

А.К. КАРАПЕТЯН, Б.Ф. БАДАЛЯН

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ
ДРОН-ДЕТЕКЦИИ**

С каждым годом возрастающее значение беспилотных летательных аппаратов способствует непрекращающимся работам по усовершенствованию их технических характеристик. В связи с повышением спроса произошло снижение цен на комплектующие, что дало возможность военного применения данных аппаратов в террористических целях. Статья посвящена исследованию существующих технических решений и методов обнаружения беспилотников. Разработан прототип усовершенствованной мультисенсорной системы дрон-детекции на базе современных технологий обработки данных.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дрон-детекция, сигнатура, нейтрализация, вейвлеты, шифрование.

Введение. На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в разных отраслях жизнедеятельности. БПЛА используются для доставки медикаментов и гуманитарной помощи, проверки линий электропередач и трубопроводов. В сельском хозяйстве БПЛА с GPS-навигацией используются при опылении полей, обеспечивая значительную экономию химикатов и более тщательную обработку посевов. Дроны используются также при мониторинге и прогнозировании чрезвычайных ситуаций, отслеживании пробок на дорогах и заторов на реках.

Следует отметить, что технические инновации в сфере беспилотной летательной техники открывают и новые возможности для осуществления террористических атак и разведывательных операций. Современные БПЛА с возможностью фото- и видеосъемки, находясь на значительном расстоянии от объекта, защищённого традиционными системами безопасности, могут вести с воздуха промышленный шпионаж, наблюдение за частной жизнью или осуществлять заброс за охраняемый периметр потенциально взрывоопасных веществ.

В обозримом будущем дроны станут компактнее, еще автономнее и умнее, превратившись в неотъемлемый и повсеместный гаджет.

Постановка задачи. В соответствии с общепринятой классификацией БПЛА по их основным техническим характеристикам, они разделяются на две группы [1]:

- малоразмерные беспилотные летательные аппараты (МБЛА);
- БПЛА средних и больших размеров.

Очевидно, что борьба с МБЛА представляет собой комплекс мер по их обнаружению, идентификации, прицеливанию, захвату и нейтрализации. В связи с малой заметностью МБЛА задача по обнаружению и распознаванию объекта является наиболее сложной и актуальной.

Меры противодействия вышеперечисленным угрозам на сегодняшний день можно условно разделить на следующие категории: профилактические меры, дистанционное обнаружение дронов (дрон-детекция) и их нейтрализация в воздухе (рис. 1).



Рис.1. Меры противодействия угрозам дронов

К первой категории относятся: законодательство, информационные щиты, геолокационные ограничения в программном обеспечении (ПО); ко второй: акустическая, оптическая, радиочастотная, радарная и мультисенсорная дрон-детекции; к третьей: радиоподавление и перехват управления, дроны-перехватчики, пневматическое и стрелковое оружие. Каждая из перечисленных категорий имеет свои очевидные преимущества и недостатки.

Ввиду того, что профилактические меры не обладают достаточным потенциалом сдерживания, а меры по физической нейтрализации дронов путем заглушки радио- или GPS-сигнала влекут за собой опасность для людей и собственности, а также угрозу нарушения работоспособности окружающего коммуникационного и навигационного оборудования, в настоящее время наиболее целесообразным является использование на охраняемых объектах оборудования для дрон-детекции. Такие системы, как правило, функционируют на различных принципах обнаружения или их сочетании, способны заблаговременно обнаруживать приближение БПЛА и предотвращать вхождение в запретную зону.

Результаты исследования. Современные комплексы обнаружения и нейтрализации БПЛА должны обладать такими характеристиками, как совместимость и интеграция с существующими системами безопасности; 360-градусный охват территории; обнаружение БПЛА на расстоянии не менее 15 км; идентификация и классификация дронов по размеру, скорости и траектории движения, стационарный или портативный варианты установки.

Как уже было отмечено, на сегодняшний день существует огромное количество комплексов, как функционирующих на одном конкретном методе обнаружения, так и сочетающих несколько методов, что является оптимальным решением. Одной из таких систем обнаружения является разработанный нами мультисенсорный комплекс детекции и идентификации БПЛА "ARM-Shield V.1.1" (рис.2).

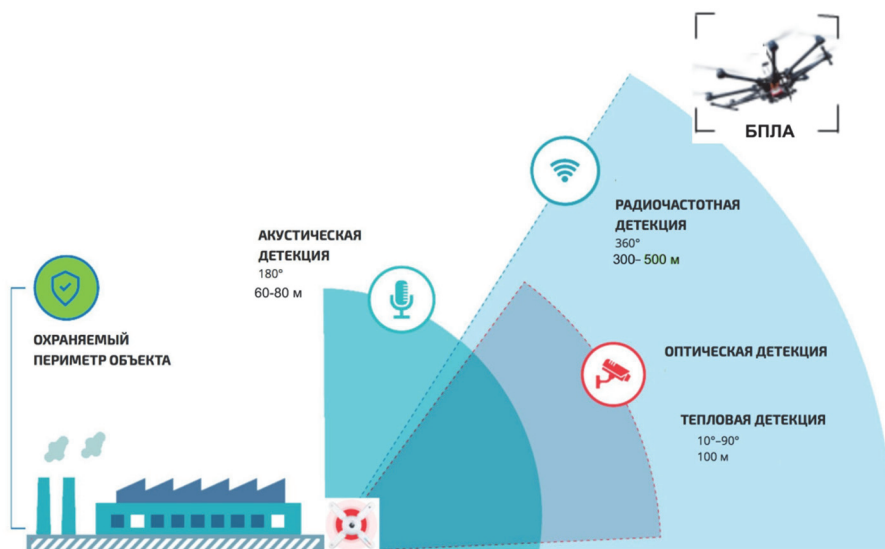


Рис.2. Комплекс дрон-детекции "ARM-Shield"

Радиус обнаружения зависит от размеров дрона, скорости движения и погодных условий. Например, профессиональные и любительские дроны обнаруживаются на расстоянии 60...120 м, дроны-шпионы – на расстоянии 30...60 м.

Эффективность работы системы "ARM-Shield" объясняется применением комплекса различных датчиков. На рис.3 показана архитектура разработанной системы, которая состоит из мультисенсорного блока, логического блока, блока нейтрализации и диспетчерского центра.

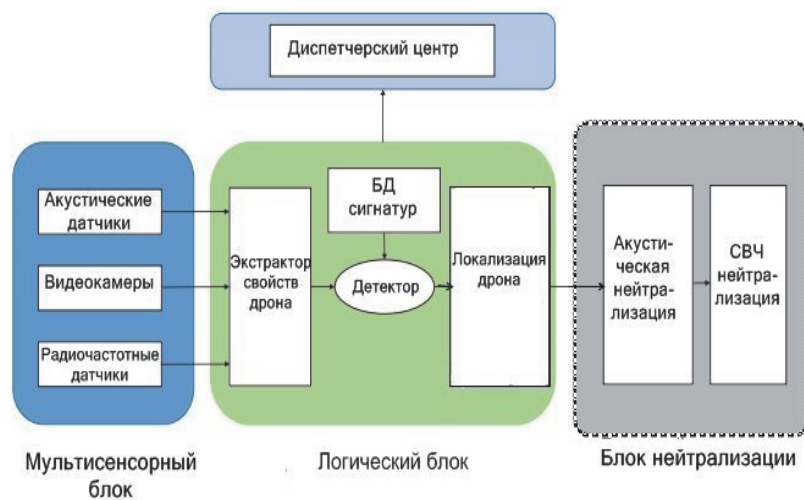


Рис.3. Архитектура комплекса "ARM-Shield"

Мультисенсорный блок служит для обнаружения и локализации БПЛА. Основная видеокамера производит съемку сектора воздушного пространства в высоком разрешении. В зависимости от угла охвата оптической камеры (10° ... 90°), дальность оптического обнаружения варьируется в пределах 80...200 м. Изображение в режиме реального времени анализируется на компьютере с помощью специального ПО, которое идентифицирует объект по характерной форме корпуса и траектории движения [2]. Если цель идентифицируется как дрон с помощью базы данных (БД) визуальных сигнатур, записывается видео приближения дрона к объекту, и при этом включается сигнализация.

В отличие от основной камеры, инфракрасная камера работает в ночное время и фиксирует меньше деталей. Однако исследования показали, что сам факт вторжения, размеры и форма дрона определяются безошибочно.

Радиочастотная дрон-детекция обеспечивается соответствующими датчиками, которые сканируют радиоканалы в диапазоне 2,4 и 5,8 ГГц. Однако,

так как некоторые современные модели дронов не всегда управляются по радио и маршрут их полета может быть запрограммирован через GPS, данный элемент системы дрон-детекции отличается низкой эффективностью.

При акустическом обнаружении анализируются узкие полосы частот на коротких временных интервалах. Суммарный спектр акустического излучения БПЛА обусловлен гармоническими и широкополосными составляющими. Он включает в себя гармонические составляющие излучения от двигателя, шума вращения винта, излучение механического происхождения, а также высокочастотную и низкочастотную составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами [3,4]. Таким образом, акустический сенсор сравнивает уникальную звуковую сигнатуру дрона с базой данных акустических сигнатур. Однако в логическом блоке фиксируются не спектрограммы, нормированные автокорреляционные функции или фазовые портреты акустических сигналов БПЛА. Для надежной идентификации БПЛА было решено применить алгоритмы вейвлет-преобразования, так как вейвлет-спектрограммы более информативны, чем Фурье-спектрограммы, и позволяют легко выявить тончайшие локальные особенности акустических сигналов.

Прямое непрерывное вейвлет-преобразование (ПНВП) акустического сигнала $s(t)$ задается, по аналогии с преобразованием Фурье, путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле [5]

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где параметр b задает положение вейвлетов, а параметр a - их масштаб.

Следует отметить, что вейвлет-спектрограммы представляют значения коэффициентов вейвлетов в плоскости масштаб (номера коэффициентов) - время. Данные спектрограммы выделяют такие особенности сигналов, которые просто незаметны на графиках сигналов и на Фурье-спектрограммах. В качестве доказательства на рис.4 приведены построенные нами с помощью пакета расширения Wavelet Toolbox системы MATLAB R2015a временная диаграмма и вейвлет-спектрограмма реального акустического сигнала [6].

Нетрудно заметить, что в нижней части спектрограммы отчетливо видны частые изменения яркости, указывающие на наличие периодических высокочастотных компонент, тогда как в верхней части изменения яркости менее частые, что свидетельствует о наличии более низкочастотных компонент.

Таким образом, по акустической сигнатуре, т.е. по значениям вейвлет-коэффициентов, можно точно определить модель беспилотника и направление его движения.

Обнаружение любых типов дронов осуществляется логическим блоком в результате обработки искусственным интеллектом сигналов с датчиков. Во время обучения нейронной сети характерные параметры объекта фиксируются, значимая информация собирается экстрактором свойств и сохраняется в БД. При идентификации нейронная сеть считывает сигналы с датчиков, выделяет определенные параметры и сравнивает их с сигнатурами, зарегистрированными в БД. Так как увеличение вероятности пропуска цели влечет за собой более серьезные угрозы нарушения безопасности, чем увеличение вероятности ложной тревоги, в процессе принятия окончательного решения используется логическая операция "ИЛИ" для объединения результатов вышеупомянутых трех датчиков.

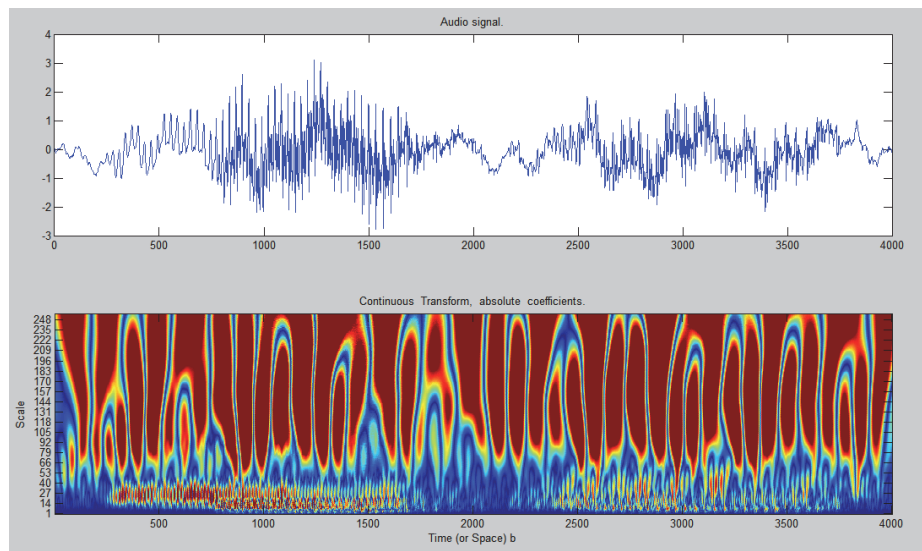


Рис.4. График акустического сигнала и его вейвлет-спектрограмма

В диспетчерском центре с помощью специального ПО оператор имеет возможность наблюдать за воздушным пространством над объектом в режиме реального времени. Выбирая соответствующий датчик из списка, можно просмотреть на мониторе окна видеокамер, детектора Wi-Fi, а также окно акустического сенсора с отображением идентификационного номера обнаруженного дрона (рис. 5).

После обнаружения и идентификации дрона оператор может предпринять меры по его нейтрализации. Для этого в системе "ARM-Shield" предусмотрены методы акустической и микроволновой нейтрализации.

Акустическая технология позволяет вызвать резонанс механической части бортового гироскопа дрона при применении звуковой волны. В

результате неверных показаний прибора генерируются неверные оценки пространственной ориентации, что приводит к аварии.

Микроволновые системы дистанционно формируют в электрических цепях наведенные токи, что способствует уничтожению целых групп беспилотников без необходимости перенаправлять фокус излучателя на каждое устройство отдельно.

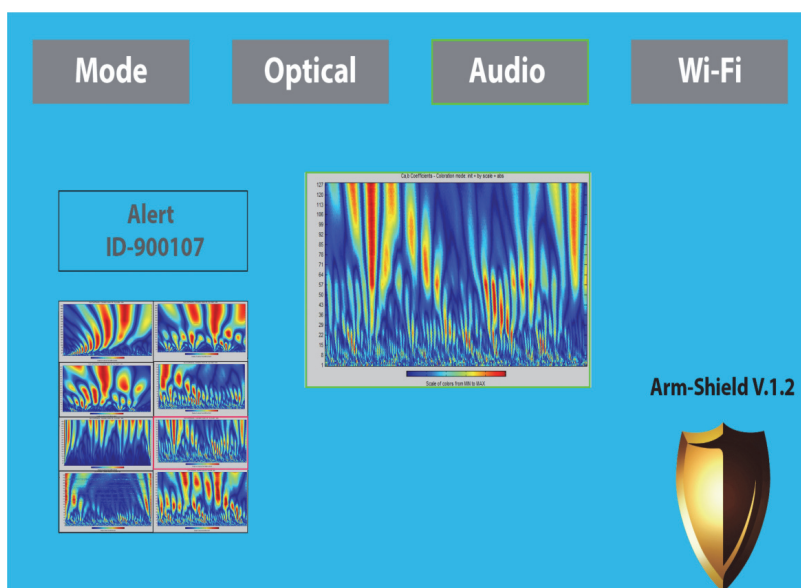


Рис.5. Окно выбора сенсоров

Для обеспечения максимальной конфиденциальности передаваемой служебной информации нами было также разработано соответствующее ПО на основе криптографических алгоритмов RSA, DES и AES [7]. При эксплуатации в режиме шифрования RSA оператор в ручном режиме устанавливает длину ключа шифрования, а программа автономно рассчитывает модуль N , функцию Эйлера, шифрующую экспоненту и значение секретного ключа d . При эксплуатации в режиме DES используется режим обратной связи по шифротексту CFB (Cipher Feed Back), при котором на основе вектора инициализации, ключа шифрования и предыдущих блоков шифротекста генерируется псевдослучайная последовательность, которая накладывается на передаваемый открытый текст.

На рис.6 показано главное окно программы в режиме шифрования/расшифровки.

Следует отметить, что криптостойкость алгоритма RSA основана на вычислительной сложности расчета секретного ключа по известным значе-

ниям модуля и шифрующей экспоненты. Так как модуль N имеет два неизвестных простых делителя p и q , то при неудачном выборе программой параметров алгоритма зашифрованная информация подлежит некоторым криптоаналитическим атакам, в том числе и атаке методом Ферма.

Количество попыток k , необходимых для факторизации N методом Ферма, оценивается по формуле [8]

$$k = \sqrt{p \cdot q + \left(\frac{p-q}{2}\right)^2} - \lfloor \sqrt{p \cdot q} \rfloor, \quad (2)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления до ближайшего целого.

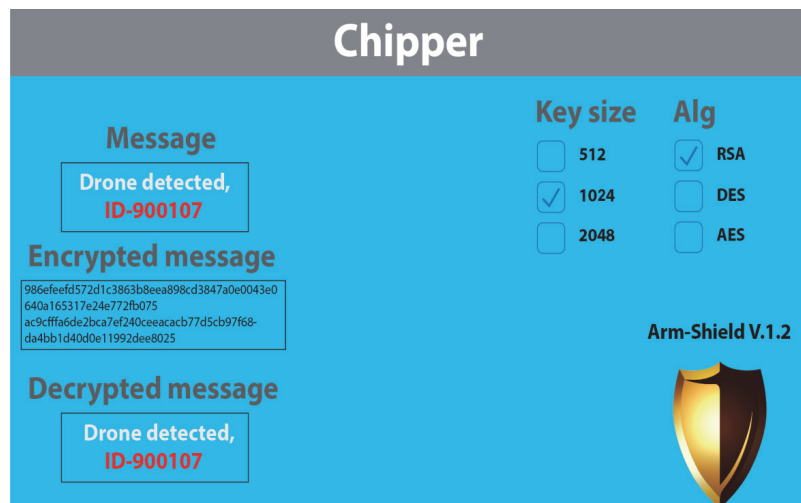


Рис. 6. Окно реализации процедуры шифрования/расшифровки

Закключение. Разработан прототип мультисенсорной системы дрон-детекции на основе трех наиболее широко используемых технологий обнаружения. Основное преимущество данной системы заключается в децентрализованном расположении модулей, непрерывно обменивающихся друг с другом по зашифрованным и помехоустойчивым каналам связи служебной информацией, что способствует повышению эффективности и сложности выведения из строя или физического уничтожения данных модулей. Контроль за решениями, принимаемыми системой обнаружения БПЛА, и задание необходимых параметров осуществляет оператор. Кроме того, в результате проведенных исследований было выявлено, что криптосистема RSA с размером ключа 1024 бита подвержена некоторым криптоаналитическим атакам, поэтому на практике предпочтительнее применение 2048-битного RSA, хотя это снижает производительность разработанного ПО комплекса "ARM-Shield".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И.** Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Армейский вестник.- 2015. URL: <http://army-news.ru/2015/02/malorazmernye-bespilotniki-novaya-problema-dlya-pvo/>.
2. **Карапетян А.К.** Тестирование методов CNN и SSD в приложениях обнаружения объектов // Вестник НПУА: Сборник научных статей.-Ереван, 2019.- № 1.- С.232-236.
3. **Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R** Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // Eronautical DEF SCI J.- 2001. - Vol. 51, № 3.- P. 279–283.
4. **Marino L.** Experimental analysis of UAV-propellers noise // 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. University «La Sapienza», Rome, Italy.–American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.- P. 1-14.
5. **Смоленцев Н.К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB.-М.: ДМК-Пресс, 2005.-304 с.
6. **Бадалян Б.Ф., Гомцянь О.А., Гомцянь С.Г.** Вейвлет-анализ кардиосигналов в среде MATLAB // Известия Высших Учебных Заведений России: Радиоэлектроника.- СПб., 2017.- № 6.-С.5-9.
7. **Смарт Н.** Криптография.-М.: Техносфера, 2005.-528 с.
8. **Васильева И.Н.** Криптографические методы защиты информации: Учебник и практикум для академического бакалавриата.-М.: Изд-во "Юрайт", 2017.- 349 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 16.09.2019.

Ա.Վ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Բ.Ֆ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

ԴՐՈՆ-ԴԵՏԵԿՏՄԱՆ ԲԱԶՄԱՍԵՆՍՈՐԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ

Անօդաչու թռչող սարքերի տարեցտարի աճող կարևորությունը նպաստում է վերջիններիս տեխնիկական բնութագրերի կատարելագործմանն ուղղված աշխատանքների անընդհատ մշակմանը: Պահանջարկի աճի հետևանքով տեղի է ունեցել համալրող պարագաների գնի նվազում, ինչը հնարավորություն է ընձեռում կիրառելու այդ սարքերը ահաբեկչական նպատակներով: Աշխատանքը նվիրված է անօդաչու սարքերի հայտնաբերման մեթոդների և գոյություն ունեցող տեխնիկական լուծումների հետազոտմանը: Տվյալների մշակման ժամանակակից տեխնոլոգիաների հիման վրա մշակվել է դրոն-դետեկտման բազմասենսորային համակարգի կատարելագործված նախատիպը:

Առանցքային բառեր. անօդաչու թռչող սարք, դրոն-դետեկտում, սիգնատուր, չեզոքացում, վեյվլետներ, գաղտնագրում:

A.K. KARAPETYAN, B.F. BADALYAN

IMPROVING THE MULTISENSOR SYSTEM OF DRONE-DETECTION

The increasing importance of unmanned aerial vehicles every year contributes to the ongoing work to improve their technical characteristics. In connection with the increase in demand, there has been a decrease in the prices of the components, which made the military use of these devices possible for terrorist purposes. The article is devoted to the study of the existing technical solutions and methods for detecting the drones. A prototype of an improved multisensor drone detection system based on modern data processing technologies has been developed.

Keywords: unmanned air vehicle, drone-detection, signature, neutralization, wavelets, encryption.