

А. К. Пяткин<sup>1</sup>, Е. С. Янакова<sup>2</sup><sup>1</sup> ОАО «Радиофизика», <sup>2</sup> ОАО НПЦ «ЭЛВИС»

# КОМПЛЕКСНЫЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ НАЗЕМНЫХ, НАДВОДНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

*Рассмотрен системный подход к обнаружению наземных, надводных и воздушных целей с малой эффективной площадью рассеяния (от 0,01 м<sup>2</sup>), на основе которого могут строиться современные системы охраны, способные обнаруживать как людей и транспортные средства, так и высокотехнологичных роботов. Главным достоинством предложенного подхода является высокая эффективность, легкая масштабируемость, технологичность при производстве элементов системы.*

**Ключевые слова:** мультиспектральный подход, охранные системы, радиолокация, цифровая обработка сигналов.

## Введение

Рынок миниатюрных, сверхмалых (переносных) дистанционно-управляемых наземных и воздушных аппаратов постоянно растет. По данным аналитической компании Forecast International [1], ежегодный рост объема мирового рынка миниатюрных роботов с 2016 по 2020 год составит 10–15%.

Высокотехнологичные роботы, оснащенные системой проведения видеосъемок, системой подъема в воздух тяжелых камер высокого разрешения, передовыми системами автопилотирования и курсоустойчивости, представляют угрозу частной жизни граждан. В последнее время участились случаи проникновения роботов на территорию особо значимых объектов государства. Проблема обостряется тем, что развитие технологий позволило получить широкое распространение и общедоступность наземных, надводных и низколетящих роботов.

В настоящее время отсутствует система автоматизированного тотального контроля над воздушным, надводным и наземным пространством вокруг протяженных объектов в условиях жаркого и холодного климатов, плохой видимости и в ночное время суток.

В мире интенсивно развиваются мультиспектральные системы мониторинга с функциями измерения расстояния до объекта и стабилизацией изображения. В большинстве случаев в таких системах присутствуют телекамеры двойного диапазона (инфракрасного и видео) с лазерным дальномером [2]. Существуют мультиспектральные методы и системы обнаружения малозаметных целей на основе мультиспектрального накопления и методов спектрального анализа в многомерной плоскости [3]. Большое внимание в мире уделяется миниатюризации систем мониторинга, для чего разрабатываются компактные мультиспектральные

системы сканирования [4] на основе активной локации в видеодиапазоне (технология LADAR).

Разрабатываются интересные методы оценки элементов объекта в мультиспектральной области для формирования гипотезы о целевом объекте [5], а также поляризационные мультиспектральные методы дистанционного зондирования [6]. Мультиспектральные системы различного назначения разрабатываются в европейских странах, США, Корее, Японии. Интенсивно ведется разработка отдельных мультиспектральных элементов: контроллеры, датчики, устройства, лазеры, платформы [7].

Актуальной является разработка системы круглосуточного, всепогодного обнаружения, захвата и обезвреживания наземных, надводных и воздушных целей с ЭПР от 0,01 м<sup>2</sup> и перемещающихся со скоростью до 400 км/ч, которая основана на передовых цифровых технологиях компьютерного зрения.

Цель статьи – описать основные концепции нового мультиспектрального подхода для построения системы охраны для обнаружения наземных, надводных и воздушных целей (рис. 1).

Под типовыми целями в этой статье будем подразумевать людей, машины, планеры, парашютистов, легкомоторные самолеты и вертолеты, беспилотные летательные аппараты (табл. 1).

## Основы мультиспектрального подхода

Мультиспектральный подход основан на применении четырех частотных диапазонов, представленных в табл. 2. Каждый диапазон предназначен для использования в определенном режиме, что позволяет достигать высоких тактико-технических характеристик во время эксплуатации системы на основе предлагаемой технологии.



Рисунок 1. Мультиспектральный подход для построения системы охраны

Акустический частотный диапазон обладает значительными преимуществами по сравнению с другими диапазонами при обнаружении винтокрылых роботов (беспилотных летательных аппаратов (БЛА)). Звук винтокрылых БЛА тяжело замаскировать, в отличие от сигналов управления и передачи видеоинформации, которые в реальной системе могут отсутствовать у воздушной робототехники (режим автопилота). Основные принципы работы акустической подсистемы заключаются в следующих положениях.

1. Акустическая подсистема состоит из комплекта интеллектуальных акустических датчиков,

расположенных по территории охраняемого объекта, беспроводных сетевых адаптеров, серверного компьютера (далее – сервер), мобильных устройств и стационарных компьютеров для рабочего места оператора специального программного обеспечения.

2. Каждый акустический датчик принимает сигнал, выполняет первичную обработку сигнала, классификацию источников акустического сигнала и передает обработанную информацию на сервер по беспроводному каналу связи (стандарт IEEE802.11 a/n/g). На сервере анализируется информация с нескольких датчиков и принимается решение о наличии или отсутствии винтокрылых роботов на территории охраняемого объекта. В случае принятия решения о наличии винтокрылого робота определяется его месторасположение, параметры движения, сообщается о тревоге оператору.

3. Схема построения акустической подсистемы (рис. 2) обеспечивает легкую масштабируемость и возможность интеграции в распределенную систему безопасности посредством стандартного интерфейса и протокола. В случае если площадь объекта превышает несколько гектаров, то узлы подсистемы связаны беспроводным каналом связи по стандарту IEEE802.11 s, и датчики выступают в качестве ретранслятора сигналов на сервер.

Таблица 1. Характеристики типовых целей (нарушителей)

Тип цели	Скорость перемещения, м/с
Парашютист	Вертикальная с парашютом: 5,0–8,7 Вертикальная без парашюта: 50,0 Горизонтальная: 2,4
Парапланерист	5,5–20,0
Дельтапланерист	7,7–36,1
Легкомоторные вертолеты	0–70,0
БЛА	0,5–55,5
Человек	0,3–10
Наземное транспортное средство	0,5–50

Таблица 2. Диапазоны частот мультиспектральной системы

Название диапазона	Основное назначение
Акустический	Обнаружение звуков винтокрылых роботов вне прямой видимости
Радиолокационный	Круглосуточное всепогодное обнаружение наземных, надводных и воздушных целей
Инфракрасный	Подтверждение наличия наземных, надводных и воздушных целей в любое время суток
Видео	Подтверждение наличия наземных, надводных и воздушных целей

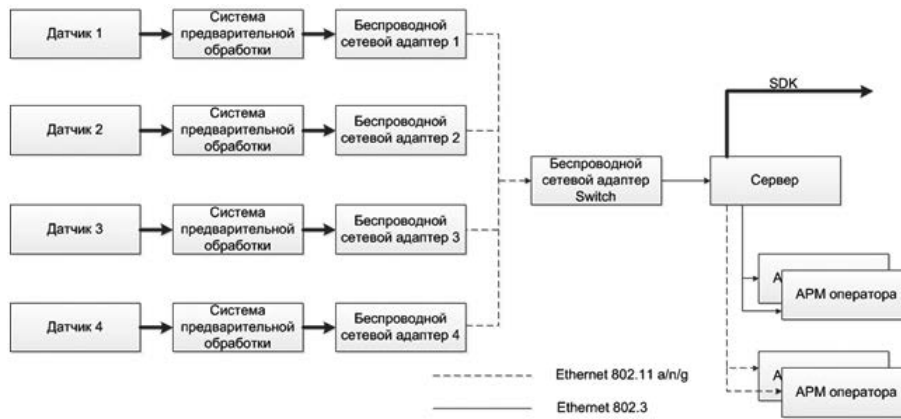


Рисунок 2. Схема основных узлов акустической подсистемы

4. Индикация тревоги, контроль состояния датчиков выполняются на мобильном и (или) стационарном рабочем месте оператора, в котором на топографической карте отображается состояние датчиков и состояние контролируемой территории.

Радиолокационный диапазон применяется для обнаружения движущихся целей методами активной радиолокации с излучением электромагнитной волны. Устойчивое развитие современных радиолокационных станций (РЛС) обеспечивается под влиянием таких решающих факторов, как наличие научно-технического задела в области создания высокоэффективных радиоэлектронных систем и зарождение новых технологий, определяющих развитие и смещение приоритетов научно-технической направленности. В настоящее время БЛА с малой ЭПР практически неуязвимы для существующих средств воздушной разведки и мониторинга, поэтому основное внимание следует уделять построению радиолокационных приборных комплексов обнаружения наземных, воздушных и надводных роботов с ЭПР порядка  $0,01 \text{ м}^2$ .

Применение технологии широкополосных и сверхширокополосных сигналов позволит получить новые практические результаты в следующих направлениях:

- повышение точности измерения расстояния до объекта и пониженной разрешающей способности по дальности, эффективность и устойчивость РЛС к воздействию внешних и узкополосных электромагнитных излучений и помех;
- повышение вероятности распознавания классов и типов радиолокационных целей;
- простота защиты от всех видов пассивных помех;
- относительно дешевое массовое производство систем.

Видео- и инфракрасный диапазоны применяются в теории и технологии создания интеллектуальных систем, которые могут производить обнаружение, слежение, подтверждение и классификацию целей. Происходит комплексирование (интеграция) радиолокационных средств обзора и обнаружения целей с системами наблюдения оптического, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Поэтому в настоящее время РЛС обнаружения являются составной частью комплексной системы обнаружения целей для повышения надежности и эффективности охранного оборудования. Основное внимание уделяется разработке высокоточных платформ, средств, алгоритмов и программ комплексирования поворотных телекамер и устройств обнаружения.

На основе мультиспектральных датчиков (радиолокационные станции, акустические датчики, телекамеры видео- и инфракрасных диапазонов) предлагается подход к построению комплексной системы на основе технологий распределенных систем и теории информационно-измерительных систем (ИИС), где под ИИС понимается комплекс измерительных устройств, обеспечивающих одновременное получение человеком-оператором или ЭВМ необходимой информации о свойствах и состоянии объекта охраны. Отличительными особенностями такого подхода являются измерение параметров объекта измерительными устройствами в разном частотном диапазоне, передача измерительной информации в единый центр и представление полученных данных в унифицированном виде, наиболее удобном для последующей обработки получателем. Обобщенная схема предлагаемого подхода представлена на рис. 3. Различные параметры объекта измерения воспринимаются датчиками, унифицируются, как правило, цифровыми преобразователями и передаются по каналам связи в единый пункт сбора данных. Программное устройство воспринимает информацию от измерительных устройств и передает ее получателю информации.

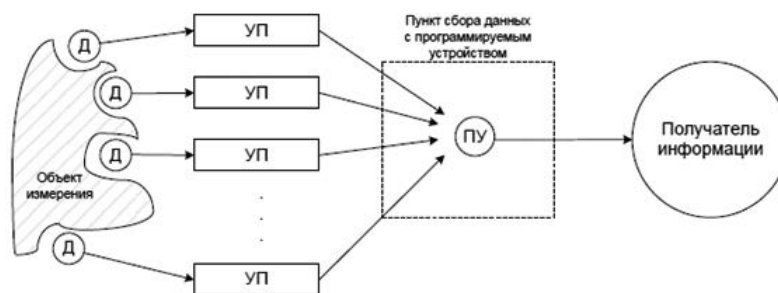


Рисунок 3. Схема измерительно-информационной системы: Д– датчики; УП – унифицирующий преобразователь; ПУ – программное устройство

### Ядро мультиспектральной системы – РЛС обнаружения и сопровождения

Ядром мультиспектральной системы, которое обеспечивает покрытие наземного и воздушного пространства с обнаружением типовых целей (табл. 1), является современная наземная цифровая радиолокационная станция, потенциальные тактико-технические характеристики которой поданы в табл. 3.

Разработка РЛС нового поколения базируется на следующих концепциях построения [8]:

- цифровая антенная решетка;
- низкая излучаемая мощность;
- высокая технологичность цифровых устройств;
- удешевление аппаратной части;
- развитое программное обеспечение;
- новый уровень качества и стоимости получаемой информации;
- встраиваемая обработка;
- унифицированное программное обеспечение узлов;
- отказ от механических элементов в конструкции.

Таблица 3. Тактико-технические характеристики РЛС обнаружения и сопровождения в воздушном и наземном пространстве

Характеристика	Значение
Импульсная мощность излучения, Вт	4
Средняя мощность излучения, Вт	0,4
Ширина ДНА (азимут x угол места), град	360x180
Минимальный коэффициент усиления антенны в рабочем секторе, дБ	4
Точность определения:	
дальности, м	10
азимута, град	1,8
угла места, град	1,5
Частота обновления выходной траекторной информации, Гц	4
Разрешение по доплеровской скорости, м/с	0,6
Разрешение по дальности, м	40
Диапазон однозначно определяемых радиальных скоростей, м/с	0,6–110
Дальность обнаружения цели с ЭПР (м <sup>2</sup> ):	
нано-БЛА           0,01	700
человек           0,5	1800
транспорт, парашютист 1	2100
дельтапланерист   5	3100
вертолет           20	5000
Минимальная дальность обнаружения, м	50
Габаритные размеры (диаметр x высота), м	0,5x0,3



Рисунок 4. Кластерное построение радиолокационной системы: а – коммутатор антенных подрешеток; б – способ покрытия зоны зенита

Очевидно, что при разработке подобных РЛС необходимо опираться на высокую технологичность производства цифровых устройств и максимальное упрощение и удешевление аппаратной части за счет сложного и развитого программного обеспечения, себестоимость которого, заложенная в каждом экземпляре РЛС, уменьшается пропорционально количеству произведенных РЛС.

Электронное сканирование позволяет независимо управлять разрешением по доплеровской скорости и темпом азимутального сканирования, что не было возможным с применением механических поворотных устройств. Разрешение по доплеровской скорости ограничивалось скоростью вращения и шириной луча приемопередающей антенны. Электронное сканирование можно организовать как на уровне антенной решетки (технология построения фазированной антенной решетки, ФАР), так и с использованием коммутатора, при котором сканирование осуществляется путем электронного переключения подрешеток. Судя по всему, наиболее дешевое решение основано на попеременной работе антенных подрешеток, где каждая подрешетка является законченным программно-аппаратным модулем со встроенной обработкой (рис. 4). Такое построение радиолокационной системы будем называть кластерным.

При кластерном построении радиолокационной системы предоставляется возможность выбирать зону контроля датчика, тем самым удешевляя аппаратное обеспечение комплексной системы, а также покрывая «сложные» зоны, одной из которых является зона зенита (рис. 4б). Радиолокационная кластерная система работает следующим образом: подрешетки условно разбиваются на мастер- и слейв-решетки. Мастер-решетка – это та антенная подрешетка, которая излучает в данный момент времени. При шестиугольном построении кластера (рис. 4а) одновременно могут существовать три мастера, две боковых и одна оппозиционная слейв-решетки. Система боковых и оппозиционных слейвов открывает доступ к применению особых способов

обработки и синхронизации работы подрешеток. Наличие коммутатора на уровне вторичной обработки информации позволяет избавиться от потери мощности при излучении.

Каждый элемент кластера состоит из двух функциональных частей [8]: специализированного приемопередающего устройства (ППУ) и универсального вычислительного устройства (ВУ). Главный элемент ППУ – это специализированный модуль цифровой первичной обработки (согласованная фильтрация и обнаружение) и синтеза зондирующих сигналов, который одновременно является контроллером, управляющим временной диаграммой работы составных частей ППУ (передающего модуля, генератора опорных частот, приемного модуля и приемопередающей антенны).

Универсальное вычислительное устройство производит вторичную обработку (обнаружение и вычисление траекторий) на основе результатов первичной обработки, отображение выходной радиолокационной информации, прием управляющих команд и, при необходимости, фиксацию или передачу полученной радиолокационной информации внешним потребителям. Это дает возможность использовать РЛС в комплексных системах охраны в качестве самостоятельного датчика.

### Результаты и выводы

Комплексная система охраны с применением технологии мультиспектрального компьютерного зрения апробировалась на военных полигонах с применением типовых беспилотных целей (табл. 4). В состав мультиспектральной системы входят:

- РЛС «Сектор» [9] со средней излучаемой мощностью 0,75 мВт;
- купольная сетевая PTZ-камера AXIS;
- акустические датчики на основе электретных микрофонов.

Результаты испытаний показали высокую достоверность и точность обнаружения и сопровождения

Таблица 4. Результаты испытаний мультиспектральной системы по обнаружению БЛА

Модель БЛА	Оценка ЭПР, м <sup>2</sup>	Максимальная дальность обнаружения БЛА, м
Orlan	0,4–0,7	750
Eleron 3	0,3	400
Phantom	Менее 0,3	400

беспилотных аппаратов, включая миниатюрные БЛА типа Phantom с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) менее 0,3 м<sup>2</sup>. Вероятность правильного обнаружения целей составила 99% при вероятности ложной тревоги порядка 10–6.

Мультиспектральные технологии позволяют улучшить качество и эффективность существующих систем охраны, а также расширить технические характеристики существующих систем по обнаружению малоразмерных целей, таких как миниатюрные БЛА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U. S. Aerospace / Defense Industry in World Context. Current Status & Forecast 2016–2029. [Электронный ресурс]. Адрес доступа: [www.forecastinternational.com](http://www.forecastinternational.com)
2. Patent CN202798991. Multispectral monitoring system with distance measurement and image stabilization functions, filing date 19.09.2012; publication date 13.03.2013. 3 p.
3. Patent CN102830394. Weak target detection method based on multispectral accumulation, filing date 17.07.2012; publication date 19.12.2012. 3 p.
4. Patent WO 2011045087. Compact multispectral scanning system / Andres Carlos Callejero, Alfa Imaging, S.A., filing date 18.03.2010, publication date 21.04.2011. 3 p.
5. Patent DE102008038527. Method for evaluating object elements in images of multispectral camera or synthetic aperture radar device, involves forming target object hypothesis / Hans Pongratz, Eads Deutschland GmbH, filing date 20.08.2008; publication date 25.02.2010. 3 p.
6. Patent CN101526621. Fast multispectral remote sensing polarization imager, filing date 16.02.2009, publication date 09.09.2009. 3 p.
7. Patent EP 2226648. 3D image construction system with multispectral sensor / Stephan Junger, Wladimir Tschekalinskij, Norbert Weber, Fraunhofer-Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung e.V., filing date 25.02.2009; publication date 29.12.2009. 3 p.
8. Пяткин А. К. Семейство унифицированных многофункциональных цифровых обзорных РЛС ближнего радиуса действия // Радиолокация и связь. 2010. № 10. С. 3–18.
9. Радиолокационные станции обнаружения и сопровождения «Сектор» [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <http://elvees.ru/home/index.php?id=55>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пяткин Алексей Константинович**, к.т.н, начальник сектора, ОАО «Радиофизика», 125363, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, тел.: 8 (916) 143-72-55, e-mail: [alexpyatkin@yandex.ru](mailto:alexpyatkin@yandex.ru).

**Янакова Елена Сергеевна**, д.т.н, старший научный сотрудник, ОАО НПЦ «ЭЛВИС», 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4922, д. 4, стр. 2, тел.: 8 (905) 504-97-88, e-mail: [helen@elvees.com](mailto:helen@elvees.com).

*For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 3. – P. 28–34.  
A. Pyatkin, E. Yanakova*

## COMPREHENSIVE MULTISPECTRAL APPROACH TO DETECTION OF GROUND, SURFACE AND AIR TARGETS

System approach has been investigated with respect to detection of ground, surface and air targets with small scattering cross section (from 0,01 m<sup>2</sup>), on the basis of which modern security systems can be developed, that are able to detect people, vehicles and high-tech robots. The main advantage of this approach is its high performance, easy scalability, technological characteristics when producing elements of the system.

**Keywords:** multispectral approach, security systems, radar, digital signal processing.

## REFERENCES

1. U.S. Aerospace / Defense Industry in World Context. Current Status & Forecast 2016–2029. Available at: [www.forecastinternational.com](http://www.forecastinternational.com)

2. Patent CN202798991. Multispectral monitoring system with distance measurement and image stabilization functions, filing date 19.09.2012, publication date 13.03.2013. 3 p.
3. Patent CN102830394. Weak target detection method based on multispectral accumulation, filing date 17.07.2012, publication date 19.12.2012. 3 p.
4. Patent WO 2011045087. Compact multispectral scanning system / Andres Carlos Callejero, Alfa Imaging, S.A., filing date 18.03.2010, publication date 21.04.2011. 3 p.
5. Patent DE102008038527. Method for evaluating object elements in images of multispectral camera or synthetic aperture radar device, involves forming target object hypothesis / Hans Pongratz, Eads Deutschland GmbH, filing date 20.08.2008; publication date 25.02.2010. 3 p.
6. Patent CN101526621. Fast multispectral remote sensing polarization imager, filing date 16.02.2009, publication date 09.09.2009. 3 p.
7. Patent EP 2226648. 3D image construction system with multispectral sensor / Stephan Junger, Wladimir Tschekalinskij, Norbert Weber, Fraunhofer-Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung e.V., filing date 25.02.2009, publication date 29.12.2009. 3 p.
8. Pyatkin A.K. Semeystvo unifikirovannykh mnogofunktsional'nykh tsifrovyykh obzornykh RLS blizhnego radiusa deystviya [The tribe of unified multi-function digital surveillance radar stations of short-range] // *Radiolokatsiya i svyaz'*, 2010, no. 10, pp. 3–18.
9. Radiolokatsionnye statsii obnaruzheniya i soprovozhdeniya «Sektor» [Radar detection and tracking stations «Sector»] (In Russ.) Available at: <http://elvees.ru/home/index.php?id=55>

### AUTHORS

**Pjatkin Alexey**, PhD, Head of Sector, R&D Center «Radiophysics», 10, Geroev Panfilovcev st., Moscow, 125363, tel.: +7 (916) 143-72-55, e-mail: alexpyatkin@yandex.ru.

**Yanakova Elena**, PhD, Senior Researcher, R&D Center «ELVEES», p. 2, travel 4922, Zelenograd, Moscow, 1244984, tel.: +7 (905) 504-97-88, e-mail: helen@elvees.com.