

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## Գրիգորյան Տիգրան Արամի

ԴՐՈՆՆԵՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ  
ԵՎ ԽԼԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ե.12.03 - «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Григорян Тигран Арамович

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ГЛУШЕНИЯ  
СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ДРОНОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.12.03 – «Телекоммуникационные сети, устройства и системы»

Ереван 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային  
պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝	տ.գ.դ. Մարտին Յուլյա Այվազյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տ.գ.դ. Հովհաննես Ավագի Գոմցյան Ֆ.-մ.գ.թ. Արմեն Հովհաննեսի Մակարյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2024թ. հուլիսի 4-ին, ժամը 14<sup>00</sup>-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:  
Մեղմագիրն առաքված է 2024թ. հունիսի 1-ին:

046 մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

---

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете  
Армении

Научный руководитель:	д.т.н. Мартин Цолакович Айвазян
Официальные оппоненты:	д.т.н. Оганес Авакович Гомцян к.ф.-м.н. Армен Оганесович Макарян
Ведущая организация:	Ереванский научно-исследовательский институт средств связи

Защита диссертации состоится 4-го июля 2024г. в 14<sup>00</sup> ч. на заседании Специализированного совета 046 - «Радиотехники и электроники», действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПТУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПТУА.  
Автореферат разослан 1-го июня 2024 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета 046, к.т.н.



Бениамин Феликсович Бадалян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие современных технологий позволяет гражданским дронам успешно выполнять функции, которые были недоступны в прошлом. Они получают широкое распространение, используются в различных сферах деятельности (поставка товаров, аэрофотосъемка, видеосъемка, сельское хозяйство и т.д.) и решают различные задачи.

Наряду с широким распространением и техническим развитием гражданских дронов возрастает степень их опасности с точки зрения гражданской и военной обороны. Они могут проникать на территорию объектов специального назначения, перевозить взрывчатые вещества, запрещенные товары и т.д. В последнее время атакам дронов часто подвергаются международные аэропорты. В связи с уменьшением размеров дронов, снижением их стоимости и интеграцией искусственного интеллекта возрастает необходимость в разработке и применении систем противодействия дронам.

Дистанционное управление дрона оператором осуществляется с помощью радиочастотных сигналов. По этой причине одним из эффективных методов противодействия дронам считается глушение используемых в них сигналов средствами радиоэлектронной борьбы. Глушение сигналов управления нарушает контроль оператора над дроном и создает возможность для реализации последующих функций обезвреживания дрона.

Для точного и эффективного глушения сигналов управления требуется определенная информация о сигнале. Ключевыми параметрами сигнала, необходимыми для глушения, являются несущая частота передачи сигнала, полоса пропускания, тип модуляции и т.д. Характеристики систем радиочастотной связи, используемые в гражданских дронах, в основном доступны в открытых источниках. Это позволяет разрабатывать системы статических помех, способные одновременно подавлять сигналы, использующие заранее известные технологии связи. Преимуществом статических систем глушения является простота их конструкции. Несмотря на то, что эти системы выполняют свою функцию, они не являются наилучшим решением с точки зрения эффективности использования ресурсов. Быстрое развитие коммуникационных технологий, используемых в дронах, создает проблемы для обновления программного и аппаратного обеспечения этих систем. В связи с этим, актуальной задачей в области радиоэлектронного противодействия дронам является разработка автоматической системы глушения. Такие системы способны автоматически обнаруживать сигналы управления дроном в эфире и определять их тип модуляции для эффективного и точного глушения этих сигналов.

**Предмет исследования.** Целью диссертационной работы является:

- Исследование типов модуляции и технологий передачи, используемых в сигналах канала управления дрона;
- Исследование и реализация алгоритмов обнаружения и оценки сигналов канала управления дрона;
- Исследование и реализация алгоритмов автоматического распознавания цифровых модуляций;
- Исследование и реализация системы автоматического глушения сигналов канала управления дрона.

**Методы исследования.** В ходе выполнения диссертационной работы были использованы методы теоретического анализа, математического моделирования,

разработки узлов программного обеспечения и реализации прототипа системы.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка помехоустойчивой системы автоматического обнаружения и глушения сигналов канала управления дрона.

Для достижения намеченной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- Исследование типов цифровой модуляции и технологий передачи сигналов, используемых в каналах управления дрона;
- Исследование методов автоматического распознавания цифровых модуляций;
- Исследование методов управления скоростью обучения нейронных сетей;
- Разработка программных модулей для обнаружения несущей частоты и оценки частоты дискретизации сигналов с одной несущей частотой;
- Разработка информативных признаков сигнала для распознавания типов цифровой модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM;
- Разработка программных алгоритмов для нейронной сети с динамическими гиперпараметрами и методов управления скоростью обучения нейронной сети;
- Разработка программного модуля для автоматического распознавания цифровых модуляций с использованием нейронных сетей;
- Разработка программного модуля для передачи сигналов глушения;
- Интеграция программных модулей для обнаружения сигналов, автоматического распознавания цифровой модуляции и передачи сигналов глушения.

**Научная новизна.** В процессе выполнения работы были получены следующие научные результаты:

- Впервые было выполнено распознавание типов цифровых модуляций BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM при низком отношении сигнал/шум, сдвиге фазы и частоты в сигнале, используя небольшие вычислительные ресурсы;
- В программной среде LabVIEW разработаны алгоритмы искусственной нейронной сети с динамическими гиперпараметрами, позволяющие легко менять количество скрытых слоев в сети и число нейронов в них, а также метод управления скоростью обучения сети и соответствующие ему параметры без изменения программного кода;
- Создан прототип системы для автоматического обнаружения, распознавания и глушения сигналов канала управления дрона с использованием соответствующих программных алгоритмов.

#### **Практическая ценность работы.**

- Разработанный прототип системы может быть использован в области радиоэлектронной безопасности, гражданской авиации Республики Армения и при выполнении некоторых специальных задач двойного назначения;
- Разработанная нейронная сеть с динамическими гиперпараметрами может быть применена для решения различных задач идентификации;
- Разработанный набор информативных признаков сигнала может быть использован в алгоритмах распознавания других типов цифровой модуляции M-PSK и M-QAM;

- Разработанные программные алгоритмы могут быть переписаны на любой язык программирования FPGA для обеспечения высокой производительности.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена разработанным прототипом системы и программных модулей. Результаты тестирования прототипа системы подтверждают работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов. Разработанные программные алгоритмы могут использоваться в других системах как интегрированные узлы.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Идентификация цифровых модуляций BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM, передаваемых на одной несущей частоте при любом значении фазового сдвига в сигнале, осуществляется с высокой точностью при использовании предложенного набора информативных признаков сигнала.
2. Идентификация цифровых модуляций QPSK, 16-QAM и 64-QAM, передаваемых на одной несущей частоте при наличии сдвига частоты в сигнале, осуществляется с высокой точностью при использовании предложенного набора информативных признаков сигнала.
3. При наличии сдвига частоты в сигнале внутрикласовая идентификация модуляций M-PSK становится невозможной.
4. Эффективность глушения сигналов канала управления дронов повышается в случае передачи случайных битов с идентифицированным типом модуляции вместо шумовых помех.
5. Оптимальное значение соотношения мощности информационного сигнала к мощности сигнала глушения канала управления дронов не превышает 7 дБ.

**Публикации.** По материалу диссертации опубликовано восемь научных работ, одна из которых опубликована в базе данных Scopus, а две из них опубликованы без соавторов. Полный список работ приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 103 наименования. Основной текст работы изложен на 115 страницах, включая 95 рисунков и 18 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна, практическое значение полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** производилось исследование радиосигналов, применяемых в гражданских дронах, и были выявлены их особенности.

В настоящее время наиболее распространенной технологией связи, используемой в гражданских дронах, является набор стандартов IEEE 802.11, предназначенный для создания каналов связи WLAN (Wireless Local Area Network). Популярность использования этих стандартов в дронах обусловлена простотой установки, компактностью, портативностью и низкой стоимостью. Стандарты IEEE 802.11, которые применяются в дронах, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Стандарт IEEE 802.11	Диапазон Частот
802.11a	5.8 ГГц
802.11b	2.4 ГГц
802.11g	2.4 ГГц
802.11n	2.4 ГГц и 5 ГГц
802.11p	5.9 ГГц
802.11y	3.65-3.7 ГГц
802.11ac	5 ГГц
802.11ah	915 МГц

В дронах для передачи видеосигнала применяется технология многоканальной передачи сигналов (по нескольким несущим), в то время как сигналы канала управления передаются на одной несущей частоте.

Наиболее часто используемыми типами цифровой модуляции в наборе стандартов IEEE 802.11 являются модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Именно по этой причине в данной работе были рассмотрены эти четыре типа цифровой модуляции.

Есть множество методов борьбы с гражданскими дронами, но с учётом соотношения стоимости и эффективности наиболее предпочтительными являются средства радиоэлектронного противодействия или глушения. Среди доступных методов радиоэлектронного глушения можно выделить следующие четыре метода (рис. 1):

- а) Глушение с использованием широкополосного шумового сигнала,
- б) Монотонное глушение,
- в) Глушение методом развертки,
- г) Глушение совпадающим сигналом.

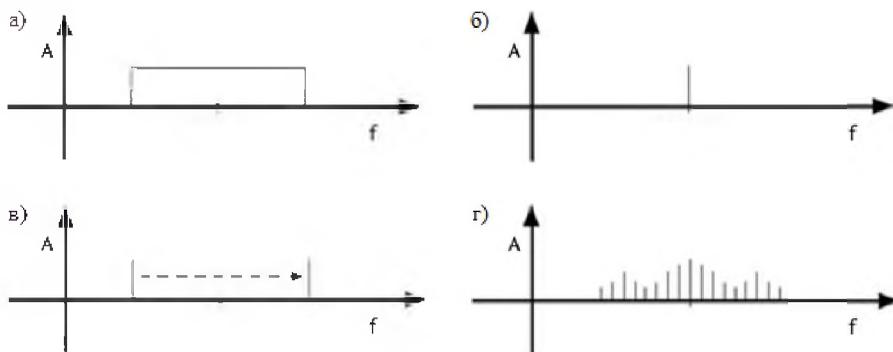


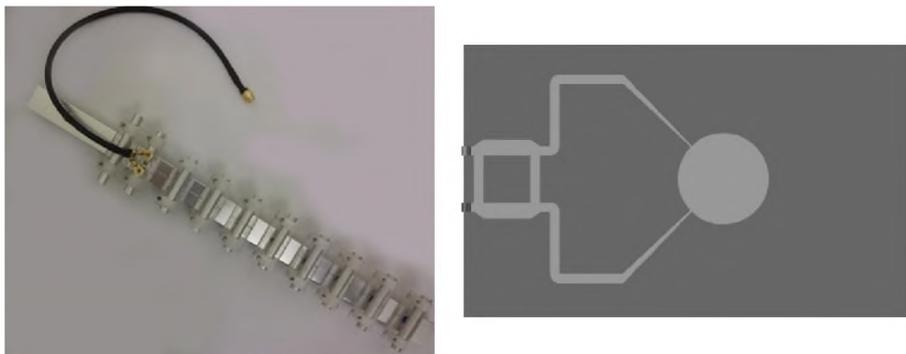
Рис. 1. Методы глушения сигнала

Исследования, существующие на данный момент, показывают, что среди упомянутых видов глушения наиболее эффективным с точки зрения энергозатрат и низкой вероятности обнаружения является метод глушения совпадающим сигналом. По

этой причине данный метод был выбран для построения системы глушения сигналов управления дронов. Однако реализация этого метода требует некоторой предварительной информации о сигнале. Такой информацией является несущая частота сигнала, полоса пропускания, тип модуляции и т. д.

Перед разработкой системы автоматического глушения была проведена проверка работоспособности выбранного метода глушения. Эксперимент по глушению сигнала проводился в два этапа: на первом этапе объектом глушения была сеть Wi-Fi, а на втором - модель дрона Parrot AR. Сигналы помех передавались на заранее известной несущей частоте и соответствовали типу модуляции целевого сигнала. В обоих случаях глушение сигнала прошло успешно, в результате чего сеть Wi-Fi вышла из строя, а дрон стал неуправляемым. Результаты испытаний полностью подтвердили эффективность метода глушения сигнала с помощью совпадающего сигнала, поэтому дальнейшие исследования в рамках диссертационной работы посвящены автоматизации и усовершенствованию системы глушения сигнала с использованием этого метода.

Для увеличения рабочего расстояния и снижения энергопотребления системы глушения целесообразно использовать направленные антенны. С этой целью, в программной среде FEKO были моделированы два типа направленных антенн: директорная антенна с линейной поляризацией и микрополосковая антенна с круговой поляризацией (рис. 2).



*Рис. 2. Антенны с линейной и круговой поляризацией, смоделированные в программной среде FEKO*

Преимуществом направленной антенны с линейной поляризацией является её высокий коэффициент усиления. Однако одним из недостатков антенн с линейной поляризацией является то, что при использовании таких антенн максимальное значение сигнала можно получить только при совпадении положений приёмной и передающей антенн в пространстве. Поскольку дроны являются мобильными объектами, в системе глушения целесообразно использовать антенны с круговой поляризацией. Преимущество таких антенн по сравнению с антеннами с линейной поляризацией состоит в том, что приёмная антенна всегда может принимать некоторую составляющую сигнала, независимо от угла её положения.

**Во второй главе** для дальнейшей автоматизации системы глушения проводилось исследование существующих методов автоматического распознавания цифровых модуляций. Сложность задачи распознавания заключается в том, что при передаче

сигнала по эфиру на него могут накладываться множество шумов. Кроме того, сигнал может быть принят с определенным фазовым сдвигом, так как исходная информация о принимаемом сигнале отсутствует.

Исследование известных в настоящее время методов распознавания цифровых модуляций показало, что существующие алгоритмы либо не обеспечивают высокую точность распознавания, либо требуют больших вычислительных ресурсов, или же не учитывают влияние наличия сдвига фазы в принимаемом сигнале на точность распознавания. По этой причине в диссертации была поставлена задача разработать новый алгоритм автоматического распознавания цифровых модуляций, который не имеет перечисленных недостатков. Для решения этой задачи была использована искусственная нейронная сеть.

Для обучения сети был выбран метод обратного распространения ошибки. С математической точки зрения задача обучения нейронной сети состоит в нахождении локального минимума графика функции зависимости ошибки от соответствующего весового значения. Эта задача решается методом градиентного спуска, математические алгоритмы которого включены в модель искусственной нейронной сети.

Одним из наиболее важных гиперпараметров нейронной сети является шаг градиентного спуска, который называют скоростью обучения сети. Влияние значения скорости обучения на обучение сети представлено на рис. 3.

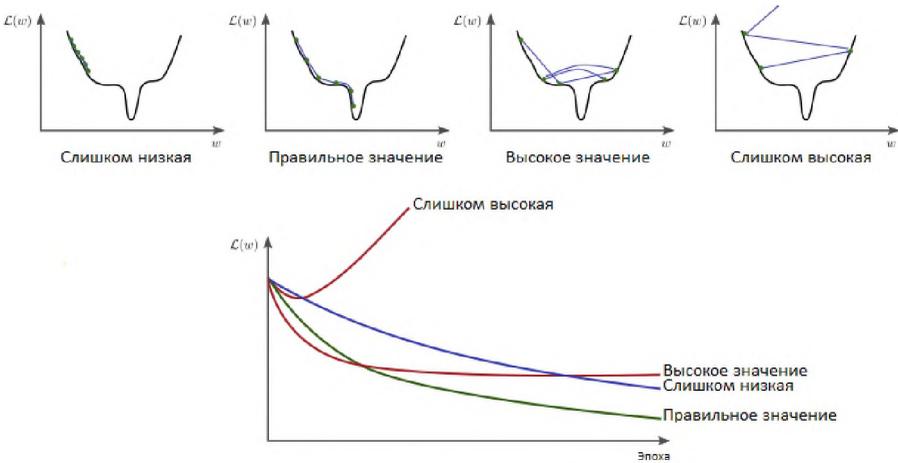


Рис. 3. Влияние скорости обучения на градиентный спуск

На практике в случае сложных задач скорость обучения не имеет одного четкого значения, а подвергается изменению по определенному закону. Существует множество методов управления скоростью обучения нейронной сети, однако наиболее распространенными являются методы линейного или экспоненциального спада, ступенчатого спада и циклического изменения.

Для обеспечения широкого спектра экспериментов необходима возможность изменения гиперпараметров сети. Именно поэтому в программной среде LabVIEW была

разработана нейронная сеть с динамическими гиперпараметрами, которая позволяет без изменения программного кода легко менять количество скрытых слоев в сети и число нейронов в них, а также метод управления скоростью обучения сети и соответствующие ему параметры. Для проверки работоспособности сети был проведен эксперимент по идентификации четырех основных типов сигналов в программной среде LabVIEW. Этими сигналами являются синусоидальный, прямоугольный, треугольный и пилообразный. В табл. 2 представлены результаты эксперимента по распознаванию. Как видно из таблицы, результаты эксперимента полностью доказывают работоспособность сети.

Таблица 2

SNR	Sine	Square	Triangle	Sawtooth
-	98.31 %	97.95 %	99.36 %	98.63 %
20 дБ	96.86 %	97.67 %	99.52 %	98.93 %
15 дБ	98.47 %	99.12 %	98.22 %	98.79 %
10 дБ	98.55 %	99.18 %	98.37 %	98.87 %
5 дБ	99.71 %	99.49 %	98.74 %	99.09 %
3 дБ	99.46 %	99.50 %	98.61 %	99.48 %

Для выбора наиболее эффективного метода управления скоростью обучения сети были проведены эксперименты, в которых одна и та же задача распознавания решалась разными методами управления скоростью обучения. Результаты экспериментов показали, что для данной задачи метод циклического изменения является наиболее эффективным для управления скоростью обучения сети.

На следующем этапе была поставлена задача разработать основные информативные признаки сигнала для упомянутых 4-х типов модуляций, которые будут подаваться в сеть в качестве входного сигнала при обучении. В результате проведенных исследований и экспериментов были разработаны 7 основных информативных признаков, которые вычисляются на основе мгновенной амплитуды и фазы сигнала. Предложенные признаки, которые вычисляются на основе мгновенной амплитуды, определяются следующим образом:

- стандартное отклонение нормализованной мгновенной амплитуды:

$$\sigma_{an} = \sqrt{\frac{\sum (a_n(i) - \mu_{an})^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

где  $n$  - количество выборок;  $\mu_{an}$  - среднее значение нормализованной мгновенной амплитуды (равно 1);

- коэффициент асимметрии нормализованной мгновенной амплитуды:

$$S_{an} = \frac{\sum (a_n(i) - \mu_{an})^3}{n \sigma_{an}^3}; \quad (2)$$

- среднее значение абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$\mu_{anc} = \frac{1}{n} \sum |a_{nc}(i)|, \quad (3)$$

где  $a_{nc}(i)$  - нормализованная центрированная мгновенная амплитуда, которая определяется следующим образом;

$$a_{nc}(i) = a_n(i) - 1; \quad (4)$$

- коэффициент асимметрии абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$S_{anc} = \frac{\sum (|a_{nc}(i)| - \mu_{anc})^3}{n \sigma_{anc}^3}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{anc}$  - стандартное отклонение абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды;

- коэффициент эксцесса абсолютного значения нормализованной центрированной мгновенной амплитуды:

$$K_{anc} = \frac{\sum (|a_{nc}(i)| - \mu_{anc})^4}{n \sigma_{anc}^4}. \quad (6)$$

Предложенные признаки, которые вычисляются на основе мгновенной фазы, определяются следующим образом:

- среднее значение абсолютного значения центрированного нелинейного компонента мгновенной фазы:

$$\mu_{pnl} = \frac{1}{n} \sum |\varphi_{pnl}(i)|, \quad (7)$$

где  $\varphi_{pnl}(i)$  - центрированный нелинейный компонент мгновенной фазы;

- стандартное отклонение абсолютного значения центрированного нелинейного компонента мгновенной фазы:

$$\sigma_{pnl} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[ \sum \varphi_{pnl}^2(i) \right] - \left[ \frac{1}{n} \sum |\varphi_{pnl}(i)| \right]^2}. \quad (8)$$

Для оценки значения предлагаемых информативных признаков в программной среде LabVIEW был смоделирован набор из 100 сигналов для каждого типа модуляции. Каждый моделируемый сигнал содержал 4096 случайных символов с 8 выборками на каждый символ. Впоследствии были извлечены мгновенная амплитуда и фаза этих сигналов и на основе этих параметров были рассчитаны значения информативных признаков сигнала. Значения информативных признаков при отношении сигнал/шум 7 дБ показаны на рис.4.

Исследования показали, что модуляции 16-QAM и 64-QAM можно классифицировать по набору признаков, рассчитанных на основе мгновенной амплитуды сигнала ( $\sigma_{an}$ ,  $S_{an}$ ,  $\mu_{anc}$ ,  $S_{anc}$  и  $K_{anc}$ ), а модуляции BPSK и QPSK - по набору признаков, рассчитанных на основе мгновенной фазы сигнала ( $\mu_{pnl}$  и  $\sigma_{pnl}$ ).

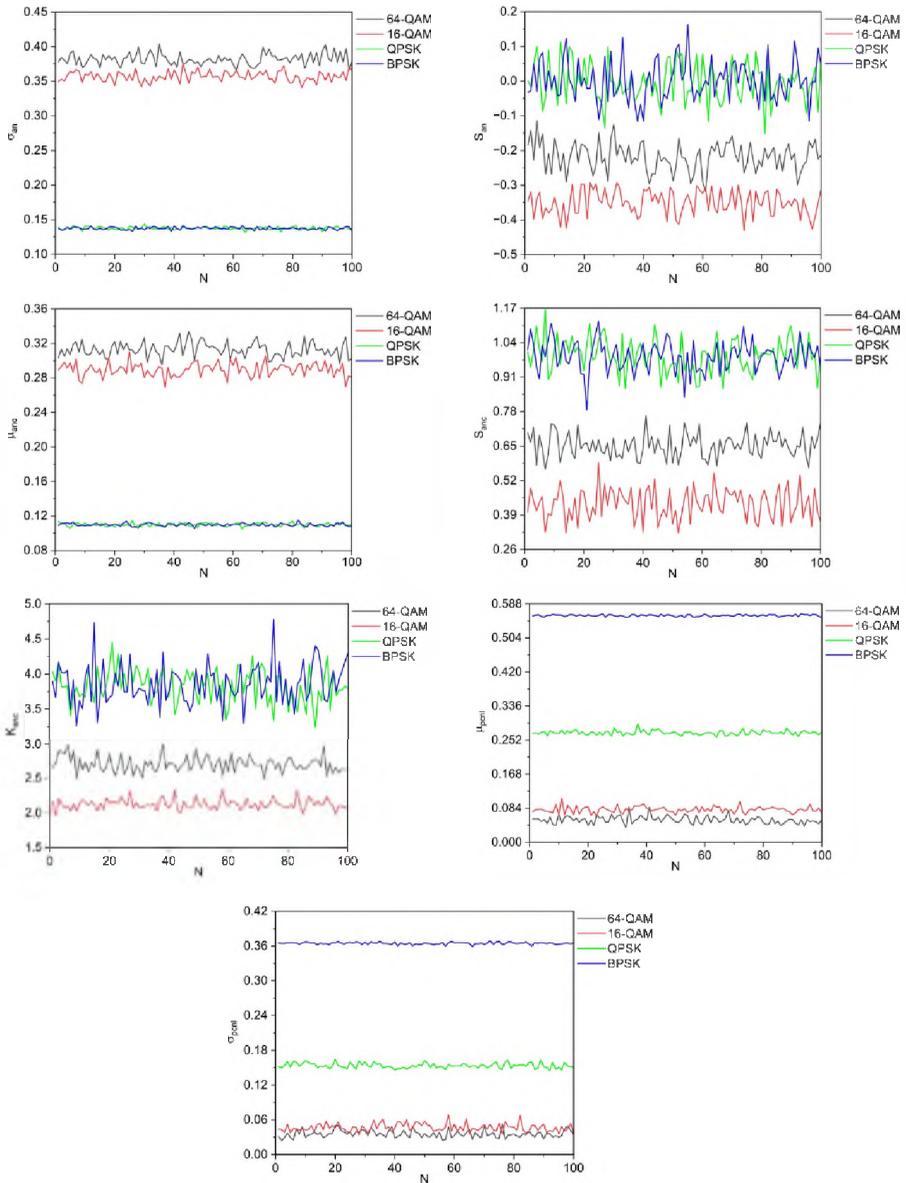


Рис. 4. Значения информативных признаков при отношении сигнал/шум 7 дБ; где  $N = 1, 2, \dots, 100$  - это номер моделируемого сигнала

Сдвиг фазы в сигнале влияет только на два признака из описанного выше набора:  $\mu_{pnt}$  и  $\sigma_{pnt}$ . Несмотря на это, эти признаки по-прежнему применимы для

распознавания типов модуляции. Это связано с тем, что значения этих признаков для типов модуляции QPSK и BPSK попадают в отдельные диапазоны (без какого-либо перекрытия) и могут быть различимы на протяжении полного цикла сдвига фазы (рис. 5).

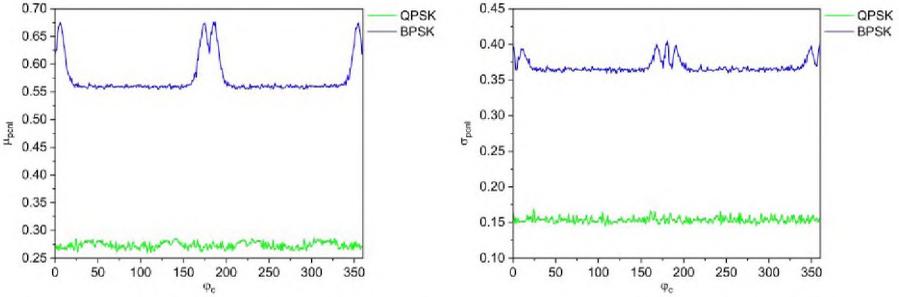


Рис. 5. Значения  $\mu_{pcnl}$  и  $\sigma_{pcnl}$  в зависимости от сдвига фазы  $\varphi_c$  для сигналов QPSK и BPSK при отношении сигнал/шум 7 дБ.

Поскольку сдвиг фазы не влияет на признаки, рассчитанные на основе мгновенной амплитуды сигнала, распознавание модуляций 16-QAM и 64-QAM при наличии сдвига фазы в сигнале все еще может быть осуществлено с использованием этих признаков.

**В третьей главе** представлены результаты тестирования алгоритма распознавания цифровой модуляции и прототипа системы глушения сигналов канала управления дронов.

Для обучения нейронной сети в программной среде LabVIEW было сгенерировано 500 низкочастотных эквивалентных сигналов для каждого типа модуляции. Моделированные сигналы имели случайное значение отношения сигнал/шум в диапазоне от 6 до 30 дБ и случайный фазовый сдвиг в диапазоне от 0 до 45 градусов. Диапазон сдвига фазы был выбран от 0 до 45 градусов, поскольку значения  $\mu_{pcnl}$  и  $\sigma_{pcnl}$  в этом диапазоне охватывают все значения, присутствующие в течение полного цикла сдвига фазы (рис. 5).

На основании результатов экспериментов по обучению нейронной сети была выбрана архитектура с двумя скрытыми слоями, каждый из которых содержал четырнадцать нейронов. Учитывая то, что продолжительность обучения сети с такой архитектурой была относительно меньше (около 10 минут) по сравнению с более сложными архитектурами с дополнительными скрытыми слоями или нейронами, а также с учетом сопоставимой точности распознавания, она была определена как оптимальная для рассматриваемой задачи.

После каждой эпохи, прошедшей в нейронной сети, вычислялась среднеквадратическая ошибка сети. Если она достигала значения меньше 0.01, то сеть считалась обученной:

$$\delta_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum \left( \frac{\sum \delta_m}{m} \right)^2}{n}}, \quad (9)$$

где  $m$  - количество выходных нейронов;  $\delta_m$  - значение ошибки  $m$ -го выходного нейрона;  $n$  - размер обучающих данных.

Тестирование алгоритма распознавания проводилось в два этапа. На первом этапе эксперимент по распознаванию проводился с использованием моделированных сигналов. Для теста распознавания было сгенерировано 1000 сигналов для каждого типа модуляции при указанном значении сигнал/шум. Смещение фазы начиналось с 0 градусов и увеличивалось на один градус с каждым сгенерированным сигналом. В конце была рассчитана средняя вероятность распознавания. Результаты теста распознавания представлены в табл. 3.

Таблица 3

SNR	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
30 дБ	98.17 %	99.55 %	99.15 %	98.89 %
20 дБ	98.15 %	99.55 %	99.15 %	98.81 %
15 дБ	97.41 %	99.54 %	99.14 %	98.9 %
10 дБ	97.35 %	99.44 %	99.11 %	99.17 %
7 дБ	97.79 %	97.08 %	99.03 %	99.15 %
6 дБ	97.94 %	91.51 %	32.59 %	99.1 %

При SNR = 6 дБ вероятность распознавания модуляции 16-QAM резко падает до ~30%, но сеть все еще способна классифицировать модуляции BPSK и QPSK с высокой вероятностью. В случае неопределенности выбора между модуляцией 16-QAM и 64-QAM, сеть выбирает вариант 64-QAM. Высокая вероятность распознавания модуляции 64-QAM в сочетании с низкой вероятностью распознавания модуляции 16-QAM при SNR = 6 дБ указывает на то, что сеть не способна классифицировать модуляции 16-QAM и 64-QAM при данном значении сигнал/шум (рис. 6). Для значений сигнал/шум больше 6 дБ сеть классифицирует все рассмотренные типы модуляции с высокой вероятностью распознавания, независимо от значения фазового сдвига.

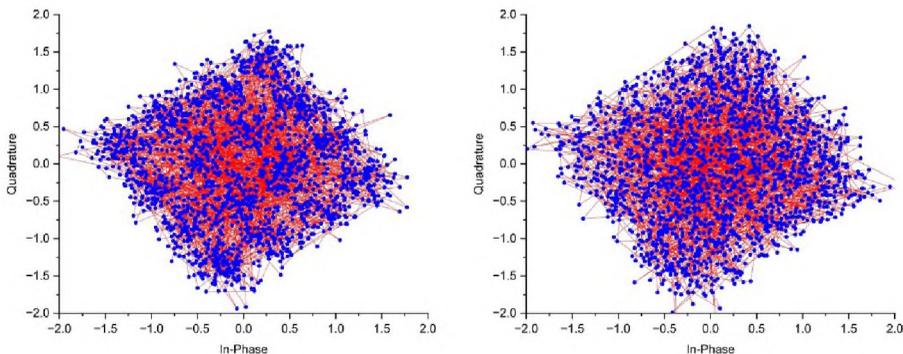


Рис. 6. Сигнальные созвездия сгенерированных сигналов 16-QAM и 64-QAM при отношении сигнал/шум 6 дБ и  $\varphi_c = 35^\circ$

На втором этапе эксперимент по распознаванию проводился в реальном канале связи. Для проведения эксперимента была собрана система на основе приемопередатчика PXIe-5841 от компании NI (National Instruments). К приемопередатчику были подключены две антенны типа Вивальди с коэффициентом

усиления 5 дБ и шириной главного лепестка диаграммы направленности ~45 градусов (рис. 7).



Рис. 7. Система обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов на базе PXIe-5841

В программной среде LabVIEW был разработан блок передачи цифровых модулированных сигналов BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Сигнал передавался на несущей частоте 2.4 ГГц, при этом частота выборки IQ данных была 500 кГц:

$$IQ\ Rate = Symbol\ Rate \times Samples\ Per\ Symbol. \quad (10)$$

Для реализации алгоритма обнаружения несущей частоты сигнала был применен инструментарий RFmx SpecAn (LabVIEW). Для корректного приема сигнала недостаточно иметь только информацию о несущей частоте. Также необходимо иметь хотя бы приблизительное значение частоты выборки IQ данных. Для оценки значения частоты выборки IQ данных использовалась его связь с занимаемой полосой пропускания сигнала:

$$IQ\ Rate = 1.25 \times Occupied\ Bandwidth. \quad (11)$$

В конечном итоге блоки обнаружения несущей частоты сигнала, оценки значения частоты выборки IQ данных и распознавания цифровой модуляции были интегрированы в блок приёма сигнала (рис. 8). Результаты теста распознавания при использовании реального канала связи без сдвига частоты в сигнале представлены в табл. 4 (отношение сигнал/шум рассчитывалось при передаче сигнала).

Таблица 4

SNR	BPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
30 дБ	99.46 %	99.64 %	99.96 %	99.01 %
20 дБ	99.45 %	99.64 %	99.96 %	99.03 %
15 дБ	99.45 %	99.64 %	99.96 %	99.02 %
10 дБ	99.45 %	99.63 %	99.95 %	99.02 %
7 дБ	99.58 %	99.53 %	94.68 %	99.01 %

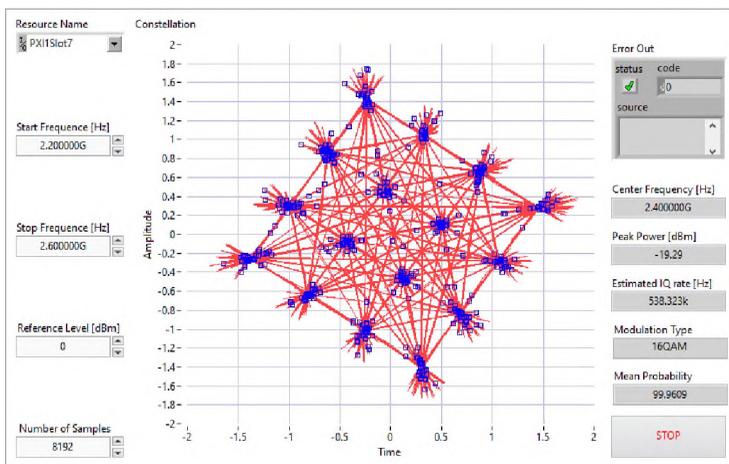


Рис.8. Интерфейс программы обнаружения и распознавания цифровых модулированных сигналов

Учитывая вероятность возникновения ошибки оценки при обнаружении несущей частоты, было исследовано влияние сдвига частоты в сигнале на точность распознавания (рис.9). В результате экспериментов выяснилось, что допустимый предел сдвига частоты в сигнале, при котором система остается работоспособной, примерно равен  $\pm IQ \text{ Rate}/2.2$ . Однако, независимо от значения сдвига частоты в сигнале, система не может отличить модуляцию BPSK от QPSK, поскольку созвездие сигнала вращается, и при нормализации оба сигнала становятся идентичными. Результаты теста распознавания с максимальным допустимым сдвигом частоты в сигнале (225 кГц) при текущих настройках системы представлены в табл. 5.

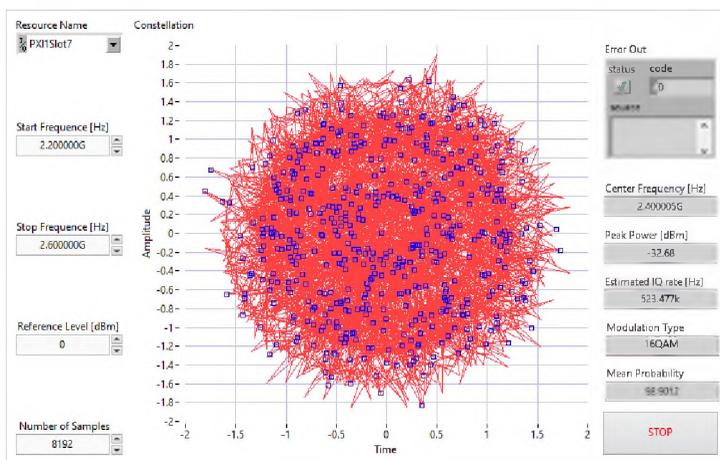
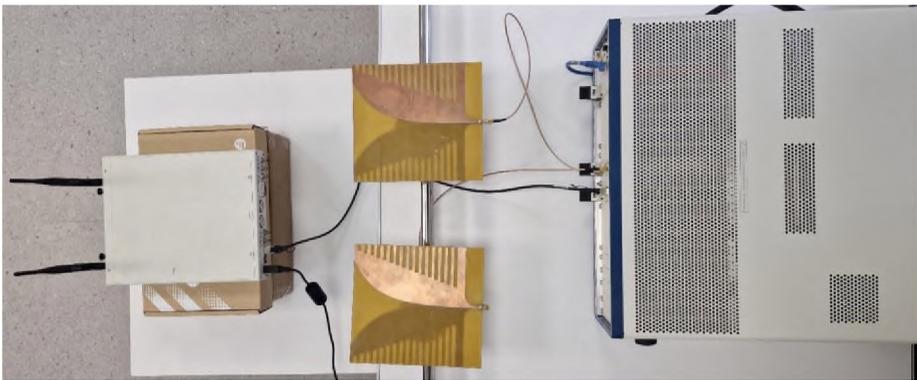


Рис.9. Распознанный сигнал с модуляцией 16-QAM при SNR = 30 дБ и со сдвигом частоты в сигнале 5 кГц

SNR	QPSK	16-QAM	64-QAM
30 дБ	99.53 %	99.69 %	98.98 %
20 дБ	99.52 %	98.33 %	99.00 %
15 дБ	99.52 %	97.28 %	98.99 %
10 дБ	99.52 %	95.51 %	98.99 %
8 дБ	99.52 %	79.73 %	98.99 %

Так как при глушении дрона единственным показателем качества и эффективности глушения является неуправляемость дрона, то для полной оценки системы глушения было решено использовать другую приемопередающую систему, имитирующую обмен данными между дроном и оператором. Для постройки имитирующей системы было использовано устройство NI USRP-2954R от компании NI (National Instruments). К имитирующей системе были подключены две всенаправленные антенны (рис. 10).



*Рис.10. Тестирование системы глушения с использованием устройства, имитирующего обмен данными между дроном и оператором.*

В ходе эксперимента параметры передаваемого сигнала в обеих системах были схожими. Несущая частота сигнала составляла 2,4 ГГц, частота дискретизации сигналов I и Q - 500 кГц. Для оценки эффективности метода глушения совпадающим сигналом последний сравнивался с методом глушения с использованием белого гауссовского шума.

В первом эксперименте проводилось измерение коэффициента ошибки модуляции (Modulation Error Ratio). В этом эксперименте для передачи сигнала использовался тип модуляции 16-QAM. Коэффициент ошибки модуляции в приемнике при отсутствии сигнала глушения составил около 30 дБ. Для оценки качества связи при подавлении сигнала в приемнике вместо отношения сигнал/шум часто используется значение отношения сигнал/помеха (Signal to Jamming Ratio). Результаты экспериментов показали, что при глушении с использованием совпадающего сигнала со значением отношения сигнал/помеха -0,3 дБ, коэффициент ошибки модуляции в приемнике снижается примерно до 6 дБ. При использовании шумоподавляющего сигнала со значением отношения сигнал/помеха 16 дБ, коэффициент ошибки модуляции в приемнике снижается примерно до 20 дБ. Учитывая тот факт, что для передачи совпадающего и шумоподавляющего сигнала использовалась одна и та же мощность, и исходя из результатов эксперимента, можно прийти к выводу, что метод глушения с

использованием совпадающего сигнала в несколько раз эффективнее метода глушения с использованием белого гауссовского шума.

Во втором эксперименте изучалось воздействие сигнала глушения на процесс восстановления передаваемых данных. В ходе данного эксперимента передатчик системы имитации канала управления дрона осуществлял передачу текстовой информации, а приемник пытался ее восстановить (рис. 11). Передатчик преобразовывал текст, введенный пользователем, в битовый поток, который затем разделился на пакеты и непрерывно передавался по радиоканалу. Каждый пакет, кроме основной информации, содержал номер пакета и блок для синхронизации. Приемник, обнаружив блок синхронизации, пытался восстановить текстовую информацию и разместить ее в соответствии с номером пакета.

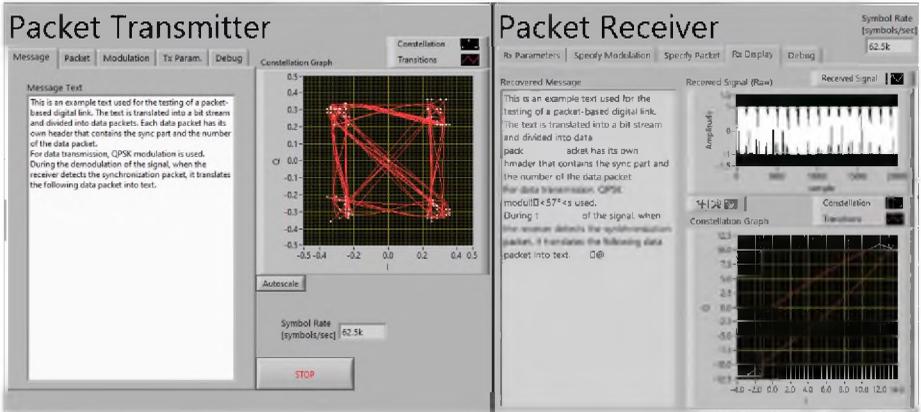


Рис. 11. Лицевая панель программы для передачи и приема текстовых сообщений

Во время эксперимента несущая частота сигнала составляла 2,4 ГГц, а частота дискретизации сигналов I и Q - 500 кГц. В качестве типа модуляции использовался QPSK.

Таблица 6

Сигнал/помех	Восстановленная часть (%)	Время восстановления (с)
7 дБ	29.4%	24.3
10 дБ	83.8%	5.4
13 дБ	95.2%	2.8
15 дБ	98.4%	2.6
18 дБ	100%	2.3
21 дБ	100%	1.5
24> дБ	100%	1.1

При отсутствии сигнала глушения приемник восстанавливает полный текст с высокой скоростью. Результаты экспериментов показывают, что минимальное пороговое значение отношения сигнал/помеха, при котором приемник способен восстановить какую-либо часть текста, составляет около 7 дБ. В этом случае, приемник способен восстановить около 29,4% текста. Результаты экспериментов с использованием сигнала глушения с модуляцией QPSK приведены в табл. 6.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Для передачи видеосигналов в дронах применяется технология многоканальной передачи сигналов (по нескольким несущим), в то время как сигналы канала управления передаются на одной несущей частоте [1-2].
2. Наиболее распространенными типами цифровой модуляции, используемыми в каналах управления гражданских дронов, являются BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM [1-2].
3. Среди существующих методов глушения сигналов дронов наиболее эффективным с точки зрения энергозатрат и низкой вероятности обнаружения является метод подавления с использованием совпадающего сигнала [1-2].
4. Для увеличения эффективности глушения сигналов применяются направленные антенны. При глушении сигналов дрона наиболее целесообразно использовать направленные антенны с круговой поляризацией [2-3].
5. Существующие на данный момент алгоритмы автоматического распознавания цифровых модуляций либо не учитывают влияние сдвига фазы в принимаемом сигнале на точность распознавания, либо требуют значительных вычислительных ресурсов [7].
6. Среди алгоритмов автоматического распознавания цифровых модуляций наиболее эффективными являются модели, построенные на основе искусственных нейронных сетей [4-7].
7. Среди исследованных методов управления скоростью обучения нейронной сети наиболее эффективным является метод циклического изменения [4-6].
8. Результаты тестирования предложенного набора ключевых признаков сигнала показывают, что идентификация цифровых модуляций BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM, передаваемых на одной несущей частоте при любом значении фазового сдвига в сигнале, может быть выполнена с высокой точностью при значении отношения сигнал/шум до 7 дБ. Точность распознавания составляет 94.7-99.9% [7-8].
9. Идентификация цифровых модуляций QPSK, 16-QAM и 64-QAM, передаваемых на одной несущей частоте при максимальном сдвиге частоты в сигнале, равном  $\pm IQ \text{ Rate}/2.22$ , может быть выполнена с высокой точностью при значении отношения сигнал/шум до 7 дБ. Точность распознавания составляет 79.7-99.7% [8].
10. При наличии сдвига частоты в сигнале внутрикласовая идентификация модуляций M-PSK невозможна [8].
11. Результаты экспериментов показывают, что метод глушения с использованием совпадающего сигнала в несколько раз эффективнее метода глушения с использованием белого гауссовского шума.
12. Оптимальное значение отношения сигнал/помеха (SJR) для глушения сигналов канала управления дронов составляет 7 дБ или меньше.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. **Չրիգորյան Տ.Ա.**, Խաչատրյան Լ.Խ. LabVIEW ծրագրային միջավայրում Wi-Fi ստանդարտով աշխատող ցանցի խլացման ծրագրի մշակումը// ՀԱՊՀ Լրագրեր, Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան. - 2019. - մաս 1. - էջ 237-242.
2. **Григорян Т.А.**, Хачатрян Л.Х. Разработка системы глушения гражданского дрона// Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - Ереван. - 2019. - №1. - С. 104-112.
3. Stepanyan A., **Grigoryan T.**, Ghazaryan D., Khachatryan L. Method of Increasing Elliptical Polarized Antenna Axial Ratio// Bulletin of RAU: Physico-mathematical and natural science. - Yerevan. - 2021. - №1. - P. 157-164.
4. **Grigoryan T.** Automatic Signal Type Recognition via Neural Network// Bulletin of RAU: Physico-mathematical and natural science. - Yerevan. - 2021. - №2. - P. 27-35.
5. **Grigoryan T.** Research of Neural Network Learning Rate Control Methods for the Automatic Signal Type Recognition// Armenian Journal of Physics. - Yerevan. - 2021. - vol.14. - Issue 2. - P. 91-98.
6. **Григорян Т.А.**, Степанян А.Г., Хачатрян Л.Х. Автоматическое распознавание типа сигнала с использованием циклического метода управления скоростью обучения нейронной сети// Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - Ереван. - 2021. - №2. - С. 78-86.
7. **Grigoryan T.A.**, Ayvazyan M.Ts., Khachatryan L.Kh. Automatic Digital Modulation Recognition in the Presence of Phase Offset// Journal of Communications Software and Systems. - 2024. - vol.20. - №2. - P. 198-205.
8. **Григорян Т.А.**, Айвазян М.Ц. Автоматическое обнаружение и распознавание цифровых модулированных сигналов с помощью нейронной сети// Известия НАН РА и НПУА: Серия технических наук. - Ереван. - 2024. - Т. 77. - №1. С. 46-57.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից տեխնոլոգիաների զարգացումը թույլ է տալիս քաղաքացիական դրոններին հաջողությամբ իրականացնել գործառույթներ, որոնք հասանելի չէին անցյալում: Դրանք ստանում են լայն տարածում, կիրառվում են գործունեության տարբեր ոլորտներում (ապրանքների մատակարարում, օդային լուսանկարչություն, տեսանկարահանում, գյուղատնտեսություն և այլն), լուծում բազմազան խնդիրներ:

Քաղաքացիական դրոնների լայն տարածմանը և տեխնիկական զարգացմանը զուգընթաց աճում է դրանց վտանգավորության աստիճանը՝ քաղաքացիական և ռազմական պաշտպանության տեսանկյունից: Դրանք կարող են ներխուժել հատուկ նշանակության օբյեկտների տարածքներ, տեղափոխել պայթուցիկ նյութեր, արգելված ապրանքներ և այլն: Հաճախ դրոնների թիրախ են հանդիսանում նաև միջազգային օդանավակայանները: Դրոնների չափերի փոքրացմանը, գնի նվազմանը և արհեստական բանականությամբ համալրմանը զուգընթաց աճում է դրանց դեմ պայքարի միջոցների անհրաժեշտությունը:

Դրոնների հեռավար կառավարումը օպերատորի կողմից իրականացվում է ռադիոհաճախականային ազդանշանների միջոցով: Այդ իսկ պատճառով դրոնների դեմ պայքարի արդյունավետ մեթոդներից մեկն է համարվում ռադիոէլեկտրոնային պայքարի համակարգերի միջոցով դրանցում կիրառվող ազդանշանների խլացումը: Կառավարման ազդանշանների խլացումը խաթարում է դրոնի կառավարումը, և հնարավորություն է ստեղծում հետագա վնասազերծման գործառույթների իրագործման համար:

Կառավարման ազդանշանների ճշգրիտ և արդյունավետ խլացում իրականացնելու համար անհրաժեշտ են այդ ազդանշանի մասին որոշակի տեղեկություններ: Խլացման համար անհրաժեշտ ազդանշանի կարևորագույն բնութագրեր են հանդիսանում ազդանշանի հաղորդման կրող հաճախությունը, թողարկման շերտը, մոդուլացման տեսակը և այլն: Քաղաքացիական դրոններում կիրառվող ռադիոհաճախականային կապի տեխնոլոգիաների բնութագրությունը հիմնականում ներկայացված է լինում բաց աղբյուրներում: Դա հնարավորություն է տալիս կառուցել ստատիկ խլացման համակարգեր, որոնք կարող են զուգահեռ խլացնել նախօրոք հայտնի կապի տեխնոլոգիաներով աշխատող ազդանշաններ: Ստատիկ խլացման համակարգերի առավելությունը դրանց նախագծման պարզությունն է: Սակայն, այսպիսի համակարգերը հանդիսանում են ոչ օպտիմալ ռեսուրսների օգտագործման տեսանկյունից: Ինչպես նաև, դժվարություններ են առաջացնում այսպիսի համակարգերի ծրագրային և ապարատային թարմացումները՝ դրոններում կիրառվող կապի տեխնոլոգիաների սրընթաց աճի պայմաններում: Այդ իսկ պատճառով դրոնների խլացման ոլորտում արդիական խնդիր է համարվում խլացման ավտոմատ համակարգի նախագծումը: Այսպիսի համակարգը հնարավորություն է տալիս ավտոմատ կերպով եթերում հայտնաբերել դրոնի կառավարման ազդանշանները, ճանաչել դրանց մոդուլացման

տեսակը՝ արդյունավետ և ճշգրիտ խլացում իրականացնելու նպատակով:

Ատենախոսության նպատակն է մշակել դրոնի կառավարման ազդանշանների ավտոմատ հայտնաբերման և խլացման աղմկակայուն համակարգ: Վերոնշյալ նպատակին հասնելու համար ատենախոսությունում լուծվել են հետևյալ խնդիրները՝

- Ուսումնասիրվել են դրոնի կառավարման ազդանշաններում օգտագործվող թվային մոդուլացման տեսակները և դրանց հաղորդման տեխնոլոգիաները:
- Ուսումնասիրվել են թվային մոդուլացիաների ավտոմատ ճանաչման մեթոդները:
- Ուսումնասիրվել են նեյրոնային ցանցի ուսուցման արագության կառավարման մեթոդները:
- LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակվել են մեկ կրող հաճախականություն ունեցող ազդանշանների հայտնաբերման և դիսկրետիզացման հաճախականության գնահատման ծրագրային հանգույցներ:
- Մշակվել են BPSK, QPSK, 16-QAM և 64-QAM մոդուլացման տեսակների ճանաչման համար օգտագործվող ազդանշանի բնութագրիչ հատկանիշներ:
- LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակվել են դինամիկ հիպերպարամետրերով նեյրոնային ցանցի և ուսուցման արագության կառավարման մեթոդների ծրագրային ալգորիթմներ:
- Մշակվել է նեյրոնային ցանցի հիման վրա թվային մոդուլացիաների ավտոմատ ճանաչման ծրագրային հանգույց:
- Մշակվել է խլացման ազդանշանների հաղորդման ծրագրային հանգույց:
- Նախատիպային համակարգի կառուցման համար իրականացվել է ազդանշանների հայտնաբերման, թվային մոդուլացիայի ավտոմատ ճանաչման և խլացման ազդանշանների հաղորդման ծրագրային հանգույցների ինտեգրացիա:

**TIGRAN ARAM GRIGORYAN**

## **DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DETECTION AND JAMMING OF DRONE CONTROL SIGNALS**

### **SUMMARY**

The development of modern technologies allows civilian drones to successfully perform functions that were unavailable in the past. They are becoming widespread, used in various spheres of activity (product delivery, aerial photography, videography, agriculture, etc.), and solve various tasks.

As civilian drones become more widespread and technically advanced, their danger in terms of both civilian and military defense increases. They can infiltrate into the territories of special-purpose facilities, transport explosives, prohibited items, etc. International airports are

also frequently attacked by drones. As drones become smaller, cheaper, and equipped with artificial intelligence, the need for countermeasures against them is increasing in parallel.

Drones are remotely controlled by the operator using radio frequency signals. For this reason, jamming the drone signals by using radio-electronic systems is considered one of the effective methods of counteracting drones. The jamming of control signals disrupts the drone control and creates an opportunity to implement further neutralization functions.

For accurate and efficient jamming of drone control signals, certain information about the signal is required. The key signal parameters required for jamming are the signal transmission carrier frequency, bandwidth, modulation type, etc. The characteristics of RF communication systems used in civilian drones are mostly available in open sources. This allows for the development of static jamming systems capable of simultaneously suppressing signals utilizing predetermined communication technologies. The advantage of static jamming systems is the simplicity of their design. Although these systems fulfill their function, they are not the best solution in terms of resource efficiency. The rapid development of communication technologies used in drones creates problems for updating the software and hardware of these systems. In this regard, the current challenge in the field of drone radio-electronic countermeasures is the development of an automatic jamming system. Such systems are capable of automatically detecting drone control signals and determining their modulation type for efficient and accurate jamming of these signals.

The purpose of the research work is to develop a noise-resistant system for automatic detection and jamming of drone control channel signals. To achieve the intended goal, the following tasks are solved in the work:

- Digital modulation types and signal transmission technologies used in drone control channels are studied.
- Automatic digital modulation recognition methods are studied.
- Neural network learning rate control methods are studied.
- Software modules for carrier frequency detection and IQ rate estimation of signals with one carrier frequency have been developed.
- Signal features for the recognition of BPSK, QPSK, 16-QAM and 64-QAM digital modulation types have been developed.
- Algorithms of neural network with dynamic hyperparameters and for neural network learning rate control methods have been developed.
- A software module for automatic digital modulation recognition based on neural network has been developed.
- A software module for the jamming signals transmission has been developed.
- The software modules for signal detection, automatic digital modulation recognition and jamming signal transmission have been integrated into the prototype system.

