

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <http://www.agequal.ru>
2019, №4 http://www.agequal.ru/pdf/2019/AGE_QUALITY_4_2019.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Бадалян Б.Ф., Карапетян А.К., Степанян Л.А. Обработка данных в мультисенсорной системе обнаружения дронов // Электронный научный журнал «Век качества». 2019. №4. С. 210-226. Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2019/419014.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.391

Обработка данных в мультисенсорной системе обнаружения дронов

Бадалян Бениамин Феликсович,

*кандидат технических наук, доцент кафедры радиоустройств,
Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван
0025, Армения, г. Ереван, ул. Мухитара Гераци, д. 18
agentben@rambler.ru*

Карапетян Артур Каренович,

*аспирант кафедры радиоустройств,
Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван
0001, Армения, г.Ереван, ул. Абовяна, д.26а
artur.karapetyan@rocketmail.com*

Степанян Левон Арменович,

*магистрант по учебной программе
"Индустриальная инженерия и менеджмент систем",
Американский университет Армении, г. Ереван
0002, Армения, г. Ереван, ул. Демирчяна, д.33
levon_stepanyan@edu.aia.am*

Аннотация. Территориальный контроль и выявление нарушителя – довольно актуальная и сложная проблема. Появление широкого класса беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) создало большие возможности по несанкционированному получению и съему разнообразной информации, включая фотосъемку и радиоперехват. Очевидно, что современные БПЛА являются также весьма опасными средствами воздушного нападения.

В настоящее время существует множество вариантов решения проблемы, включая технологии Radar, LiDar и Camera Vision, на основе которых функционирует множество современных систем обнаружения и классификации объектов. Каждый из перечисленных методов оптимален для решения конкретных задач, однако все они требуют значительных финансовых затрат.

В статье рассматривается эффективный подход для повышения достоверности детектирования беспилотных летательных аппаратов, основанный на совмещении нескольких каналов детектирования. Приводится описание разработанного программного обеспечения для сжатия и повышения помехоустойчивости на основе технологий вейвлет-сжатия и каскадирования кодов.

Ключевые слова: безопасность; дрон-детекция; сигнатура, сжатие, вейвлеты, каскадные коды, турбокоды.

Актуальность темы исследования. Очень часто трудно обнаружить тех, кто проникает на государственную или личную территорию. Это может привести к весьма нежелательным и непредсказуемым последствиям. Являясь новейшим технологическим решением, беспилотные летательные аппараты одновременно стали одним из опаснейших средств, используемых злоумышленниками. Перечислим самые распространенные угрозы нарушения безопасности, когда возникает необходимость в противодействии дронам:

- **Активные атаки.** К данной категории следует отнести защиту от прямых атак беспилотных летательных аппаратов с химическими, взрывоопасными и радиоактивными веществами, а также огнестрельным оружием на борту. Следует отметить, что в местах большого скопления людей само появление даже простого дрона, без наличия на борту опасных веществ или оружия, может вызвать столпотворение и другие весьма нежелательные последствия.

- **Пассивные атаки.** Оснащение дронов системами видеонаблюдения и слежения является эффективным средством для хищения конфиденциальной информации, нарушения неприкосновенности личной жизни, шантажа и других правонарушений.
- **Несанкционированная пропаганда и незаконная реклама.** Борьба с мультикоптерами стала актуальной и в случаях распространения подобных материалов. Агитационные листовки, плакаты и брошюры доставляются дронами в места массового скопления людей (спорткомплексы, концертные площадки, несанкционированные митинги). Результатом подобных действий может оказаться не только незаконное распространение перечисленных материалов, но и провокация беспорядков.

Таким образом, комплексная защита от БПЛА стала обязательным компонентом систем обеспечения безопасности на многих современных объектах.

Постановка задачи: Для разработки оптимальной системы дрон-детекции, необходимо выявить все сильные и слабые стороны существующих решений. Это поможет сосредоточиться на устранении недостатков при создании окончательного универсального решения, которое, насколько это возможно, будет включать в себя выявленные преимущества.

Для вышеупомянутого исследования были выбраны наиболее распространенные системы обнаружения объектов.

Основные преимущества системы Radar[1]:

- 1) определение расстояния до объекта, скорости и направления движения;
- 2) независимость от погодных условий и освещения;
- 3) относительно низкая стоимость.

Недостатки:

- 1) вероятность ошибки детектирования;
- 2) большие размеры;

3) облучение.

Преимущества LiDAR [2]:

- 1) 3D изображение пространства;
- 2) стабильность независимо от освещения;
- 3) устойчивость к интерференции.

Недостатки:

- 1) высокая стоимость;
- 2) зависимость от погодных условий;
- 3) наличие портативных частей;
- 4) генерация большого объема информации;
- 5) ограниченная зона действия;
- 6) наличие стеклянных объектов, что затрудняет работу системы.

Системы CameraVision получили весьма широкое распространение и продолжают интенсивно развиваться.

Основные преимущества систем Camera Vision [3]:

- 1) доступная цена;
- 2) высокое качество видеоданных;
- 3) умение различать цвета;
- 4) возможность различать объекты;
- 5) обнаружение дорожных знаков;
- 6) способность видения и распознавания намного лучше, чем у человеческого глаза.

Однако у подобных систем есть и некоторые недостатки:

- 1) вероятность ошибки;
- 2) зависимость от погодных условий;
- 3) зависимость от освещения;

4) наличие большой вычислительной мощности для обработки полученной информации и принятия окончательных решений.

Как уже было отмечено, на сегодняшний день существует огромное количество комплексов обнаружения и нейтрализации БПЛА, как функционирующих на одном конкретном методе обнаружения, так и сочетающих несколько методов, что является оптимальным решением. Одной из подобных систем обнаружения является разработанный нами прототип мультисенсорного комплекса детекции и идентификации БПЛА «ARM-ShieldV.1.0», эффективность работы которого объясняется применением комплекса различных датчиков (рис. 1).

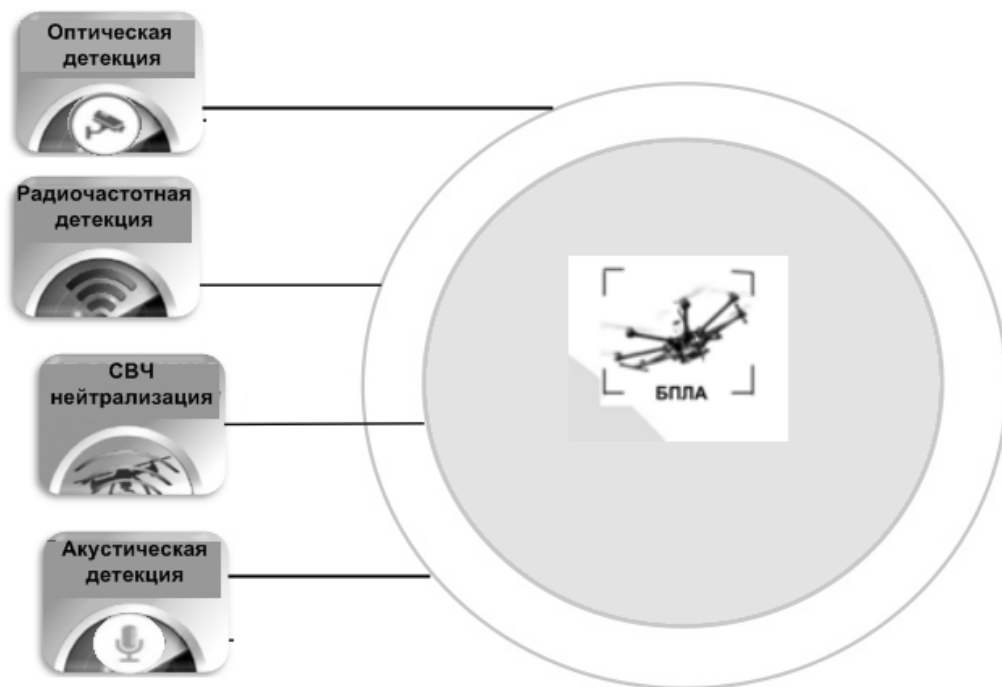


Рис. 1. Комплекс дрон-детекции «ARM-ShieldV.1.0» (составлено авторами)

Радиочастотная дрон-детекция обеспечивается соответствующими датчиками, сканирующими и анализирующими радиоканалы в диапазоне 2,4 и 5,8 ГГц, которые оператор использует для управления дроном. Однако, так как

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

Основными источниками шума БПЛА являются поршневый двигатель и воздушный винт, что обусловлено процессами горения, выпуска отработанных газов и механического перемещения деталей. Электрические двигатели имеют более низкие шумовые характеристики, однако их использование ограничивается БПЛА малым радиусом действия. Следует отметить, что акустический шум обычно увеличивается по мере увеличения мощности двигателя [4-5].

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

Для детального анализа акустических сигналов в комплексе «ARM-Shield» было решено использовать решетки микрофонов, поскольку использование отдельного микрофона даст лишь грубую оценку акустического сигнала [6]. Кроме того, акустические антенные решетки могут эффективно использоваться для обнаружения и сопровождения низко летающих БПЛА на тактических расстояниях. Упрощенная сетевая архитектура системы «ARM-ShieldV.1.0» показана на рис. 2.

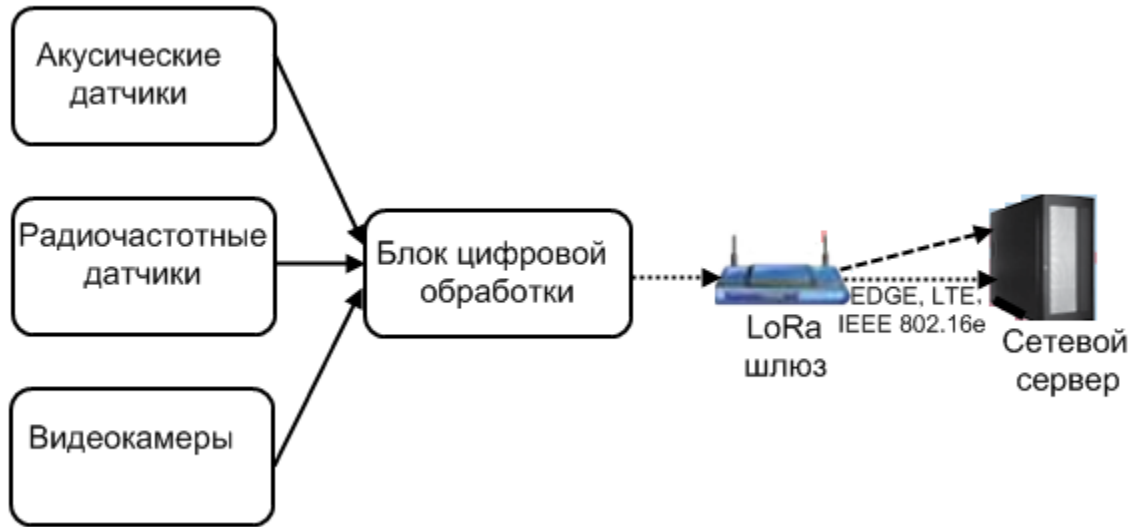


Рис. 2. Упрощенная сетевая архитектура комплекса «ARM-ShieldV.1.0» (разработано авторами)

В блоке цифровой обработки для получения частотно-временного представления акустического сигнала было решено применить оконное преобразование Фурье согласно формуле [7]:

$$S(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)w(t - b)e^{-j\omega t} dt, (1)$$

где обрабатываемый сигнал $S(t)$ предварительно умножается на оконную функцию $w(t - b)$.

Для преодоления значительных искажений спектра, возникающих из-за граничных явлений и эффекта Гиббса, в преобразовании используется оконная функция Хэмминга. Результирующая спектрограмма показана на рис. 3.

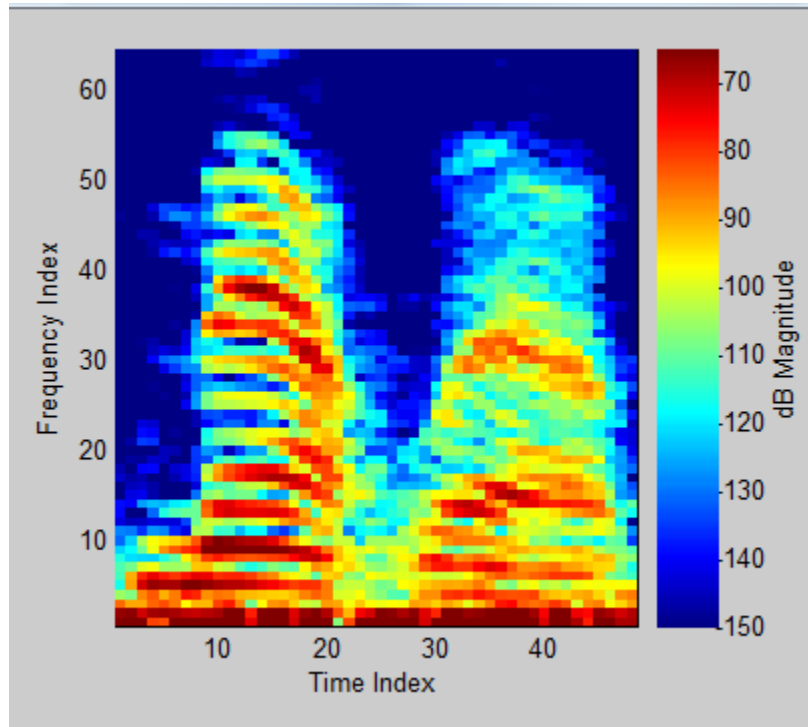


Рис. 3. Спектрограмма акустического сигнала (разработано авторами)

После цифровой обработки, звуковые сигнатуры БПЛА передаются на сервер, где осуществляется сравнение с сигнатурами всех беспилотников из зашифрованной базы данных. При совпадении с соответствующей сигнатурой (опознании объекта как дрона) выдаётся команда на оповещение.

Что касается оптического обнаружения, то основная видеокамера производит съемку сектора воздушного пространства в высоком разрешении. Изображение в режиме реального времени анализируется на компьютере с помощью специального программного обеспечения (ПО), которое идентифицирует объект по характерной форме корпуса и траектории движения [8]. Если цель идентифицируется как дрон с помощью базы данных визуальных сигнатур, записывается видео приближения дрона к объекту и при этом включается сигнализация.

Для обеспечения оперативности доставки видеоданных в блоке цифровой обработки внедрен кодировщик сжатия. При выборе алгоритмов сжатия были проанализированы принципы построения существующих стандартов сжатия

цифровых изображений и видео данных JPEG2000, H.264 и H.265 [9-10]. Для перечисленных стандартов характерна низкая помехоустойчивость, так как в радиоканале при низких значениях вероятности ошибки на бит (10^{-6} и более), качество видеоданных H.264 и H.265 во всех режимах становится ниже допустимого предела. В силу перечисленных причин был разработан алгоритм сжатия и защиты видео данных, основанный на технологиях вейвлет-сжатия и каскадировании помехоустойчивых кодов.

Так как при обработке изображений приходится иметь дело с двумерными массивами $S(x, y)$, т.е. с функциями двух переменных, то ядра двумерного дискретного вейвлет-преобразования можно представить в виде [11]:

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\varphi(y), \psi^V(x, y) = \varphi(x)\psi(y), \psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y), (2)$$

где $\psi^H(x, y)$, $\psi^V(x, y)$ и $\psi^D(x, y)$ называются горизонтальным, вертикальным и диагональным вейвлетами, а двумерная масштабирующая функция задается выражением

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y). (3)$$

Таким образом, на двумерной плоскости происходит анализ по горизонтали, вертикали и диагонали с одинаковым разрешением в соответствии с тремя приведенными выше вейвлетами.

Для осуществления эффективного вейвлет-сжатия передаваемых видеоданных осуществлено пороговое ограничение (трешолдинг) уровня детализирующих коэффициентов. Так как шумовая компонента сигнала сильнее всего отражается в детализирующих коэффициентах, то установив определенный порог и обращая в нуль коэффициенты ниже этого порога, можно значительно снизить уровень шума и сжать изображение. В разработанном видеокоде применен многоуровневый трешолдинг, при котором значения порога τ изменяются в зависимости от уровня разложения и коэффициентов детализации [12].

На рис. 4 приведены исходное и сжатое видеоизображения обнаруженного дрона. Следует отметить, что результаты сжатия получены при выборе вейвлета sum4 и разложения до 5-го уровня, в результате чего более 98% коэффициентов обнулено с сохранением 99% энергии сигнала.

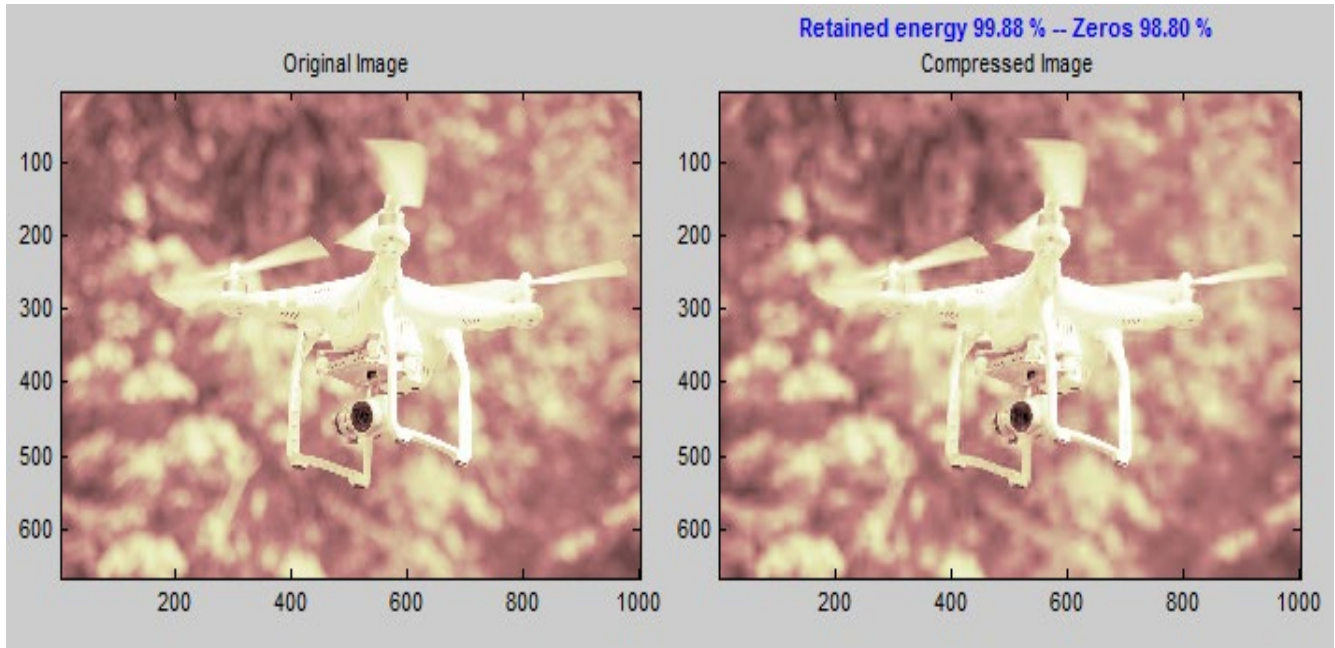


Рис. 4. Результаты многоуровневой пороговой обработки (разработано авторами)

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.

Для связи удаленных сенсоров и передачи уведомлений о потенциальной опасности было решено применить технологию передачи данных LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) [13]. Передатчики технологии LoRa обеспечивают нормальную связь на расстоянии 1,5-2 км по городу, а в случае мощных и направленных антенн - до 20 км в условиях открытой видимости. Поскольку в разработанном комплексе необходимо получать и обрабатывать большие объемы данных, то в качестве окончательных устройств используются двунаправленные конечные устройства класса C, которые имеют почти непрерывно открытое окно приема, закрывающееся только на время передачи

данных. Для открытия окна приема, сенсоры синхронизируются по специальному опорному сигналу от шлюза LoRa.

Для обеспечения устойчивости к ошибкам передачи при одновременном сохранении невысокой сложности практической реализации предусмотрен режим встроенного составного помехоустойчивого кодирования с возможностью изменения алгоритма кодирования. Анализируя статистику накопления ошибок, оператор с помощью разработанного программного обеспечения по каналу обратной связи посылает конечным устройствам соответствующие команды на изменение алгоритма кодирования, типа и уровня используемой модуляции. На рис. 5 приведено главное окно демонстрационной версии описанного ПО.

Channel Encoder

Channel type AWGN ▼

Modulation type PSK ▼
FSK
QAM
MSK


Modulation order 2 ▼

Error correction coding algorithm

Turbo convolutional coding

LDPC

RS+Conv. coding

 ArmShield 1.0

[View results](#)

Рис. 5. Главное окно выбора алгоритма кодирования (разработано авторами)

В качестве базовых алгоритмов коррекции ошибок используются: каскадный код с внешним кодеком Рида-Соломона, сверточный турбо код с параллельным каскадированием (Turbo Convolutional Code – TCC) и составной код с итеративным декодированием на основе кодов БЧХ и LDPC (Low-Density Parity-Check).

В каскадной схеме кодирования предпочтение отдано внешнему блоковому кодеку Рида-Соломона (РС), так как он имеет оптимальные характеристики как для одиночных, так и для пакетных ошибок [14]. Для внутреннего кодирования обычно используют сверточные коды, в алгоритме декодирования которых применяется оптимальный алгоритм Витерби. Однако декодеры Витерби имеют выраженную тенденцию к размножению и пакетированию ошибок, когда вероятность их появления начинает превышать определенный предел. Поэтому в предложенной схеме между компонентными кодами включаются устройства перемежения и восстановления, осуществляющие перестановку символов по определенным правилам.

Характеристики часто используемого каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона (204,188), сверточного кода с $K=7$ и перемежителя, представлены на рис. 6 (кривая 1).

Также на рисунке отражены характеристики турбо- и низкоплотностных кодов (кривые 2 и 3). Видно, что методы декодирования данных кодов обладают впечатляющей корректирующей способностью [15]. Следует отметить, что например для декодирования LDPC кодов был применен вариант мягкого декодирования - декодирование по вероятностям, когда на основе из принятого канала информационной последовательности формируются векторы вероятностей позиций символов.

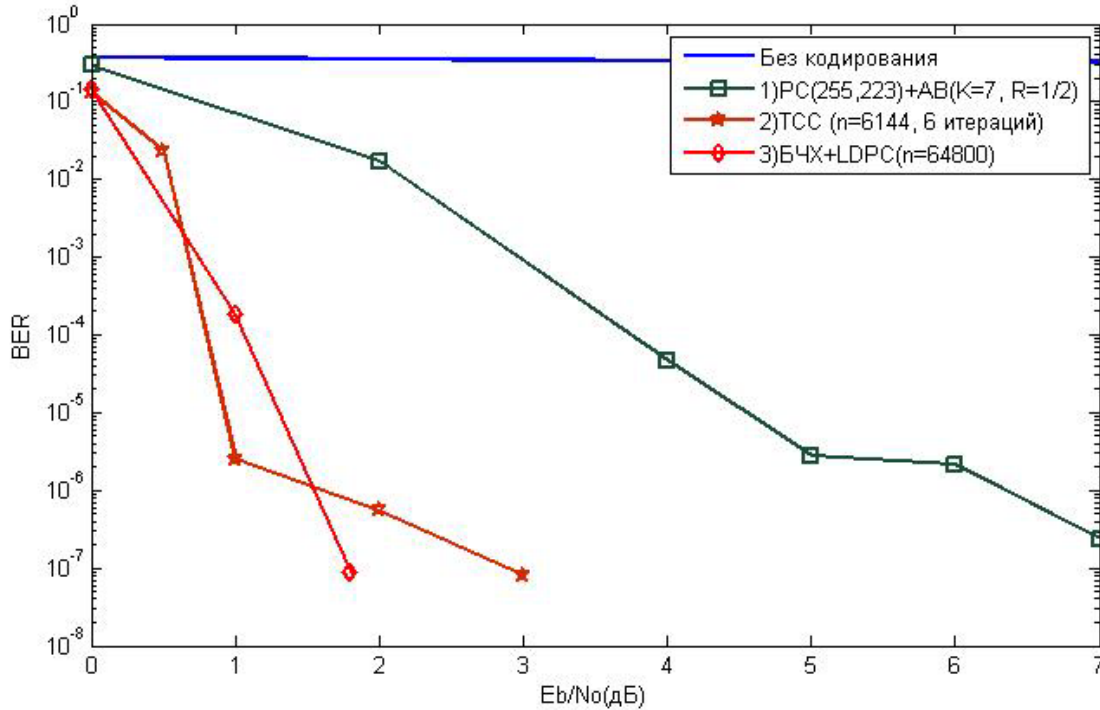


Рис. 6. Характеристики помехоустойчивых кодов (разработано авторами)

Сложность и точность данного алгоритма зависят от инициализации [16].

Для канала с гауссовским шумом инициализация осуществляется на основе информации о дисперсии шума в канале передачи. Что касается других распределений шума, то реализация точной инициализации может оказаться сложной задачей, что приведет к потере 0,5...1 дБ и существенному снижению корректирующей способности. Сложность декодирования LDPC кодов примерно линейна с длиной кода, однако порождающая матрица не обладает специальными свойствами (например, малой плотностью ненулевых элементов), упрощающими кодирование. При непосредственной реализации сложность кодирования может быть квадратичной функцией длины кода, и тогда она намного превысит сложность декодирования.

Наиболее важным моментом при проектировании турбокодов с параллельным каскадированием является правильный выбор компонентных кодов и перемежителя, так как от этого зависят помехоустойчивость и сложность

реализации. К основным требованиям, предъявляемым к перемежителям турбокодов, относятся хорошие перемешивающие свойства, отсутствие циклов и бесконфликтность при параллельных вычислениях (декодеры не обращаются к одним и тем же ячейкам памяти одновременно).

К числу недостатков турбокодов следует отнести необходимость выполнения огромного количества итераций декодирования ($I=5-50$) и наличие области насыщения вероятности ошибки, в которой скорость уменьшения вероятности ошибки при повышении отношения сигнал/шум значительно замедляется.

Выводы

1. Создание и разнообразное применение БПЛА различных конструкций и весов, обусловили проблему разработки эффективных технических комплексов их оперативного детектирования и распознавания.

2. Наиболее эффективным каналом обнаружения малозаметных и малоскоростных БПЛА является акустический канал.

3. Для повышения точности описания локальных изменений акустических сигналов целесообразно применение оконного преобразования Фурье.

4. Для обеспечения высокой помехоустойчивости передачи сжатых видеоданных был разработан алгоритм, основанный на технологии вейвлет-сжатия с пороговой обработкой детализирующих коэффициентов.

5. Благодаря интеграции с технологией LoRa, разработанный комплекс детекции дронов обладает простотой регулирования сетевой архитектуры и не требует получения лицензии на оказание услуг передачи данных.

6. Разработанный модуль коррекции ошибок на основе трех современных методов кодирования канала частично решает задачу компромисса между требованием высокой энергетической эффективности и необходимостью уменьшения сложности реализации декодеров.

7. Важным преимуществом турбокодов является независимость сложности декодирования от длины информационного блока, что позволяет снизить вероятность ошибки декодирования путем увеличения длины.

Список литературы

1. Карапетян А.К. Анализ и сравнение систем распознавания объектов // Вестник Инженерной Академии Армении:Сборник научно-технический статей. 2017. Т.14. № 4. С. 654-657.
2. Behrendt A. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere / A. Behrendt, T. Nakamura, T. Tsuda // Applied optics. 2004. Vol. 43, No. 14. P. 2930-2939.
3. Карапетян А.К., Тер-Мартirosян А.Р., Гомцян О.А. Анализ принципов работы систем CAMERA VISION // Вестник Национального Политехнического Университета Армении, Информационные технологии, электроника, радиотехника. 2018. № 1. С. 116-123.
4. Самохин В. Ф. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым движителем в толкающей компоновке / В.Ф. Самохин, С.П. Остроухов, П.А. Мошков // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. Вып. 70. С. 1–24.
5. Мошков П.А., Беляев И.В., Остриков Н.Н. Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2 // XI Междунар. науч. конф. по амфибийной и безаэродромной авиации “Гидроавиасалон-2016”, г. Геленджик. С. 45.
6. Sadasivan S. Acoustis signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation / S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, S.R. Sekar // Eronautical DEF SCI J. 2001. Vol. 51. № 3. P. 279-283.

7. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова .- СПб.: Питер, 2002.- 608 с.
8. Карапетян А.К. Тестирование методов CNN и SSD в приложениях обнаружения объектов / А.К. Карапетян // Вестник НПУА, Сборник научных статей. 2019. № 1. С. 232-236.
9. Цифровое преобразование изображений. Учебное пособие для вузов / Р.Е. Быков, Р.Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцветов; Под ред. профессора Р.Е. Быкова. - 2-е изд. - М.: Горячая линия-Телеком, 2012. - 228 с.
10. Карякин В.Л. Цифровое телевидение: учебное пособие для вузов / В.Л. Карякин. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. - 448 с.
11. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 104 с.
12. Бадалян Б.Ф. Вейвлет-сжатие данных в системах дактилоскопической идентификации // Материалы 11-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ- 2015». Севастополь, 2015. С. 151.
13. Верхулевский К. Базовые станции Kerlink для LoRaWAN // Беспроводные технологии. 2016. № 2.
14. Гомцян О.А., Гулян А.Г., Бадалян Б.Ф. Построение кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема и Рида-Соломона // Вестник Инженерной Академии Армении: Сборник научно-технических статей. 2017. Том 14. № 1. С. 133-138.
15. Бадалян Б.Ф., Гомцян О.А., Вардумян А.А., Бабаджанян А.А. О возможности применения некоторых алгоритмов помехоустойчивого кодирования для перспективных систем подвижной радиосвязи // НПУА Вестник. Сборник научных статей. Часть 1. - Ереван, 2018.- С. 270-276.

Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы алгоритмы, применение. - М.: Техносфера, 2005. - 320 с.

Data processing in a multi-sensor drone detection system

Badalyan Benjamin Feliksovich,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Chair of "Radio Devices"
National Polytechnic University of Armenia, Yerevan
0025, Armenia, Yerevan, st.Mkhitar Heraci, 18
agentben@rambler.ru

Karapetyan Artur Karenovich,
Postgraduate student of the Chair of "Radio Devices"
National Polytechnic University of Armenia, Yerevan
0001, Armenia, Yerevan, st.Abovyan, 26a
artur.karapetyan@rocketmail.com

Stepanyan Levon Armenovich,
Masters in Industrial Engineering and Systems Management
American University of Armenia, Yerevan
0002, Armenia, Yerevan, st.Demirchyan, 33
levon_stepanyan@edu.aua.am

Annotation. Territorial control and identification of the violator is a rather urgent and complex problem. The emergence of a wide class of unmanned aerial vehicles (UAVs) has created great opportunities for unauthorized reception and recording of various information, including photography and radio interception. It is obvious that modern UAVs are also very dangerous means of air attack.

Currently, there are many solutions to the problem, including Radar, LiDar, and Camera Vision technologies, on the basis of which many modern systems for detecting and classifying objects operate. Each of these methods is optimal for solving specific problems, but all of them require significant financial costs.

The article discusses an effective approach to increase the reliability of detection of unmanned aerial vehicles based on the combination of several detection channels. A description of the developed software for compression and noise immunity based on the technology of wavelet compression and concatenated codes is given.

Key words: security; drone detection; signature; compression; wavelets; concatenated codes; turbo codes.