

На правах рукописи



Нгуен Чонг Нхан

**КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ
В СРЕДСТВАХ РАДИОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ
АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена на кафедре радиоэлектронных средств ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель:

Подстригаев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, работает в должности доцента на кафедре радиоэлектронных средств СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Оппоненты:

Купцов Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий, г. Санкт-Петербург

Дворников Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», научный сотрудник Научно-исследовательского центра, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Акционерное общество научно-внедренческое предприятие «ПРОТЕК», г. Воронеж

Защита состоится «31» мая 2023 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.387.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета <http://www.etu.ru/> в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявления о защитах докторских и кандидатских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Автореферат разослан «30» марта 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.387.01
кандидат технических наук, доцент



М. Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Средства радиомониторинга используются для анализа электромагнитной обстановки, контроля функционирования источников радиоизлучения (ИРИ) различного назначения и обеспечения электромагнитной совместимости ИРИ. Во многом технические характеристики средств радиомониторинга определяются устройством обработки.

При построении средств радиомониторинга широкое распространение получил подход, основанный на использовании широкополосного приемника с переносом сигнала в диапазон промежуточных частот и узкополосного устройства обработки. Причем в отсутствие априорных данных о принимаемом сигнале квазиоптимальным является устройство автокорреляционной обработки (УАО). При априорной неопределенности сигнала такое устройство обеспечивает минимальное пороговое отношение сигнал-шум (ОСШ) на входе.

Важной задачей радиомониторинга является определение принадлежности сигнала к конкретному типу, режиму работы и экземпляру ИРИ. Для этого выполняется классификация сигнала по основным применяемым на практике видам: линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ), фазо-кодо-манипулированный (ФКМ) и простой импульсный. Поэтому устройство обработки должно классифицировать все вышеперечисленные виды сигналов.

Известные УАО, выполняющие классификацию принятого сигнала, не обеспечивают одновременно низкое пороговое ОСШ на входе и определение всех трех видов сигналов. Так, УАО [Гузь В. И., Короткий П. Е., Ясинский В. Л., 1974] и [Короткий П. Е., Личко Г. И., 1976] не классифицируют простой сигнал и при обеспечении вероятностей правильного обнаружения $P_{D0} = 0,99$ и ложной тревоги $P_{F0} = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ требуют ОСШ на входе не менее 12,5...14 дБ. Устройство циклостационарного спектрального анализа, описанное в [Gardner W. A., Spooner C. M., 1988] и [Pace E. Phillip, 2009], при тех же вероятностях требует ОСШ на входе не менее 10...13 дБ. Другое УАО [Семенов В. В., Лихачев В. П., 2014] требует меньшего ОСШ (0...3 дБ), но определяет только ЛЧМ-сигнал. Значения порогового ОСШ относятся к классификации. При сравнении устройств обработки значения параметров входного сигнала принимались одинаковыми (близкими).

Поэтому требуется разработка такого УАО, которое классифицировало бы ЛЧМ-, ФКМ- и простой сигнал при пониженном пороговом ОСШ на входе.

Степень разработанности темы. Вопросами автокорреляционной обработки в средствах радиомониторинга занимались А. П. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян, Ю. П. Мельников, В. П. Лихачев, Ю. М. Перунов, И. Ф. Купряшкин, Н. В. Соколик, А. С. Подстригаев и другие. Среди зарубежных авторов следует отметить Ph. E. Pace, W. A. Gardner, C. M. Spooner и J. B. Y. Tsui. Распознаванию сигналов в средствах радиомониторинга посвящены работы С. С. Аджемова, Д. С. Чирова, М. В. Терешонок, С. В. Дворникова, С. А. Иваненко, В. А. Козьмина, П. В. Заика, А. М. Кудрявцева, а также O. A. Dobre, A. Abdi, Y. Bar-Ness, W. Su, X. Li, F. Dong, S. Zhang, W. Guo, T. J. O'Shea, J. Corgan, T. C. Clancy.

Научной задачей являются выбор признаков классификации принятого сигнала (ЛЧМ-, ФКМ- или простой) в УАО, разработка математической модели процесса обработки в УАО и структуры алгоритма классификации для УАО, выбор и обоснование параметров алгоритма классификации, обеспечивающих пониженное пороговое ОСШ на входе.

Целью диссертационной работы является совершенствование процесса обработки в УАО средств радиомониторинга для понижения требуемого входного ОСШ.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **задачи**:

1. Выбор признаков для классификации принятого сигнала (ЛЧМ, ФКМ или простой) в УАО и разработка математической модели процесса обработки в УАО.

2. Разработка алгоритма классификации принятого сигнала в УАО, позволяющего определять один из видов сигнала: простой, ЛЧМ- или ФКМ-сигнал.

3. Исследование зависимостей вероятности верной классификации простых и сложных сигналов от ОСШ в УАО и обоснование параметров разработанного алгоритма, обеспечивающих пониженное пороговое ОСШ на входе.

4. Исследование особенностей обработки ФКМ-сигналов с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка.

5. Экспериментальное исследование математической модели процесса обработки в УАО на записях сигналов.

6. Разработка рекомендаций по практической реализации УАО.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель процесса классификации принятого сигнала в УАО.

2. Предложен защищенный патентом РФ № 2683791 алгоритм классификации сигнала (простой, ЛЧМ или ФКМ) в УАО.

3. Получены зависимости вероятности верной классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов от ОСШ на основе разработанной математической модели. Обоснованы приемлемые для практики значения параметров алгоритма.

4. Предложен защищенный патентом РФ № 2716017 алгоритм классификации сигнала в УАО с уточнением вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала.

5. Получены зависимости вероятности верной классификации ФКМ-сигналов с кодами Баркера и Фрэнка от ОСШ в УАО с усовершенствованным алгоритмом обработки.

Теоретическую ценность представляют: математическая модель процесса классификации принятого сигнала в УАО; полученные зависимости вероятности верной классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов от ОСШ; результаты исследования математической модели процесса обработки в УАО при использовании записанных и имитационных сигналов.

Практическую ценность представляют:

– классификация сигнала в разработанном алгоритме в масштабе времени,

близком к реальному;

– понижение требуемого ОСШ на входе УАО с разработанным алгоритмом по сравнению с существующими устройствами с автокорреляционной обработкой на величину до 10 дБ;

– проработка реализации предложенных технических решений, позволившая оценить вычислительную сложность алгоритма и сформулировать требования к необходимым ресурсам ПЛИС.

Методология и методы исследований. В процессе выполнения диссертационной работы использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории обнаружения и различения сигналов, аппарат вычислительной математики и программирования, а также математическое моделирование в среде MATLAB.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель процесса обработки в УАО позволяет исследовать соответствующие зависимости вероятности верной классификации принятого сигнала от ОСШ для обоснования оптимальных параметров алгоритма в зависимости от заданных диапазонов параметров сигналов.

2. Алгоритм классификации сигнала в УАО, основанный на сравнении амплитудных спектров составляющих исходного сигнала и сигнала на удвоенной частоте после перемножения с их задержанной копией с заданным порогом, позволяет в режиме времени, близком к реальному, с пониженным ОСШ определять один из видов сигнала: простой, ЛЧМ- или ФКМ-сигнал.

3. Для уточнения вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала в алгоритме классификации сигнала в УАО следует дополнительно применить процедуры обработки составляющей сигнала после полосовой фильтрации на разностной частоте первого канала УАО.

4. Экспериментально обоснованные значения параметров алгоритма позволяют понизить требуемое пороговое ОСШ на входе по сравнению с существующими алгоритмами на основе автокорреляционной обработки на величину до 10 дБ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность теоретических расчетов и формируемых на их основе выводов обеспечивается корректностью используемого современного математического аппарата с учетом влияющих факторов и заданных ограничений. Моделирование и эксперимент проведены с использованием современного программного обеспечения и поверенной аппаратуры. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат данным, полученным ранее другими исследователями в рассматриваемой предметной области.

Внедрение результатов диссертации. Полученные научные результаты внедрены в разработки АО «НИИ «Вектор» (г. Санкт-Петербург) и АО «НИИ СТТ» (г. Смоленск).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы рассматривались и обсуждались на 5 конференциях: XXV Международной научно-технической конференции (НТК) «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж

(2019 г.); The 20th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems NEW2AN, г. Санкт-Петербург (2020 г.); 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, г. Санкт-Петербург (2021 г.); XIV Всероссийской НТК студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации», г. Иркутск (2021 г.); XIX Всероссийской молодежной НТК «Радиолокация и связь – перспективные технологии», г. Москва (2021 г.).

За результаты исследований и разработки по теме диссертации получены дипломы и награды: диплом за лучший доклад XIX Всероссийской молодежной НТК «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (2021 г.); победитель конкурсных отборов, включенных в Программу поддержки эффективных аспирантов по итогам 2020/2021 и 2021/2022 учебных годов; победитель конкурса стипендий Президента РФ по приоритетным направлениям на 2021/2022 учебный год.

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей и моделировании алгоритмов. Анализ всех основных результатов выполнен при непосредственном участии автора.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 15 научных работ: 5 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ по специальности 2.2.16; 2 патента на изобретение; 7 статей в трудах конференций (из них 4 статьи индексируются в базе данных Scopus); 1 статья в издании, входящем в Перечень ВАК РФ по другой специальности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и двух приложений. Основная часть работы изложена на 130 страницах, содержит 43 рисунка и 7 таблиц. Список используемой литературы включает 142 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор известных научных результатов по теме диссертации, на основании которого обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ существующих устройств приема и обработки простых и сложных сигналов, поставлены задачи исследования.

Выполнен анализ требований к обработке простых и сложных сигналов. Показано, что для повышения эффективности работы средств радиомониторинга необходимо в режиме времени, близком к реальному, с пониженным ОСШ определять один из видов сигнала: простой, ЛЧМ- или ФКМ-сигнал.

Проведен сравнительный анализ технологий обработки сигналов в диапазоне промежуточных частот. Показано, что в условиях априорной неопределенности типа и параметров сигнала целесообразно использовать автокорреляционный анализ. Однако, данная технология имеет ограничения при классификации принятого сигнала. Поэтому целесообразно совершенствование устройства автокорреляционной обработки.

Описаны существующие алгоритмы классификации сигнала с автокорреляционной обработкой, для каждого из них указаны основные преимущества и недостатки. В следующих главах диссертации рассмотрены технические решения, направленные на устранение (уменьшение влияния) недостатков.

В заключение сформулирована научная задача диссертационного исследования.

Во второй главе разработаны алгоритмы классификации сигнала в устройстве автокорреляционной обработки.

Модели анализируемых сигналов имеют следующий вид:

$$- \text{ для простого сигнала: } S_{\text{вх}}(t) = U_{\text{ОПР}} \cos[\omega_{\text{ОПР}}t + \phi_{\text{ОПР}}], 0 < t \leq \tau_{\text{иПР}},$$

где U_0 – амплитуда сигнала, ω_0 – угловая частота сигнала, ϕ_0 – начальная фаза сигнала, $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

$$- \text{ для ЛЧМ-сигнала: } S_{\text{вх}}(t) = U_{\text{ОЛЧМ}} \cos\left[\omega_{\text{ОЛЧМ}}t + \frac{\gamma t^2}{2} + \phi_{\text{ОЛЧМ}}\right], 0 < t \leq \tau_{\text{иЛЧМ}},$$

где γ – скорость изменения частоты внутри импульса.

– для ФКМ-сигнала:

$$S_{\text{вх}}(t) = U_{\text{ОФКМ}} \cos[\omega_{\text{ОФКМ}}t + \phi_{\text{ОФКМ}} + \pi k(t)], 0 < t \leq \tau_{\text{иФКМ}},$$

где $k(t)$ – функция, принимающая в момент изменения фаз значения 0 или 1.

Описаны оптимальные алгоритмы классификации сигналов. Показано, что рассмотренные подходы эффективно используются для сигналов с известными параметрами, а с уменьшением априорной информации о параметрах эффективность алгоритмов классификации снижается. В случае приема сигналов с априорной неопределённостью частоты, фазы, амплитуды и вида сигнала использование таких подходов не представляется возможным.

Поэтому выбраны признаки для классификации принятого сигнала (ЛЧМ, ФКМ или простой) в УАО и разработана математическая модель процесса обработки в УАО. При этом приняты допущения о том, что коэффициент передачи УАО равен единице, а фильтры на выходах автокорреляторов без искажения пропускают составляющие спектра сигнала на разностной частоте. Под разностной частотой понимается частота разностной составляющей в спектре сигнала на выходе автокоррелятора после перемножения сигнала с задержанной копией.

Ниже приведены аналитические выражения, которые описывают процесс фильтрации сигналов после перемножения их с задержанной копией, получения амплитудных спектров, сравнения и определения вида простых сигналов, сигналов с ЛЧМ и двоичной ФКМ.

1. Полосовая фильтрация на разностной частоте $f_{\text{раз1}}$ (ПФ1) сигнала $S_{x1}(t)$ с перемножителя.

Для простого сигнала: $S_1(t) \approx 0$ (т.к. не модулированный сигнал и его задержанная копия имеют одинаковые несущие частоты, то их разность на выходе автокоррелятора равна нулю).

Для ЛЧМ-сигнала:

$$S_1(t) = \frac{U_{0ЛЧМ}^2}{8} \cos \left[\omega_{0ЛЧМ} \tau_{31} + \gamma t \tau_{31} - \frac{\gamma \tau_{31}^2}{2} \right], \tau_{31} \leq t \leq \tau_{иЛЧМ}.$$

Для ФКМ-сигнала:

$$S_1(t) = \frac{U_{0ФКМ}^2}{8} \beta(t) \beta(t - \tau_{31}) \cos(\omega_{0ФКМ} \tau_{31}), \tau_{31} \leq t \leq \tau_{иФКМ},$$

где $\beta(t)$ – модулирующая функция ФКМ-сигнала.

2. Фильтрация низкочастотной составляющей сигнала $S_{x1}(t)$ с выхода перемножителя.

$$\text{Для простого сигнала: } S_2(t) = \frac{U_{0ПР}^2}{8} \cos(\omega_{0ПР} \tau_{31}), \tau_{31} \leq t \leq \tau_{иПР}.$$

Для ЛЧМ-сигнала: $S_2(t) \approx 0$.

Для ФКМ-сигнала:

$$S_2(t) = \frac{U_{0ФКМ}^2}{8} \beta(t) \beta(t - \tau_{31}) \cos(\omega_{0ФКМ} \tau_{31}), \tau_{31} \leq t \leq \tau_{иФКМ}.$$

3. Фильтрация низкочастотной составляющей сигнала $S_{x2}(t)$ с выхода перемножителя.

$$\text{Для простого сигнала: } S_3(t) = \frac{U_{0ПР}^2}{8} \cos(2\omega_{0ПР} \tau_{32}), \tau_{32} \leq t \leq \tau_{иПР}.$$

Для ЛЧМ-сигнала: $S_3(t) \approx 0$.

$$\text{Для ФКМ-сигнала: } S_3(t) = \frac{U_{0ФКМ}^2}{8} \cos(2\omega_{0ФКМ} \tau_{32}), \tau_{32} \leq t \leq \tau_{иФКМ}.$$

4. Полосовая фильтрация на разностной частоте $f_{раз2}$ (ПФ2) сигнала $S_{x2}(t)$ с перемножителя. Полоса пропускания ПФ2 определяется как $\Delta f_{ПФ1}$.

Для простого сигнала: $S_4(t) \approx 0$.

Для ЛЧМ-сигнала:

$$S_4(t) = \frac{U_{0ЛЧМ}^2}{8} \cos \left[2\omega_{0ЛЧМ} \tau_{32} + 2\gamma t \tau_{32} - \gamma \tau_{32}^2 \right], \tau_{32} \leq t \leq \tau_{иЛЧМ}.$$

Для ФКМ-сигнала: $S_4(t) \approx 0$.

5. Получение амплитудных спектров $G_1(f)$ сигнала $S_1(t)$ с ПФ1, $G_2(f)$ сигнала $S_2(t)$ с ФНЧ1, $G_3(f)$ сигнала $S_3(t)$ с ФНЧ2, $G_4(f)$ сигнала $S_4(t)$ с ПФ2.

6. Сравнение максимальных значений спектров $G_1(f)$, $G_2(f)$, $G_3(f)$, $G_4(f)$ с порогом $G_{п}$ в пороговых узлах ПУ1, ПУ2, ПУ3 и ПУ4, и передача соответственно на первый, второй, третий и четвертый входы ЛУ принятого решения о превышении порога обнаружения $G_{п}$.

Значение $G_{п}$ определяется по критерию Неймана-Пирсона при заданной вероятности ложной тревоги P_{F0} и вероятности правильного обнаружения P_D согласно выражению $G_{п} = \varepsilon^2 P_0$, где значение ε рассчитывается из формулы

$P_D = 1 - \frac{1}{2} \{ \varphi[\chi_0(\varepsilon + 1)] - \varphi[\chi_0(\varepsilon - 1)] \}$, $\varphi(\chi_0)$ – интеграл вероятности, $P_0 = \chi_0^2 P_{ш0}$ – порог срабатывания обнаружителя, χ_0 – относительный порог срабатывания обнаружителя, который определяется из формулы $P_{F0} = 1 - \varphi(\chi_0)$, $P_{ш0}$ – средняя амплитуда огибающей шума.

7. В ЛУ принимается решение о виде принятого сигнала:

а) если в каналах 2 и 3 сигнал “есть”, а в каналах 1 и 4 сигнала “нет”, то принимается решение, что принят простой сигнал;

б) если в каналах 1 и 4 сигнал “есть”, а в каналах 2 и 3 сигнала “нет”, то принимается решение, что принят ЛЧМ-сигнал;

в) если в каналах 1, 2 и 3 сигнал “есть”, а в канале 4 сигнала “нет”, то принимается решение, что принят ФКМ-сигнал.

На основе разработанной математической модели для классификации сигнала (простой, с ЛЧМ или ФКМ) в УАО предложено техническое решение, основанное на проверке по заданному порогу наличия или отсутствия амплитудных спектров составляющих исходного сигнала и сигнала на удвоенной частоте после перемножения с их задержанными копиями (патент РФ № 2683791). Структурная схема алгоритма, реализующего описанный процесс обнаружения и классификации сигналов различного вида, показана на рисунке 1.

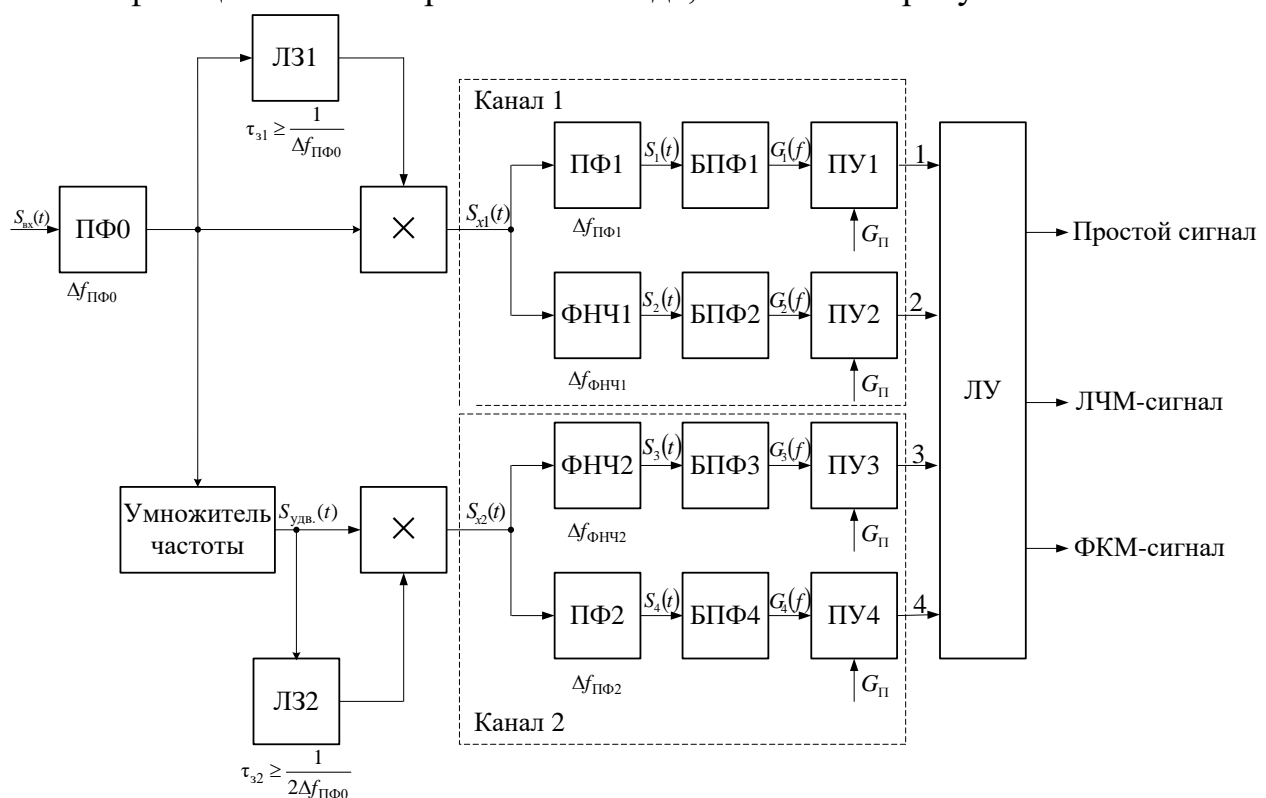


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма классификации сигнала в УАО

В состав схемы алгоритма (рисунок 1) входят: полосовой фильтр высоких частот ПФ0 с полосой пропускания $\Delta f_{ПФ0}$; линии задержки ЛЗ1 и ЛЗ2 с длительностями задержки τ_{31} и τ_{32} соответственно; умножитель частоты, удваивающий

частоту сигнала; перемножители; фильтры низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2 с полосами пропускания $\Delta f_{\text{ФНЧ1}}$ и $\Delta f_{\text{ФНЧ2}}$ соответственно; полосовые фильтры на разностных частотах ПФ1 и ПФ2 с полосами пропускания $\Delta f_{\text{ПФ1}}$ и $\Delta f_{\text{ПФ2}}$ соответственно; блоки быстрого преобразования Фурье БПФ1, БПФ2, БПФ3 и БПФ4, предназначенные для получения амплитудных спектров отфильтрованных составляющих; пороговые узлы ПУ1, ПУ2, ПУ3 и ПУ4; логический узел ЛУ. Назначение остальных узлов ясно из их названий.

Для уточнения вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала (с кодами Баркера и Фрэнка) в алгоритме классификации сигнала в УАО предложено техническое решение, основанное на дополнительном применении процедуры обработки составляющей сигнала после полосовой фильтрации на разностной частоте первого канала (патент РФ № 2716017; рисунок 2).

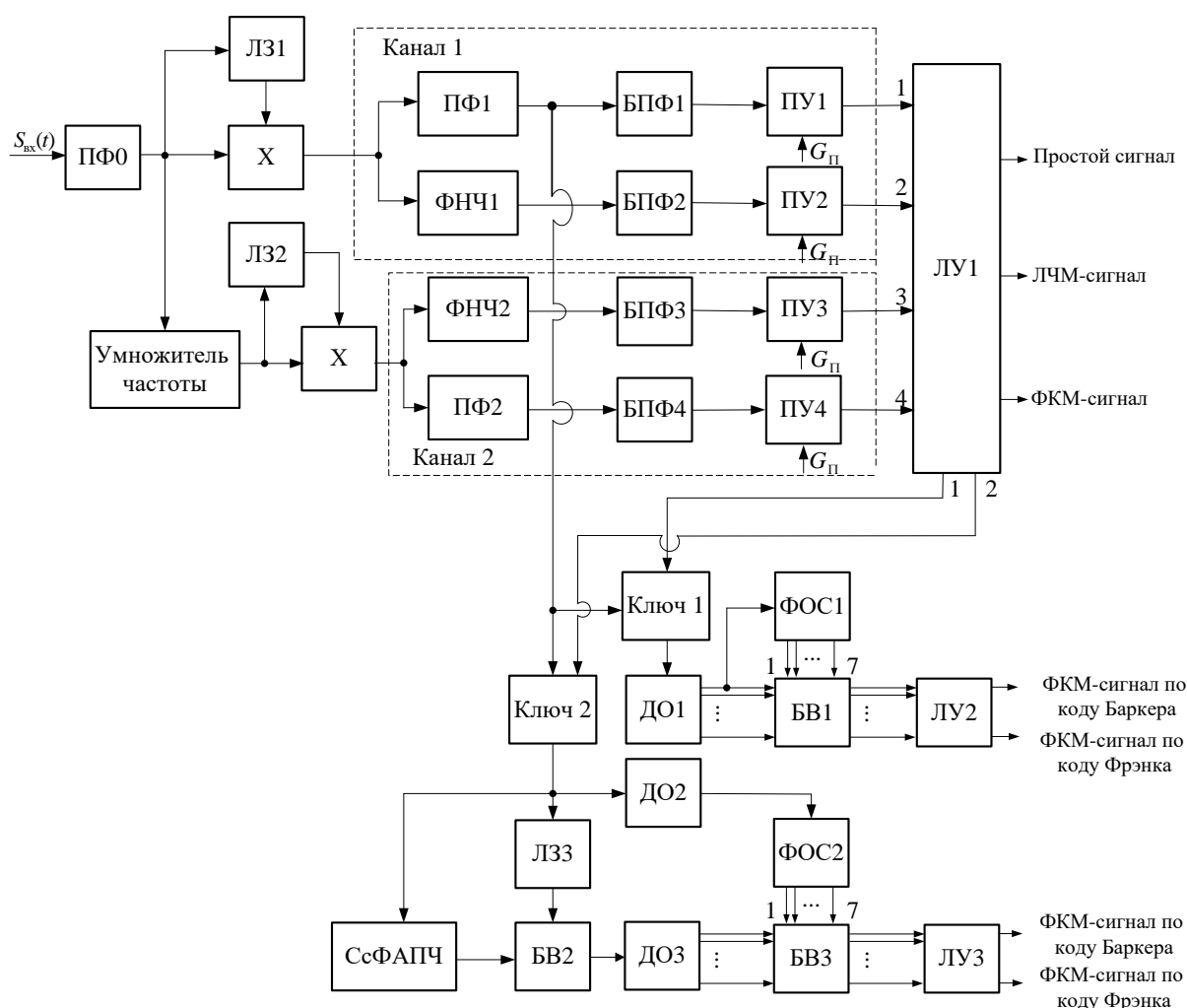


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма классификации сигнала в УАО с уточнением вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала

Схема предлагаемого алгоритма (рисунок 2) состоит из следующих элементов: полосовых фильтров ПФ0 – ПФ2; линий задержки ЛЗ1 – ЛЗ3; умножителя частоты; перемножителей (\times); фильтров низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2; блоков БПФ1 – БПФ4; пороговых узлов ПУ1 – ПУ4; логических узлов ЛУ1 – ЛУ3;

ключей 1 и 2; детекторов огибающей ДО1 – ДО3; блоков вычитания БВ1 – БВ3; формирователей опорного сигнала ФОС1 и ФОС2; синтезатора с фазовой автоматической подстройкой частоты (СсФАПЧ).

Введенные в схему формирователи ФОС1 и ФОС2 предназначены для формирования ФКМ-сигнала по всем возможным кодам Баркера, а узел СсФАПЧ – для перестройки на разностную частоту простого сигнала.

В третьей главе исследована вероятность верной классификации при подаче имитационных сигналов с различными параметрами и обоснованы параметры алгоритма, оптимального по критерию минимизации входного ОСШ.

Исследованы зависимости вероятности верной классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов от ОСШ для различных значений величины $D = \tau_3 / \tau_c$, где τ_3 – длительность задержки, τ_c – длительность сигнала (рисунок 3). Показано, что для минимизации ОСШ на входе УАО должны выполняться условия – для ФКМ-сигналов.

Исследованы зависимости вероятности верной классификации простых сигналов от ОСШ для различных значений величины $M = \tau_{\text{БПФ}} / \tau_c$, где $\tau_{\text{БПФ}}$ – длительность окна БПФ (рисунок 4). Показано, что для минимизации необходимого ОСШ на входе УАО должно выполняться условие $M < 10$.

Исследованы зависимости вероятности верной классификации ЛЧМ-сигналов от ОСШ для различных значений величины $C = \Delta f_{\text{ПФ0}} / \Delta f_{\text{ЛЧМ}}$, где $\Delta f_{\text{ЛЧМ}}$ – ширина спектра ЛЧМ-сигнала (рисунок 5). Показано, что для минимизации необходимого ОСШ на входе УАО должно выполняться условие $C < 100$.

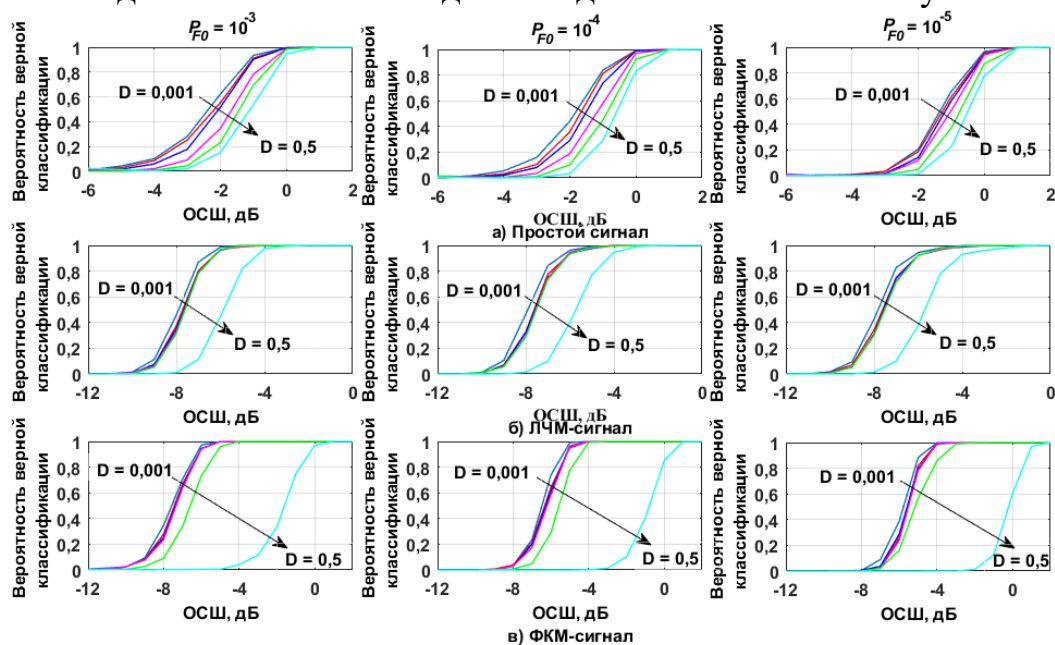


Рисунок 3 – Зависимости вероятности верной классификации сигналов разных видов от ОСШ для различного соотношения D при разных значениях P_{F0}

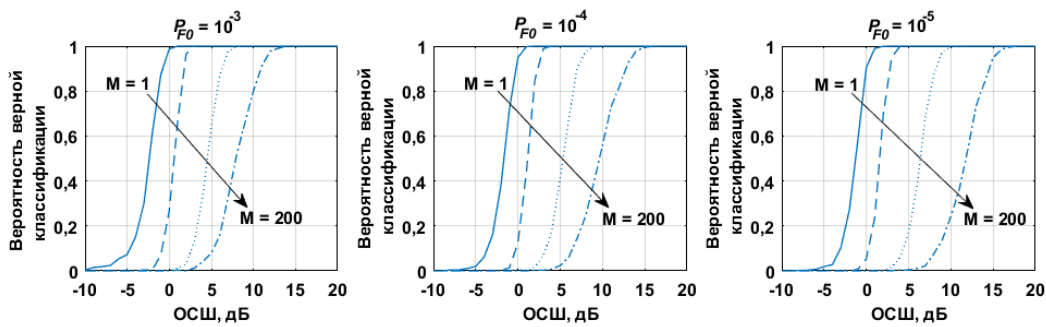


Рисунок 4 – Зависимости вероятности верной классификации простых сигналов от ОСШ для различного соотношения M при разных значениях P_{F0}

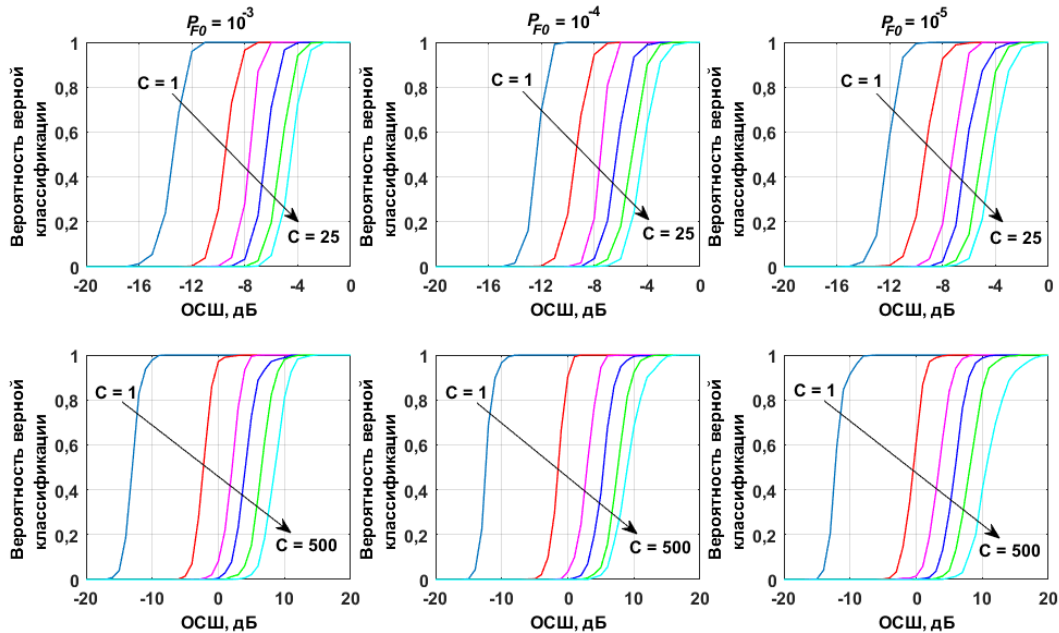


Рисунок 5 – Зависимости вероятности верной классификации ЛЧМ-сигналов от ОСШ для различного соотношения C при разных значениях P_{F0}

Исследованы зависимости вероятности верной классификации кодовых двоичных псевдослучайных последовательностей ФКМ-сигналов от ОСШ при различном количестве элементов кода S и разных значениях P_{F0} (рисунок 6). Показано, что для минимизации необходимого ОСШ на входе УАО должно выполняться условие $\tau_d > 1/\Delta f_{\text{ПФ1,2}}$, где τ_d – длительность дискретности сигнала.

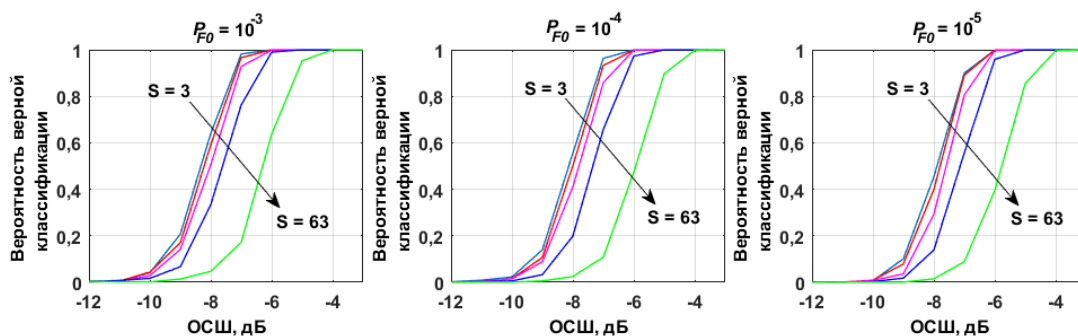


Рисунок 6 – Зависимости вероятности верной классификации ФКМ-сигналов от ОСШ для различного количества элементов кода S при разных значениях P_{F0}

На основе полученных данных обоснованы следующие оптимальные параметры разработанного алгоритма: полосы пропускания полосовых фильтров ПФ1 и ПФ2 – до 50 МГц; полосы пропускания низкочастотных фильтров ФНЧ1 и ФНЧ2 – до 500 кГц; время задержки в корреляторе: для простых сигналов $0,001\tau_{и} < \tau_{з,опт} < 1/\Delta f_{ФНЧ}$, для ЛЧМ-сигналов $0,001\tau_{и} < \tau_{з,опт} < 0,1\tau_{и}$, для ФКМ-сигналов $0,01\tau_{д} < \tau_{з,опт} < 0,7\tau_{д}$.

Выполнено сравнение зависимостей вероятности верной классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов от ОСШ с обоснованными выше параметрами алгоритма, представленного на рисунке 1. Время задержки τ_z выбрано таким, что попадает в диапазон $\tau_{з,опт}$ для каждого сигнала. В результате сравнения показано, что наибольшая вероятность верной классификации при равных условиях достигается для ЛЧМ-сигнала.

Для оценки эффективности классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов в усовершенствованном УАО построены матрицы перепутывания (англ. *Confusion matrix*). Результаты при значении порога обнаружения, вычисляемом для $P_D = 0,99$ и $P_{F0} = 10^{-5}$, показаны в таблице 1.

Также выполнена оценка чувствительности алгоритма классификации сигнала в УАО с уточнением вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала путем моделирования работы схемы, представленной на рисунке 2. В результате оценки (рисунок 7) показано, что классификация ФКМ-сигнала с кодом Фрэнка требует на 0,2...2 дБ большего значения ОСШ, чем классификация ФКМ-сигнала с кодом Баркера.

Таблица 1 – Вероятности классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов для разных значений ОСШ

| Фактический вид сигнала | Определяемый вид сигнала | | | |
|-------------------------|--------------------------|--------|--------|--------------|
| | Простой | ЛЧМ | ФКМ | Не определен |
| ОСШ | -2 дБ | | | |
| Простой | 85,58 | 0,00 | 14,32 | 0,10 |
| ЛЧМ | 0,00 | 98,94 | 0,97 | 0,09 |
| ФКМ | 1,02 | 0,44 | 98,47 | 0,07 |
| ОСШ | 0 дБ | | | |
| Простой | 99,02 | 0,00 | 0,98 | 0,00 |
| ЛЧМ | 0,00 | 99,14 | 0,86 | 0,00 |
| ФКМ | 0,88 | 0,12 | 99,00 | 0,00 |
| ОСШ | 10 дБ | | | |
| Простой | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ЛЧМ | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| ФКМ | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |

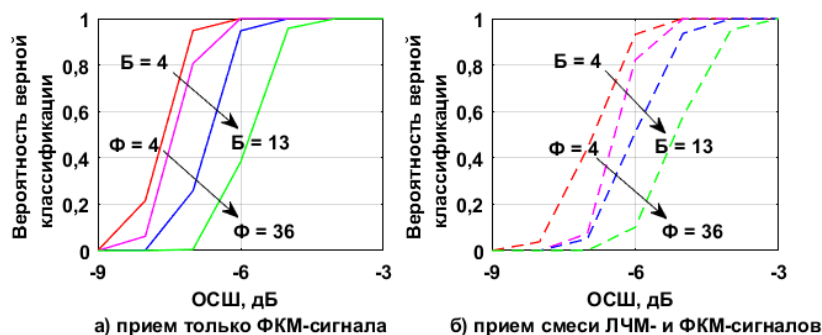


Рисунок 7 – Зависимости вероятности верной классификации ФКМ-сигналов с кодами Баркера и Фрэнка от ОСШ при $P_{F0} = 10^{-5}$

В четвертой главе исследована вероятность верной классификации при подаче записей реальных сигналов, даны рекомендации по реализации и практическому применению разработанных алгоритмов.

Описан стенд для формирования и записи сигналов разных видов. В его состав входили: генератор сигналов E8267D; осциллограф MSO 5204 с 8-битным АЦП; компьютер с установленной программой MATLAB R2019b: процессор – Intel Core i5-7200U; память – 8192 MB RAM.

В ходе выполнения эксперимента производилось генерирование простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов. Затем сгенерированные сигналы оцифровывались осциллографом для последующей обработки на компьютере в среде MATLAB с целью определения вида сигналов. Сигналы с несущей частотой 300 МГц были записаны при частоте дискретизации 5 ГГц и разрешении АЦП 8 бит.

Результаты эксперимента показали, что при равных условиях классификация записей простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов требует ОСШ на 0,1...3 дБ больше, чем классификация имитационных сигналов. Это объясняется внесением дополнительных шумов при оцифровке.

Далее выполнена оценка ресурсоемкости алгоритма в устройстве обработки сигналов на основе ПЛИС путем расчета необходимых ресурсов для реализации системы фильтров и блоков БПФ. Результат оценки показал, что для реализации всего алгоритма требуется не менее 900 тысяч логических вентилях. Указанные требования выполняются для современных ПЛИС, например, ПЛИС на кристалле VU095 семейства Virtex UltraScale, которая имеет 1,176 млн логических вентилях.

При реализации предложенного алгоритма на ПЛИС темп поступления и выдачи информации одинаковый. Однако, существует задержка обработки, которая, впрочем, в большинстве случаев не влияет на качество дальнейшей вторичной обработки. Это позволяет говорить о том, что алгоритм выполняется на ПЛИС в режиме времени, близком к реальному (*англ.* "near real-time").

Также в четвертой главе выполнено сравнение вычислительной сложности разработанного алгоритма с существующими алгоритмами классификации сигнала с автокорреляционной обработкой (рисунок 8). Показано, что разработанный алгоритм имеет среднюю скорость роста количества операций, основной вклад в которую вносит количество отсчетов БПФ.

Использование разработанного алгоритма классификации сигналов в УАО позволяет в режиме времени, близком к реальному, определять один из видов сигнала (простой, ЛЧМ- или ФКМ-сигнал) и понизить требуемое ОСШ на входе по сравнению с существующими автокорреляционными алгоритмами на величину до 10 дБ (таблица 2).

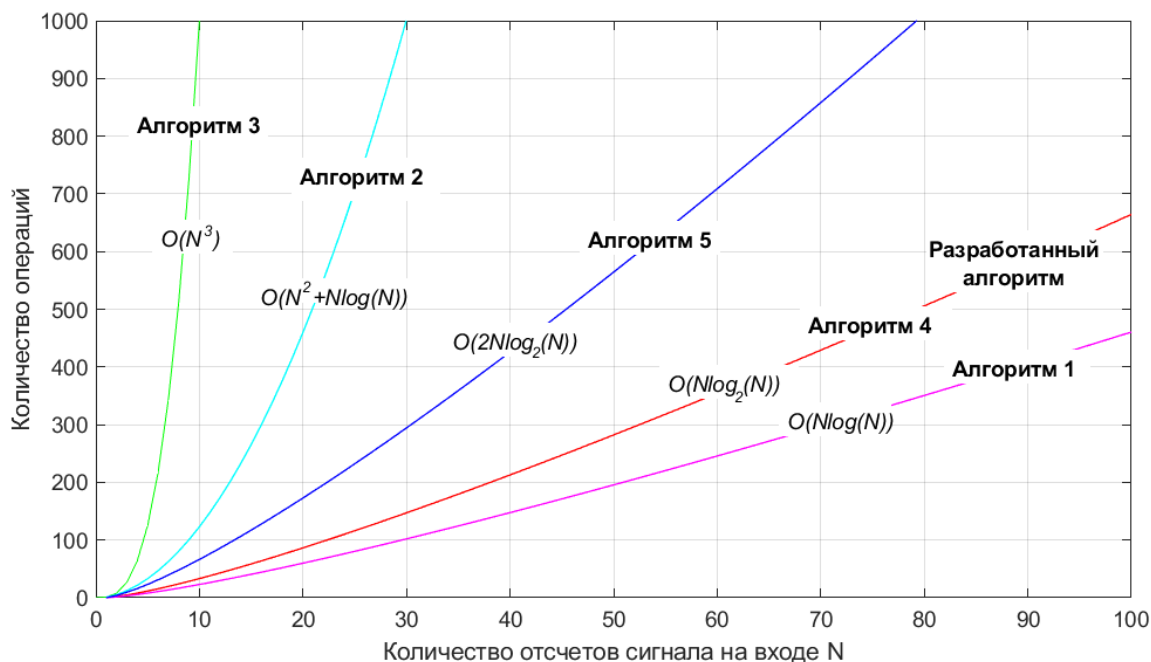


Рисунок 8 – Характеристики роста количества операций алгоритмов при различных значениях их сложности

Таблица 2 – Сравнительная оценка характеристик различных алгоритмов определения видов сигналов с автокорреляционной обработкой

| Характеристика | Алгоритм 1 | Алгоритм 2 | Алгоритм 3 | Алгоритм 4 | Алгоритм 5 | Разработанный алгоритм |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| 1. Пороговое ОСШ (дБ) для обеспечения вероятностей $P_{D0} = 0,99$ и $P_{F0} = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ | 12,5...14 | 12,5...14 | 10...13 | 0...3 | 0...3 | 0...3 |
| 2. Определение простого сигнала | Невозможно | Невозможно | Возможно | Невозможно | Невозможно | Возможно |
| 3. Определение ЛЧМ-сигнала | Возможно | Возможно | Возможно | Возможно | Возможно | Возможно |
| 4. Определение ФКМ-сигнала | Возможно | Возможно | Возможно | Невозможно | Невозможно | Возможно |
| 5. Определение вида ФКМ-сигнала (с кодом Баркера или Фрэнка) | Невозможно | Невозможно | Невозможно | Невозможно | Невозможно | Возможно |
| 6. Определение трех сигналов: простой, ЛЧМ-, ФКМ-сигнал | Невозможно | Невозможно | Возможно | Невозможно | Невозможно | Возможно |
| Примечание – Преимущества алгоритмов выделены белым цветом, недостатки – темно-серым, нейтральные по значению характеристики – светло-серым. | | | | | | |

Показано, что в зависимости от специфики решаемых задач и условий применения разработанный алгоритм классификации сигнала может использоваться

в средствах радиомониторинга со всеми методами частотного анализа: поисковым, беспойсковым и комбинированным.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Выбраны признаки для классификации принятого сигнала (ЛЧМ, ФКМ или простой) в УАО и разработана математическая модель процесса обработки в устройстве автокорреляционной обработки.

2. Разработан алгоритм классификации сигнала (простой, ЛЧМ- и ФКМ-сигнал) в УАО (патент РФ № 2683791).

3. На основе разработанной математической модели получены зависимости вероятности верной классификации простых и сложных сигналов от ОСШ. На основе полученных данных обоснованы параметры (полосы пропускания низкочастотных и полосовых фильтров, времени задержки в корреляторе, соотношения длительностей окна БПФ и обрабатываемого сигнала, соотношения полосы пропускания входного полосового фильтра и ширины спектра ЛЧМ-сигнала) разработанного алгоритма. В результате сравнения зависимостей вероятности верной классификации простых, ЛЧМ- и ФКМ-сигналов от ОСШ показано, что наибольшая вероятность верной классификации при равных условиях достигается для ЛЧМ-сигнала.

4. Предложен алгоритм классификации сигнала с уточнением вида кодовой последовательности ФКМ-сигнала в УАО (патент РФ № 2716017). Выполнено исследование особенностей обработки ФКМ-сигналов с законами чередования фаз по кодам Баркера и Фрэнка. Показано, что при классификации ФКМ-сигналов с кодами Фрэнка с увеличением количества элементов кода требуется большее значение ОСШ по сравнению со случаем классификации ФКМ-сигналов с кодами Баркера.

5. Выполнено исследование математической модели процесса обработки в УАО на записях сигналов. Показано, что для классификации сигнала при обработке записанного сигнала требуется значение ОСШ на 0,1...3 дБ больше, чем при обработке имитационного сигнала.

6. Разработаны рекомендации по практической реализации УАО: оценка ресурсов, требуемых для реализации алгоритма в устройстве обработки сигналов на основе ПЛИС; оценка вычислительной сложности алгоритма классификации сигналов с автокорреляционной обработкой; предложения по использованию алгоритма в устройстве цифровой обработки средства радиомониторинга совместно со сканирующим приемником при реализации поискового метода частотного анализа, а также совместно с многоканальным или матричным приемником при реализации беспойскового метода.

7. Показано, что, по сравнению с аналогами, разработанный алгоритм позволяет в режиме времени, близком к реальному, определять один из видов сигнала (простой, ЛЧМ- или ФКМ-сигнал), а для обеспечения вероятностей $P_{D0} = 0,99$ и $P_{F0} = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ требуется входное ОСШ на величину до 10 дБ меньше.

В приложении А представлены копии патентов. В приложении Б представлены копии актов внедрения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Лихачев, В. П. Характеристики обнаружения линейно-частотно-модулированных, фазо-кодо-манипулированных и простых радиоимпульсов в автокорреляционном приемнике / В. П. Лихачев, А. А. Веселков, Н. Нгуен Чонг // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 71-76.

2. Нгуен Чонг Н. Математическая модель алгоритма распознавания вида сигнала в автокорреляционном приемнике средств радиотехнического мониторинга / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев, И. Е. Леонов // Труды МАИ. – 2020. – № 113.

3. Нгуен Чонг Н. Исследование отношения сигнал-шум, необходимого для идентификации фазоманипулированных сигналов в автокорреляционном приемнике радиотехнического мониторинга / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев, Х. Н. Чан // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. – 2021. – №4(125). – С. 103-107.

4. Нгуен Чонг Н. Распознавание сигналов в автокорреляционном приемнике радиотехнического мониторинга / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев // Вестник связи. – 2022. – № 5. – С. 36-40.

5. Нгуен Чонг Н. Экспериментальная проверка алгоритма распознавания типа сигнала в автокорреляционном приемнике / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 80. – С. 46-52.

Охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности

6. Пат. 2683791 РФ, МПК G01S 7/40. Способ определения видов радиолокационных сигналов в автокорреляционном приемнике: № 2018112916: заявл. 09.04.2018: опубл. 02.04.2019 / Лихачев В. П., Веселков А. А., Нгуен Чонг Н. – 10 с.

7. Пат. 2716017 РФ, МПК G01S 13/32. Способ определения видов радиолокационных сигналов в автокорреляционном приемнике: № 2019126538: заявл. 21.08.2019: опубл. 05.03.2020 / Нгуен Чонг Н., Лихачев В. П., Веселков А. А. – 10 с.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

8. Likhachev, V. P. Study of the Accuracy of Determining the Location of Radio Emission Sources with Complex Signals when Using Autocorrelation and Matrix Receivers in Broadband Tools for Analyzing the Electronic Environment / V. P. Likhachev, A. S. Podstrigaev, N. Nguyen Trong, V. V. Davydov, N. S. Myazin // Lecture Notes in Computer Science (NEW2AN and ruSMART 2020). – 2020. – V. 12525. – P. 326-333.

9. Nguyen Trong N. Study of Detection Characteristics in Recognition of Simple Radio Pulses and Signals with LFM and PSK in the Autocorrelation Receiver / N. Nguyen Trong, A. S. Podstrigaev, V. P. Likhachev, A. A. Veselkov, V. V. Davydov, N. S. Myazin, S. S. Makeev // Lecture Notes in Computer Science (NEW2AN and ruSMART 2020). – 2020. – V. 12525. – P. 415-423.

10. Nguyen Trong N. A Mathematical Model for Determining the Type of Signal Modulation in a Digital Receiver with Autocorrelation Processing / N. Nguyen Trong, A. S. Podstrigaev, T. H. Nghi // 2021 IEEE ElConRus. – 2021. – P. 1650-1654.

11. Nguyen Trong N. Estimation of the Computational Complexity of the Algorithm for Determining the Type of Signal Modulation in the Autocorrelation Receiver / N. Nguyen Trong, A. S. Podstrigaev, T. H. Nghi // 2021 IEEE ElConRus. – 2021. – P. 1655-1658.

Прочие публикации

12. Лихачев, В. П. Оценка влияния времени задержки на характеристики обнаружения радиолокационных сигналов в автокорреляционном приемнике / В. П. Лихачев, А. А. Веселков, Нгуен Чонг Н. // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: Издательский дом ВГУ. – 2019. – С. 309-314.

13. Нгуен Чонг Н. Оценка влияния соотношения длительности окна быстрого преобразования Фурье и длительности импульса на характеристики обнаружения простых радиоимпульсов в автокорреляционном приемнике / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2021». Том 2. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА. – 2022. – С 119-124.

14. Нгуен Чонг Н. // Оценка влияния количества элементов кода в кодовой последовательности двоичного фазоманипулированного сигнала на характеристики обнаружения автокорреляционного приемника радиотехнического мониторинга / Н. Нгуен Чонг, А. С. Подстригаев // Сборник трудов XIX Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». М.: Мир науки. – 2021. – С 46-49.

15. Подстригаев, А. С. Сравнительный анализ методов обработки сигналов в полосе промежуточных частот средств радиомониторинга / А. С. Подстригаев, Н. Нгуен Чонг, А. В. Смоляков, И. В. Логинов // Морская радиоэлектроника. – 2022. – № 2 (80). – С. 18-22.