разных модальностей). Затем образованный вектор признаков  $\vec{P} = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_n]$  подается в устройство обработки-распознавания и принятия решения  $R$ . Стратегия раннего объединения многомодальной информации в комплексной системе обнаружения БПЛА на уровне признаков представлена на рис. 2.

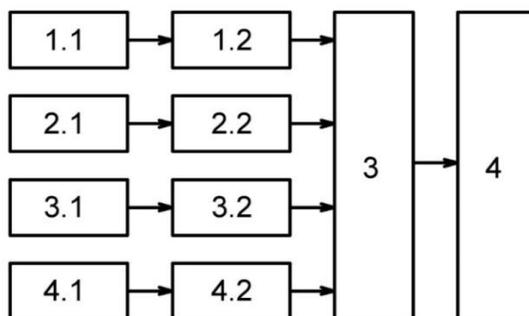


Рис. 2. Стратегия раннего объединения многомодальной информации на уровне признаков:  
1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – формирователи радиолокационного, акустического, оптического и инфракрасного сигналов (изображений), 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 – формирователи признаков, 3 – объединение признаков (формирование вектора признаков), 4 – устройство принятия решения

Стратегия раннего объединения многомодальной информации в комплексной системе обнаружения БПЛА на уровне сигналов и признаков представлена на рис. 3. Здесь в каналах 1 и 2 объединение реализовано на уровне признаков, а в каналах 3 и 4 – на уровне физических сигналов (изображений).

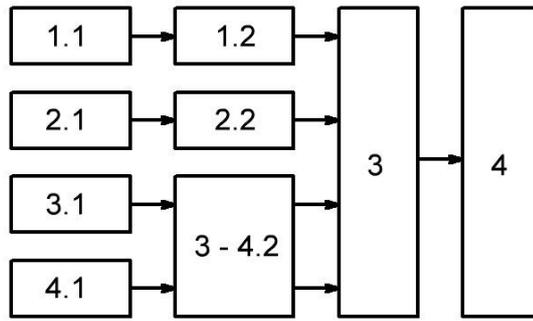


Рис. 3. Стратегия раннего объединения многомодальной информации на уровне сигналов и признаков: 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – формирователи радиолокационного, акустического, оптического и инфракрасного сигналов (изображений), 1.2, 2.2 – формирователи признаков, 3-4.2 – объединение сигналов и формирование признаков, 3 – объединение признаков (формирование вектора признаков), 4 – устройство принятия решения

В методе позднего объединения каналные устройства обработки выносят частные решения в используемых информационных каналах, образуя вектор канальных решений  $\vec{R} = [r_1, \dots, r_i, \dots, r_n]$  на основе соответствующих канальных признаков. Полученные решения интегрируются в вектор частных решений, с использованием которого формируется далее результирующее решение  $R$  (рис. 4.).

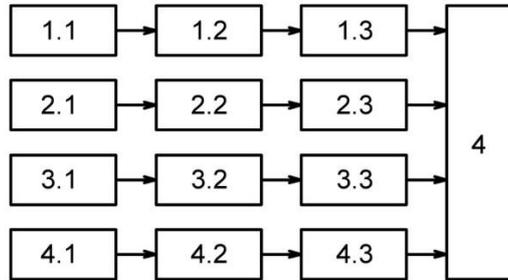


Рис. 4. Стратегия позднего объединения многомодальной информации на уровне решений: 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – формирователи радиолокационного, акустического, оптического и инфракрасного сигналов (изображений), 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 – формирователи признаков, 1.3, 2.3, 3.3, 4.3 – устройства принятия канальных решений, 4 – устройство формирования итогового решения

Стратегия гибридного объединения позволяет обеспечивать более гибкую комплексную обработку информации, поступающей по имеющимся каналам, с последующим принятием итогового решения. Она может быть реализована в различных видах, с использованием различных схем, некоторые из них представлены на рис. 5, а, б.

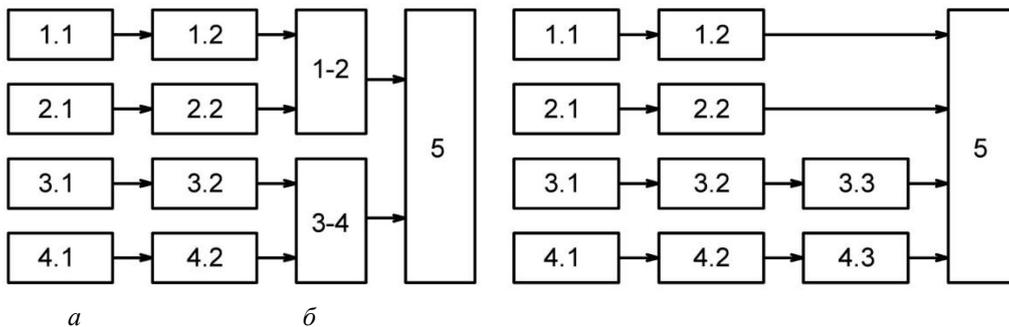


Рис. 5. Различные стратегии гибридного объединения многомодальной информации: 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – формирователи радиолокационного, акустического, оптического и инфракрасного сигналов (изображений), 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 – формирователи признаков, 1-2, 3-4 – устройства объединения признаков, 3.3, 4.3 – устройства принятия частных решений, 5 – устройство принятия итогового решения

Стратегия гибридного объединения многомодальных сигналов информационных каналов комплексной системы позволит осуществлять эффективную обработку и объединение информации с учетом специфики решаемых задач и возможностей имеющихся технических средств.

При использовании классических подходов принятие, вынесение решения по имеющимся входным данным сопровождается потерей, разрушением значительной части информации, имеющейся во входных данных. И далее в процессе обработки участвует только информация, перешедшая в принятое решение (например, об обнаружении) или перешедшая в вынесенную оценку (оценку дальности до объекта) [31].

Использование современных математических средств (алгоритмов машинного обучения, нейронных сетей), а также современных технических средств (аппаратных и программных) позволяет более полноценно использовать информацию, содержащуюся во входных сигналах информационных каналов комплексных систем, осуществляя грамотное ее объединение с использованием рассмотренных подходов.

*Методы объединения многомодальной (канальной) информации* подразделяются на три основные группы: методы, основанные на правилах; основанные на классификации и методы, основанные на оценках [32].

Методы, основанные на правилах, включают линейное взвешенное объединение, мажоритарное правило и методы, определенные исследователем.

Методы, основанные на классификации, используют методы опорных векторов, байесовский вывод, теорию Дампстера – Шафера, динамические байесовские сети, нейронные сети, модель максимальной энтропии.

Методы, основанные на оценках, включают фильтр Калмана, расширенный фильтр Калмана, фракционный фильтр.

Существенное значение при объединении информации различных информационных каналов имеет корреляция между данными в различных каналах – кроссмодальная корреляция. Корреляция может определяться на различных уровнях объединения информации и использоваться в случае реализации различных методов [32].

В то же время, во внимание может приниматься не только корреляция между отдельными модальностями, но также и их независимость, что в ряде случаев позволяет достичь выигрыша при принятии решений.

Сигналы используемых информационных каналов обычно поступают в разных физических представлениях, обрабатываются с использованием различных методов, записываются и фиксируются с различной скоростью и в различных форматах. В соответствии с этим при их совместной обработке и принятии решений возникает необходимость в их синхронизации.

В случае синхронизации на уровне признаков происходит объединение признаков, сформированных в различных информационных каналах, которые получены в течение некоторого времени анализа от разнородных, но связанных и коррелированных между собой модальностей. Синхронизация на уровне принятия решений также нуждается в формировании временных меток, которые будут сопровождать происходящие события и принимаемые решения.

*Методы объединения канальной информации при использовании нейронных сетей* имеют ряд особенностей. В частности, объединение информационных каналов здесь осуществляется не на уровне признаков, формируемых в униполярных концептах, а путем объединения в мультимодальное семантическое представление (мультимодальную функцию) [32].

Результаты униполярного анализа при использовании нейронных сетей (НС) и раннего объединения сливаются до того, как соответствующие канальные представления изучены и сформированы соответствующие признаки. При использовании позднего слияния изучается канальная информация с помощью НС, при которой полученные оценки унимодальных

функций образуют вектор оценок мультимодальных функций, которые являются входными данными для системы машинного обучения.

В настоящее время сформулированы основные технические задачи, которые возникают при мультиспектральном объединении изображений, видео и звука [33]. Это представление, трансформация, выравнивание, слияние и совместное обучение. Представление определяет собой метод, который направлен на объединение унимодальных сигналов в общее пространство представлений. Трансформация – изменение формы представляемых данных. В процессе выравнивания определяются существующие связи между элементами различных модальностей. Слияние – объединение информации нескольких источников, совместное обучение – этап, на котором знания извлекаются из существующих модальностей.

### **Комплексирование информационных каналов с позиций статистической теории радиосистем**

С позиций теории статистической теории радиосистем имеется два основных подхода к комплексированию информационных средств [34 – 36]. В соответствии с первым из них задача комплексирования решается на этапе первичной обработки информации, в соответствии со вторым – на этапе вторичной обработки (на этапе объединения решений). Вторичной принято называть обработку, при которой используются результаты вынесенных оценок и решений после соответствующей обработки поступающих входных сигналов (фильтрации, детектирования). При вторичной обработке решается задача обнаружения и сглаживания, например траекторий летательных аппаратов и т.д. В процессе третичной обработки с помощью математических методов уточняется и дополняется полученная информация, достигается повышение полноты данных и устойчивости сопровождения целей, а также оптимизируется группировка радиолокационных средств для получения радиолокационной информации (РЛИ) максимального качества при минимальном расходе ресурсов с учетом имеющихся обстановки и средств. Входной для третичной обработки является информация о трассах целей, полученных в результате вторичной обработки от различных радиолокационных станций (РЛС), координаты источников РЛИ и их характеристики. Выход третичной обработки – трассы целей, полученные с учётом передачи цели от одной РЛС к другой, точностные показатели разных источников и т. д.

При первом подходе к комплексированию в рамках статистической теории радиосистем по результатам наблюдения векторного процесса, компоненты которого представляют собой входные сигналы информационных каналов, осуществляется оптимальный синтез устройств первичной обработки сигналов в каждом канале, а также объединение информации, получаемой в каждом из каналов [35, 37]. Такой подход позволяет синтезировать оптимальную (в соответствии с выбранным критерием качества) комплексную систему обработки информации (КСОИ), обеспечивающую получение максимального количества информации из векторного процесса, наблюдаемого на входах информационных каналов.

При втором подходе компоненты наблюдаемого векторного процесса будут представлять собой выходные данные устройств первичной обработки сигналов. Это будут принятые решения об обнаружении, результаты оценивания координат объекта и т.д. В этом случае осуществляется синтез комплексной системы вторичной обработки информации (КСВОИ). Поскольку синтез КСВОИ осуществляется при имеющихся ограничениях на структуру и параметры устройств первичной обработки, которые заданы и физически реализованы, то качество получаемой информации на выходе КСВОИ может оказаться более низким, по сравнению с качеством выходных результатов КСОИ. Снижение качества обусловлено принятыми ограничениями на структуру системы.

Несмотря на некоторый проигрыш КСВОИ в сравнении с КСОИ использование оптимизации на этапе вторичной обработки (этапе решений) во многих случаях оказывается целесообразным на практике, поскольку опирается на использование того оборудования (устройств

первичной обработки сигналов), которые имеются в распоряжении разработчика и используются им для построения соответствующих информационных каналов.

Математические методы статистической теории радиосистем позволяют осуществить оптимальный синтез комплексных систем обнаружения и измерения параметров БПЛА при использовании различных информационных каналов и технических средств.

### **Выводы**

1. Проанализированы известные комплексные системы обнаружения БПЛА, реализованные в виде совокупности информационных каналов, используемых в них системотехнических и технических решений, методы обработки многомодальных сигналов и изображений. Показано, что известные системы и методы обработки информации не позволяют решать задачи с необходимой эффективностью, и требуется их дальнейшее совершенствование.

Проблема эффективного наблюдения и противодействия БПЛА (особенно малым БПЛА) до настоящего времени не имеет удовлетворительного решения, является сложной, многогранной и требует комплексного, системного подхода при ее решении.

2. Обобщены известные и предложены новые стратегии и методы обработки и объединения (интеграции) многомодальной информации, получаемой с использованием информационных каналов, применяемых при наблюдении БПЛА. Показаны особенности объединения многомодальной информации с использованием нейросетевых технологий.

В частности, объединение информационных каналов при раннем объединении осуществляется не на уровне признаков, формируемых в униполярных концептах, а путем объединения в мультимодальное семантическое представление (мультимодальную функцию). При использовании позднего слияния изучается канальная информации с помощью НС, полученные оценки унимодальных функций образуют вектор оценок мультимодальных функций, которые являются входными данными для системы машинного обучения.

3. Проанализированы возможности объединения многомодальной информации комплексных систем обнаружения БПЛА с использованием статистической теории радиосистем (стохастической теории нелинейной фильтрации). Показано, что стохастическая теория нелинейной фильтрации может быть использована для оптимизации комплексных систем обнаружения БПЛА. С ее использованием осуществляется оптимальный синтез устройств первичной обработки сигналов в каждом канале, а также объединяется информация, получаемая в каждом из каналов. Такой подход позволяет синтезировать оптимальную (в соответствии с выбранным критерием качества) комплексную систему обработки информации – КСОИ, обеспечивающую получение максимального количества информации из векторного процесса, наблюдаемого на входах информационных каналов.

4. Использование разработанных подходов, стратегий и методов обработки и объединения многомодальной информации в комплексных системах наблюдения БПЛА позволит осуществлять гибкое объединение разнородной информации, получаемой по используемым каналам, с учетом специфики решаемых задач и возможностей используемых технических средств.

### **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. Vol. 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. P. 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. 181–193.
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 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. P.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. Vol. 78, Issue 9. P. 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. P. 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. P. 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. P. 175–178.
13. 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. Vol. 78, Issue 8. P.743–749.
14. Карташов В.М., Олейников В.Н., Колендовская М.М., Тимошенко Л.П., Капуста А.И., Рыбников Н.В. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // *Радиотехника*. 2020. Вып. 201. С.120–129.
15. 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.
16. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision / Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quiñonez; 2016. IGI Global. 341 p.
17. 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. P. 373–391.
18. 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.
19. Карташов В.М. Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2011. 234 с.
20. Сосулин Ю.Г. Тероретические основы радиолокации и радионавигации : учеб. пособие для вузов. Москва : Радио и связь, 1992. 304 с.
21. Карташов В.М. и др. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

25. 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. P. 1–4.
26. 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.
27. 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.
28. Басов О.О., Карпов А.А. Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации // Обработка информации и управления. 2015. №2. С.7–14.
29. 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.
30. Wu K., Lin C. K., Chang E., Smith J. R. Multimodal Information Fusion for Video Concept Detection // Proceedings IEEE Intern. Conf. on Image Processing, Singapore, 2004. P. 2391–2394.
31. Bendjebbour A., et al. Multisensor Image Segmentation Using Dempster–Shafer Fusion in Markov FieldsContext // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39(8). P. 1789–1798.
32. Nefian A. V., Liang L., Pi X., Liu X., Murphye K. Dynamic Bayesian Networks for Audio-visual Speech Recognition // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2002. N 11. P. 1–15.
33. Town C. Multi-sensory and Multi-modal Fusion for Sentient Computing // Intern. Journal of ComputerVision. 2007. Vol. 71. P. 235–253.
34. Tikhonov V.I. Optimal reception of signals. Москва : Radio and communications, 1983. 320 p.
35. Falkovich S. E., Khomyakov E. N. Statistical theory of measuring radio systems. Москва : Radio and communications, 1981. 288 p.
36. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
37. Shirman Y.D., Manzhos V.N. The theory and technique of processing radar information against the background of interference. Москва : Radio and communications, 1981. 416 p.

*Поступила в редколлегию 02.10.2020*

*Сведения об авторах:*

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

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

**Рябуха Вячеслав Петрович** – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ведущий научный сотрудник ПНИЛ радиолокационных систем наблюдения, Украина, e-mail: [viacheslav.riabukha@nure.ua](mailto:viacheslav.riabukha@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8607-9551>

**Бабкин Станислав Иванович** – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший научный сотрудник кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [pri.res@nure.ua](mailto:pri.res@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-3551>

**Воронин Виталий Валериевич** – канд. техн. наук, преподаватель радиотехнических дисциплин, Светловодский политехнический колледж Центральноукраинского национального технического университета, Украина, e-mail: [vvoronin2016@gmail.com](mailto:vvoronin2016@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-9024>

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

**Селезнёв Иван Сергеевич** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [ivan.seleznov@nure.ua](mailto:ivan.seleznov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-7540>