

На правах рукописи



Лукиянов Александр Сергеевич

**РАДИОФОТОННЫЕ УСТРОЙСТВА ЗАДЕРЖКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛНОТЫ ДАННЫХ РАДИОМОНИТОРИНГА
В СЛОЖНОЙ СИГНАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКЕ**

Специальность 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

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, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных средств СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Официальные оппоненты:

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

Токарев Антон Борисович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры радиотехники, г. Воронеж

Ведущая организация:

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, г. Воронеж

Защита состоится «12» ноября 2025 года в 14-00 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 «10» сентября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.387.01
кандидат технических наук, доцент



М. Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для повышения полноты данных о сигнальной обстановке в состав беспойскового по частоте комплекса радиомониторинга входят две системы: радиотехнического обзора (СРТО) и фазового пеленгования (СФП). СРТО принимает сигналы в широкой мгновенной полосе частот без поиска по частоте. Узкополосная СФП последовательно перестраивается на частоты, выбранные СРТО в качестве приоритетных, дополняет и уточняет параметры сигналов, прежде всего, пеленг.

Для реализации СРТО широко используются схемы на основе матричного приемника [Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х., 2017]. Он выполняет беспойсковое обнаружение сигнала во множестве частотных каналов с последующим переносом по частоте и обработкой в узкой полосе промежуточных частот. Однако, при одновременной работе большого числа источников радиоизлучения (ИРИ) из-за широкой мгновенной полосы приема для СРТО формируется сложная сигнальная обстановка (ССО), которая, в первую очередь, характеризуется высокой вероятностью наложения во времени импульсов из импульсных потоков от различных ИРИ. Ввиду ограниченной пропускной способности при обработке наложенных во времени импульсов в СРТО на основе матричного приемника, наложенные импульсы, обнаруженные позже, исключаются из обработки.

Другим атрибутом ССО являются сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Если за время определения параметров в СРТО и перестройки СФП рабочая частота сигнала существенно изменится, то ИРИ не будет запеленгован с помощью СФП. Это приводит к пропуску сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Рассмотренные негативные эффекты в СРТО и СФП при работе в ССО снижают долю принимаемых комплексом радиомониторинга импульсов, которая принята за показатель полноты данных радиомониторинга. Однако, повышение полноты данных может быть выполнено на основе двух устройств задержки: в СРТО – с адаптивной подстройкой времени задержки в зависимости от длительности принимаемого импульса и продолжительности наложения по времени; в СФП – с фиксированной задержкой для хранения импульса на время перестройки СФП на новую частоту пеленгования. Особенностью данных устройств являются противоречивые требования к широкому диапазону рабочих частот, малым габаритным размерам, низкому затуханию и (для регулируемого устройства) широкому диапазону задержки.

Эти требования могут быть выполнены при реализации устройств задержки на основе элементов радиофотоники, т.е. с переносом СВЧ-сигнала в оптический диапазон и обратно. Однако, для устройства с регулируемой задержкой требуется разработка схемы и методики проектирования. Необходимо также исследовать влияние вносимых устройством шумов на ограничение динамического диапазона СРТО. Точность пеленгования СФП с оптоволоконным трактом будет существенно зависеть от изменения температуры окружающей среды. Для поддержания присущей фазовому методу высокой точности пеленгования требуется проведение периодической калибровки СФП. Поэтому при введении в СФП

устройства с фиксированной задержкой требуется исследовать влияние динамических температурных воздействий на требуемый период фазовой калибровки СФП и долю теряемой при калибровке полезной информации.

Степень разработанности темы. Вопросам совершенствования радиоэлектронных комплексов на основе внедрения средств радиофотоники посвящены работы М. Е. Белкина, С. А. Куджа, А. С. Сигова, В. Н. Цуканова, М. Я. Яковлева, Р. П. Быстрова, С. А. Соколова, В. А. Черепенина, Д. С. Чирова, Ю. А. Кочеткова, А. В. Шамрай, А. П. Лаврова, С. И. Иванова, В. Д. Купцова, А. А. Семенова, А. А. Никитина, V. J. Urick, J. D. McKinney, K. J. Williams, J. Yao, J. Carmany, D. Novak, J. M. Liu, W. S. C. Chang, T. Berceli, P. R. Herczfeld и др. Повышению эффективности анализа сигналов в условиях сложной сигнальной обстановки посвящены работы В. И. Тихонова, Е. И. Куликова, А. П. Трифонова, Б. Р. Левина, Ю. М. Перунова, А. И. Куприянова, В. Г. Радзиевского, П. А. Трифонова, С. В. Дворникова, А. Б. Токарева, Э. А. Кирсанова, А. А. Сироты, В. П. Лихачева, А. С. Подстригаева, С. W. Helstrom, P. J. Huber, P. Swerling, J. V. Y. Tsui, R. V. Sanderson, H. Sun и др.

Научной задачей является разработка и исследование радиофотонных устройств задержки для СРТО и СФП комплекса радиомониторинга, а также оценка повышения доли импульсов, принимаемых в ССО.

Цель диссертационной работы – повышение полноты данных радиомониторинга в сложной сигнальной обстановке за счет использования разрабатываемых устройств задержки.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Разработана методика оценки доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в условиях ССО. Обоснованы технические требования к устройствам задержки для СРТО и СФП.

2. Разработаны методика проектирования и алгоритм работы устройства с регулируемой задержкой для СРТО. Разработан ключевой узел этого устройства – регулируемая линия задержки. Обосновано использование структурной схемы устройства с фиксированной задержкой для СФП.

3. Экспериментально исследованы основные характеристики макетов устройств с регулируемой и фиксированной задержкой.

4. Получена оценка увеличения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в условиях ССО при использовании устройств задержки. Разработаны рекомендации по реализации и применению устройств задержки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Методика оценки доли импульсов, разработанная для оценки полноты данных, принимаемых в сложной сигнальной обстановке комплексом радиомониторинга, состоящем из СРТО и СФП, отличается одновременным учетом доли пеленгуемых импульсов в СФП и вероятностей следующих событий: наложение импульсов во времени в СРТО; прием импульсов между калибровками в СФП; энергетическое обнаружение сигнала в СРТО.

2. Впервые исследовано влияние динамических температурных воздействий на точность пеленгования комплекса радиомониторинга при использова-

нии радиофотонного устройства с фиксированной задержкой в составе СФП. На основе экспериментально измеренных временных зависимостей скорости изменения разности группового времени задержки между каналами впервые обоснованы: период калибровки, обеспечивающий точность пеленгования не хуже заданной; доля полезной информации, теряемой за время калибровки.

3. Разработанная методика проектирования устройств с регулируемой задержкой для СРТО комплекса радиомониторинга отличается использованием разработанной схемы (патент РФ № 2716283), учетом параметров принимаемых сигналов (диапазоны несущих частот и длительностей задерживаемых импульсов), параметров используемого матричного приемника (максимально допустимое число одновременно обрабатываемых импульсов, число каналов в первой ступени матричного приемника, минимально допустимое ОСШ на входе приемника) и требований к обработке (диапазон и дискретность вносимой задержки, максимально допустимый шум-фактор).

4. Оценка повышения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в сложной сигнальной обстановке, выполнена по разработанной методике с учетом экспериментально обоснованных данных: периода калибровки СФП и максимально допустимого числа наложенных на входе СРТО импульсов.

Теоретическая ценность результатов заключается в развитии научно-методических основ проектирования комплексов радиомониторинга и оценки эффективности их работы в сложной сигнальной обстановке.

Практическая значимость результатов определяется повышением полноты данных о сигнальной обстановке, формируемых комплексами радиомониторинга в ССО.

Методология и методы исследований. Использовались методы теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики и программирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика позволяет оценить влияние параметров устройств задержки на долю импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга, включающим в себя системы радиотехнического обзора и фазового пеленгования, в условиях сложной сигнальной обстановки, которая характеризуется высокой вероятностью наложения во времени импульсов и наличием сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

2. Радиофотонное устройство с фиксированной задержкой при использовании в системе фазового пеленгования комплекса радиомониторинга позволяет обеспечить пеленгование сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при несущей частоте сигнала 18 ГГц, базе пеленгования 2, систематической ошибке пеленгования не более 5° и доле полезной информации, теряемой за время калибровки системы фазового пеленгования, не более $\sim 5 \cdot 10^{-6}$.

3. Разработанная методика проектирования устройства с регулируемой задержкой для системы радиотехнического обзора комплекса радиомониторинга позволила **обосновать** число каналов устройства, отрезков оптоволокна в каж-

дом канале и циклов задержки на каждом отрезке, длину этих отрезков, шум-фактор устройства и минимально требуемое входное ОСШ, **разработать** алгоритм внесения задержки, адаптивной к априорно неизвестной длительности импульса, и **оценить** сужение динамического диапазона системы радиотехнического обзора, которое для типового случая составляет не более 10 дБ.

4. Разработанные устройства задержки для систем радиотехнического обзора и фазового пеленгования на величину до 30% повышают долю принимаемых комплексом радиомониторинга импульсов в сложной сигнальной обстановке, образованной несколькими сотнями источников радиоизлучения со скважностью сигналов 10 и более, при входном отношении сигнал-шум не менее 23 дБ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность теоретических расчетов и сформулированных на их основе выводов обеспечивается корректным использованием математического аппарата и программного обеспечения. Все эксперименты проведены с использованием поверенной измерительной аппаратуры. Полученные 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).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы рассматривались и обсуждались на 9 конференциях: International Conference «Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019» (ЕТАСР-2019), (СПб, 2019); V Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019), (Самара, 2019); 6th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2019»: Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures» (СПб, 2019); The 20th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems NEW2AN (СПб, 2020); 2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (СПб, 2023); XIX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, 2021); XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (СПб, 2022); III научно-техническая конференция СПб: «Научно-технические проблемы ... технологий» (СПб, 2019); V научно-техническая конференция «Научные, инженерные и производственные проблемы ...» (СПб, 2024).

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 «Конкурса грантов ... для аспирантов вузов ... Санкт-Петербурга» (2023 г.)

Личный вклад автора заключается в участии в разработке алгоритмов, структурных схем и научно-методического аппарата. Экспериментальные данные получены автором лично.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 16 научных работ: 5 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ по специальности 2.2.16; 1 патент на изобретение; 10 работ в сборниках материалов конференций и других

научных изданиях, из которых 5 публикаций индексируются в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и двух приложений. Основная часть работы изложена на 120 страницах, содержит 37 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы включает 149 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе сформулированы цель и задачи исследования, разработана методика оценки эффективности комплекса радиомониторинга в ССО, обоснованы технические требования к устройствам задержки.

Показателем эффективности комплекса радиомониторинга в ССО может служить количественная оценка доли принимаемых импульсов $P_{\text{П}}$. Благодаря широкой мгновенной частотной полосе обнаружения и приемлемой чувствительности в СРТО используется матричный приемник, а ввиду относительной простоты и высокой чувствительности в СФП используется супергетеродинный приемник. Принимая во внимание эти особенности реализации комплекса радиомониторинга, разработана методика оценки $P_{\text{П}}$:

1. Определение вероятности наложения во времени $M \leq M_{\text{max } i}$ импульсов ($M_{\text{max } i}$ – максимально допустимое количество наложенных на входе импульсов, где без использования устройства задержки в СРТО $i=0$, а при его

использовании $i=1$) на входе СРТО $P_{F\text{max}} = \sum_{M=0}^{M_{\text{max } i}} C_N^M 1/S^M (1-1/S)^{N-M}$, где C_N^M – биномиальные коэффициенты для наложения M импульсов от N однотипных ИРИ, S – скважность импульсов ИРИ.

2. Определение доли импульсов, пеленгуемых СФП после получения целеуказания от СРТО $P_{\text{пел}} = ((T_{\text{набл}} - \tau_{\text{СРТО}})/T_{\text{и}})/(T_{\text{набл}}/T_{\text{и}})$, T_n – период повторения импульса, $\tau_{\text{СРТО}}$ – время, затрачиваемое на определение параметров импульса в СРТО, передачу данных в СФП и перестройку гетеродинов СФП на требуемую частоту пеленгования.

3. Расчет вероятности приема импульсов в период, когда СФП находится в рабочем состоянии между калибровками $P_{\text{раб}}(T_{\text{набл}}) = 1 - (1 - K_{\text{пер}} \exp(-T_{\text{набл}}/T_0))$, где T_0 – среднее время, в течение которого совпадают длительность принимаемого импульса и длительность калибровки.

4. Определение вероятности энергетического обнаружения импульса $P_{\text{ЭО}}$ в СРТО: $P_{\text{ЭО}}(q) = 1 - \Phi(z_0 - 2T_{\text{и}}W_s - q / 2\sqrt{T_{\text{и}}W_s + q})$, где

$\Phi(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_0^x \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл вероятностей, z_0 – нормированный

порог обнаружения, $T_{\text{и}}$ – время интегрирования, W_s – полоса частот, $q = 2E/N_0$ – отношение сигнал-шум (E – энергия сигнала, а N_0 – спектральная плотность мощности шума) [Борисов В.И., 2000]. Для требуемой вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ0}}$ при использовании критерия Неймана-Пирсона $h_{\text{п}} = \sqrt{2N_{\text{обн}}} \Phi^{-1}(1 - P_{\text{ЛТ0}}) + N_{\text{обн}}$ [Tsui J.B.Y., 2010].

5. Оценивание доли принимаемых комплексом радиомониторинга импульсов $P_{\text{ПИ}} = P_{F\text{max}} P_{\text{пел}} P_{\text{раб}} P_{\text{ЭО}}$.

В результате расчетов по представленной методике показано, что доля принимаемых импульсов $P_{\text{ПИ}} \geq 0,9$ при параметрах ИРИ $S = 10 \dots 50$ и $q \geq 23$ дБ обеспечивается для $N \leq 4 \dots 22$. Это часто не удовлетворяет требованиям реальной обстановки, где участвует большее количество ИРИ N и, соответственно, $P_{\text{ПИ}} \ll 0,9$.

Доля принимаемых импульсов $P_{\text{ПИ}}$ уменьшается в ССО по следующим причинам: 1) превышение максимально допустимого количества наложенных на входе СРТО импульсов; 2) отсутствие возможности пеленгования ИРИ с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, если длительность входного импульса не превышает длительность перестройки гетеродинов в СФП на требуемую частоту анализа $\tau_{\text{пер}}$. Для снижения указанных негативных эффектов предложено внедрить устройства с регулируемой и фиксированной задержкой в СРТО и СФП комплекса радиомониторинга соответственно (рис. 1).

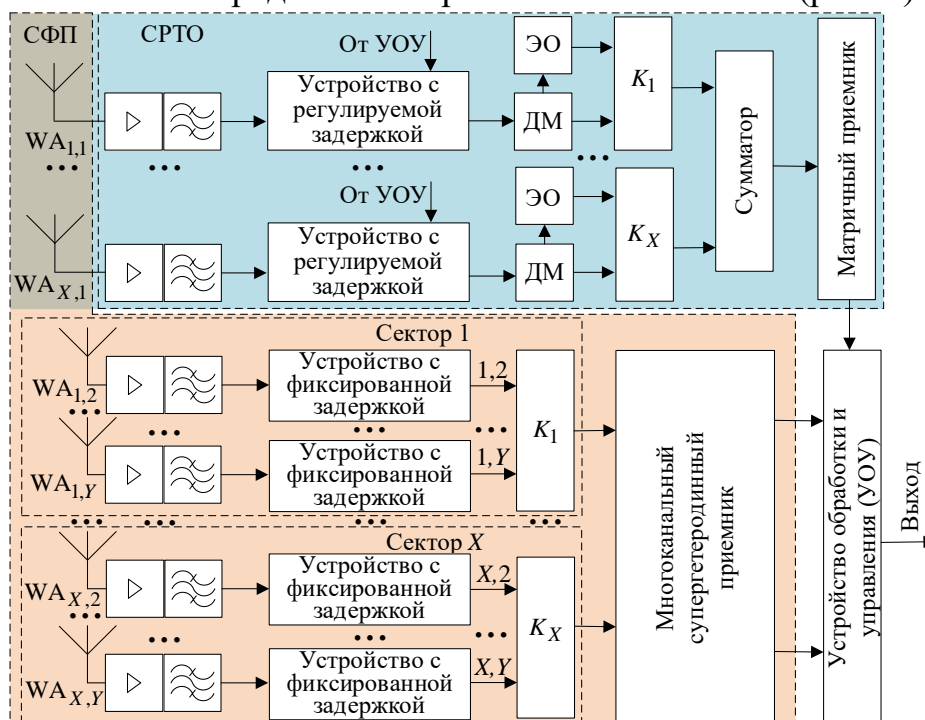


Рисунок 1 – Структурная схема модернизированного комплекса радиомониторинга

СРТО обнаруживает сигналы в X секторах, что обеспечивает круговой обзор пространства. В каждом секторе используется свой канал СРТО, состоящий из антенны $WA_{x,1}$ ($x = \overline{1, X}$), малошумящего усилителя, полосового фильтра, устройства с регулируемой задержкой (управляемого устройством обработки и

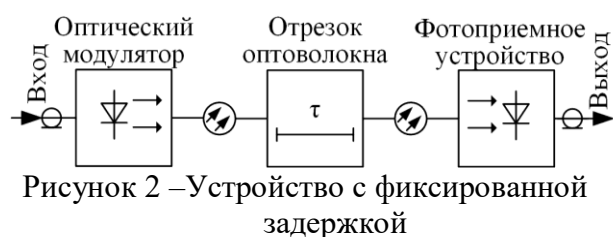
управления (УОУ)), делителя мощности (ДМ), энергетического обнаружителя (ЭО) и коммутатора K_x . Все каналы через сумматор подключены ко входу матричного приемника. В отсутствие сигналов каналы закрыты. При превышении заданного порога в ЭО канал коммутируется к матричному приемнику, а затем выделенный и преобразованный в нем по частоте сигнал поступает в УОУ. Если число наложенных во времени обнаруженных импульсов превышает допустимое для матричного приемника значение, то импульсы, обнаруженные позже, задерживаются, пока матричный приемник не освободится. СФП также работает в X секторах, в каждом из которых используется Y каналов пеленгования. Сигнал поступает на антенны $WA_{1,1} \dots WA_{1,Y}$ (сектор 1) ... $WA_{X,1} \dots WA_{X,Y}$ (сектор X). Коммутация осуществляется так, что одновременно принимается сигнал только с антенн того сектора, в котором необходимо выполнить пеленгование обнаруженного в СРТО сигнала. С выхода каждой антенны сигнал проходит через малошумящий усилитель, полосовой фильтр, устройство с фиксированной задержкой и коммутатор $K_x (x = \overline{1, X})$. Сигнал со всех каналов поступает в многоканальный супергетеродинный приемник, а затем в устройство обработки и управления. Устройство с фиксированной задержкой сохраняет сигнал на время $\tau_{\text{пер}}$.

Поступление в матричный приемник наложенных во времени импульсов приводит к перепутыванию их частот и, соответственно, аномальным ошибкам измерения. Использование устройства с регулируемой задержкой обеспечивает возможность хранения новых импульсов до завершения обработки текущего. Это исключает перепутывания и тем самым повышает пропускную способность матричного приемника без необходимости существенной доработки.

Исходя из разработанной схемы сформулированы требования к устройству с регулируемой задержкой (несущая частота и длительность задерживаемых импульсов, максимально допустимое число одновременно обрабатываемых импульсов, диапазон и дискретность вносимой задержки, максимально допустимый шум-фактор) и к устройству с фиксированной задержкой (обеспечение заданной систематической ошибки пеленгования при ограничении на долю полезной информации, теряемой при калибровке).

Во второй главе рассмотрены структурные схемы и алгоритмы работы устройств задержки. Разработана методика проектирования устройства с регулируемой задержкой.

Для задержки входного импульса на время $\tau_{\text{пер}}$ используется устройство



с фиксированной задержкой (рис. 2). Принцип работы: оптический модулятор и фотоприемное устройство служат для преобразования СВЧ-сигнала на оптическую несущую и последующего выделения СВЧ-сигнала после прохождения отрезка оптоволоконна, длина которого опре-

деляется как $l_{\text{опт}} = c\tau_{\text{пер}}/n_{\text{п}}$, где c – скорость света в вакууме, $n_{\text{п}}$ – показатель

преломления сердцевины оптоволокна. На рис. 3 приведена структурная схема N -канального устройства с регулируемой задержкой (для примера $N = 2$), установленного на входе матричного приемника [Подстригаев А.С., 2021].



Рисунок 3 – Устройство с регулируемой задержкой

Нижний по схеме канал обеспечивает прямое прохождение импульса на вход приемника без задержки, верхний – адаптивную подстройку времени задержки в зависимости от требуемой задержки и длительности принимаемого импульса. Подстройка достигается за счет внедрения разработанной регулируемой линии задержки. Фиксированная линия задержки аналогична устройству, представленному на рис. 2 и служит для компенсации временных затрат на обнаружение импульса, прохождение команд управления и переключение ключей.

Исходя из требований к адаптивности перестройки времени задержки, широкой полосе пропускания и небольшим габаритам, разработана структурная схема регулируемой линии задержки (патент РФ № 2716283; рис. 4).

Исходя из требований к адаптивности перестройки времени задержки, широкой полосе пропускания и небольшим габаритам, разработана структурная схема регулируемой линии задержки (патент РФ № 2716283; рис. 4).

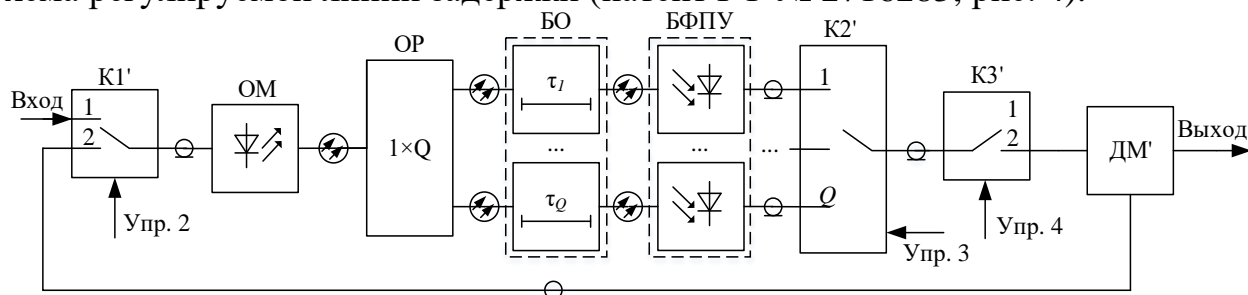


Рисунок 4 – Структурная схема регулируемой линии задержки

Регулируемая линия задержки работает следующим образом. Оптический модулятор $ОМ$ переносит входной импульс на оптическую несущую и через оптический разветвитель $ОР$ размерностью $1 \times Q$, подает сигнал в банк отрезков оптоволокна $БО$ разной длины. Банк фотоприемных устройств $БФПУ$ необходим для обратного переноса импульса в СВЧ-диапазон. В зависимости от требуемой длительности задержки импульса коммутируется вход коммутатора $К2'$. При необходимости, с помощью делителя мощности $ДМ'$, можно подать выходной импульс на вход регулируемой линии задержки для повторного прохождения цикла задержки. Коммутаторы $К1'$ и $К3'$ управляют преобразованием импульса.

В зависимости от условий работы комплекса радиомониторинга, требований к количеству одновременно принимаемых импульсов и отношению сигнал-шум структура, состав и параметры устройства с регулируемой задержкой могут существенно отличаться. Поэтому разработана методика проектирования устройства с регулируемой задержкой, включающая следующие этапы:

1. Расчет числа каналов устройства $N_{урз} : M_{\max i} \leq N_{урз} \leq N_{МП1} + 1$, где $N_{МП1}$ – число каналов в первой ступени матричного приемника.

2. Предварительный выбор компонентов устройства с регулируемой задержкой, необходимого для последующего расчета шум-фактора.

3. Выбор длин отрезков оптоволокон в регулируемой линии задержки, обеспечивающих наименьшую и наибольшую задержку входных импульсов.

Подход №1: длина самого короткого отрезка оптоволокон l_{\min} определяется исходя из минимальной длительности задерживаемого импульса τ_{\min} : $l_{\min} = k_{\text{зап}} c \tau_{\min} / n_{\text{П}}$, где $k_{\text{зап}} = 1, 1, \dots, 1, 5$ – коэффициент запаса, c – скорость света в вакууме, $n_{\text{П}}$ – показатель преломления сердцевины оптоволокон; самый длинный отрезок оптоволокон l_{\max} должен задерживать импульс, длительность которого с запасом $k_{\text{зап}}$ соответствует максимальной длительности задерживаемого импульса τ_{\max} : $l_{\max} = k_{\text{зап}} c \tau_{\max} / n_{\text{П}}$.

Подход №2: $l_{\min} = k_{\text{зап}} c \tau_{\max} / n_{\text{П}}$, $l_{\max} > k_{\text{зап}} c \tau_{\max} / n_{\text{П}}$.

4. Выбор количества и длин промежуточных отрезков оптоволокон в регулируемой линии задержки ($l_{\min} < l_j < l_{\max}$), необходимых для дополнительной дискретности изменения задержки τ_{dj} : $l_j = c \tau_{dj} / n_{\text{П}}$, где $j = \overline{1, (N_0 - 2)}$, N_0 – общее количество отрезков оптоволокон. В регулируемой линии задержки значения τ_{dj} выбираются так, чтобы их длины образовывали ряд взаимно простых чисел.

5. Определение единичной задержки на каждом отрезке оптоволокон. Задержка на l_{\min} и l_{\max} определяется как $\tau_{z\min} = l_{\min} n_{\text{П}} / c$ и $\tau_{z\max} = l_{\max} n_{\text{П}} / c$ соответственно. Составляется массив единичной задержки на каждом p -м отрезке оптоволокон $\{\tau_{zp}\}$, где ($p = \overline{1, N_0}$).

6. Определение необходимого количества циклов задержки N_{zk} , для задержки k -го принимаемого импульса на требуемое время $\tau_{\text{Тр}}$:

Система неравенств отражает следующие требования: а) для исключения потери фрагмента полезного сигнала величина задержки τ_{zp} , вносимая при прохождении k -го импульса через p -й отрезок оптоволокон, не должна быть меньше длительности этого импульса $\tau_{ик}$; б) суммарная задержка k -го импульса при прохождении через p -е отрезки оптоволокон не должна быть меньше требуемого значения $\tau_{\text{Тр}k}$; в) превышение суммарной задержки k -го импульса над требуемым значением $\tau_{\text{Тр}k}$ должно быть минимальным; г) количество циклов задержки N_{zk} должно быть минимальным, для чего выбирается наименьшее количество отрезков оптоволокон, обеспечивающее $\tau_{\text{Тр}k}$; д) шум-фактор $F_{\text{УРЗ}}(f_k, N_{zk})$ на несущей частоте k -го принятого импульса f_k после прохождения N_{zk} циклов задержки не дол-

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{zp} \geq \tau_{ик}; \\ N_{zk} \sum_{p=1}^{N_{zk}} \tau_{zp} \geq \tau_{\text{Тр}k}; \\ N_{zk} \sum_{p=1}^{N_{zk}} \tau_{zp} - \tau_{\text{Тр}k} \rightarrow \min; \\ N_0 \sum_{j=1}^{N_0} N_{zk} \rightarrow \min; \\ F_{\text{УРЗ}}(f_k, N_{zk}) \leq F_{\text{УРЗд}}. \end{array} \right.$$

жен превышать $F_{УРЗд}$. Шум-фактор определяется с учетом числа звеньев в радиодифотонном тракте УРЗ $N_{зв}$ и числа циклов задержки $N_{зк}$:

$$F_{УРЗ} = F_1 + N_{зв} N_{зк} \sum_{j=2} F_j - 1 / \prod_{i=1}^{j-1} K_i,$$

где F_j – шум-фактор j -го звена тракта, K_i – коэффициент передачи i -го звена тракта.

7. Оценка максимального шум-фактора, соответствующего использованию наибольшего числа циклов задержки $F_{УРЗmax} = F_{УРЗ}(f_k, N_{зк} = N_{зmax})$, где $N_{зк} = N_{зmax} = \lceil \tau_{трmax} / \tau_{зmax} \rceil$, $\tau_{трmax}$ – максимальная требуемая задержка.

8. Оптимизация тракта путем подбора компонентов, исходя из пп. 1–7.

9. Определение минимально требуемого отношения сигнал-шум на входе устройства с регулируемой задержкой с учетом максимального шум-фактора: $q_{УРЗmin} = q_{МПmin} F_{УРЗmax}$, где $q_{МПmin}$ – минимально допустимое ОСШ на входе матричного приемника.

Разработан алгоритм работы устройства с регулируемой задержкой, отвечающий требованиям рассмотренной методики (рис. 5, а). Алгоритм проверяет количество каналов приемника, в которых зафиксировано обнаружение $N_{обнi}$ сигналов. Если $N_{обнi} > 1$, а регулируемая линия задержки не содержит ранее записанного импульса, то: включается счетчик длительности импульса $t_{и}$, и выполняется алгоритм выбора наиболее близкого к длительности импульса отрезка оптоволокну (рис. 5, б); открывается ключ К1, записывается номер канала $i_{обн}$, в котором обнаружение произошло последним; выполняется установка $turn_on = 1$; проверка на завершение импульса в канале $i_{обн}$ и превышение времени задержки t_{max} в регулируемой линии задержки. Если импульс завершился или его длительность превысила t_{max} , то выполняется переход к части алгоритма «1», выключается $t_{и}$, ключ К1 размыкается. Проверяется приемник на предмет возможности обработки задержанного сигнала, для чего анализируются сигналы $i_{обн}$. Если они отсутствуют – приемник свободен. Иначе выполняется алгоритм цикла задержки импульса (рис. 5, в) и проверяется доступность приемника. Если доступен – задержанный сигнал подается на обработку через К2. Включается счетчик длительности записанного импульса $t_{зап}$. Проверяется, не превысила ли длительность записанного импульса $t_{зап}$ ранее измеренную величину длительности импульса $t_{и}$. Пока $t_{зап} < t_{и}$ инкрементируется $t_{зап}$.

Для минимизации избыточной задержки импульса разработан алгоритм для P отрезков оптоволокну (рис. 5, б). В начале устанавливается $p = 1$ ($p = \overline{1, P}$). Затем сравнивается длительность принимаемого импульса с временем задержки текущего p -го отрезка оптоволокну. Когда для p -го отрезка условие $t_{и} < t_{рлзp}$ не выполняется, то же сравнение производится для следующего по длине $(p+1)$ -го отрезка оптоволокну и так до последнего P -го отрезка. Параллельно происходит

инкрементация $t_{и}$. Если $t_{и}$ равна времени задержки в самом длинном P -м отрезке оптоволоконна, то выполняется установка переменной $t_{\max} = 1$.

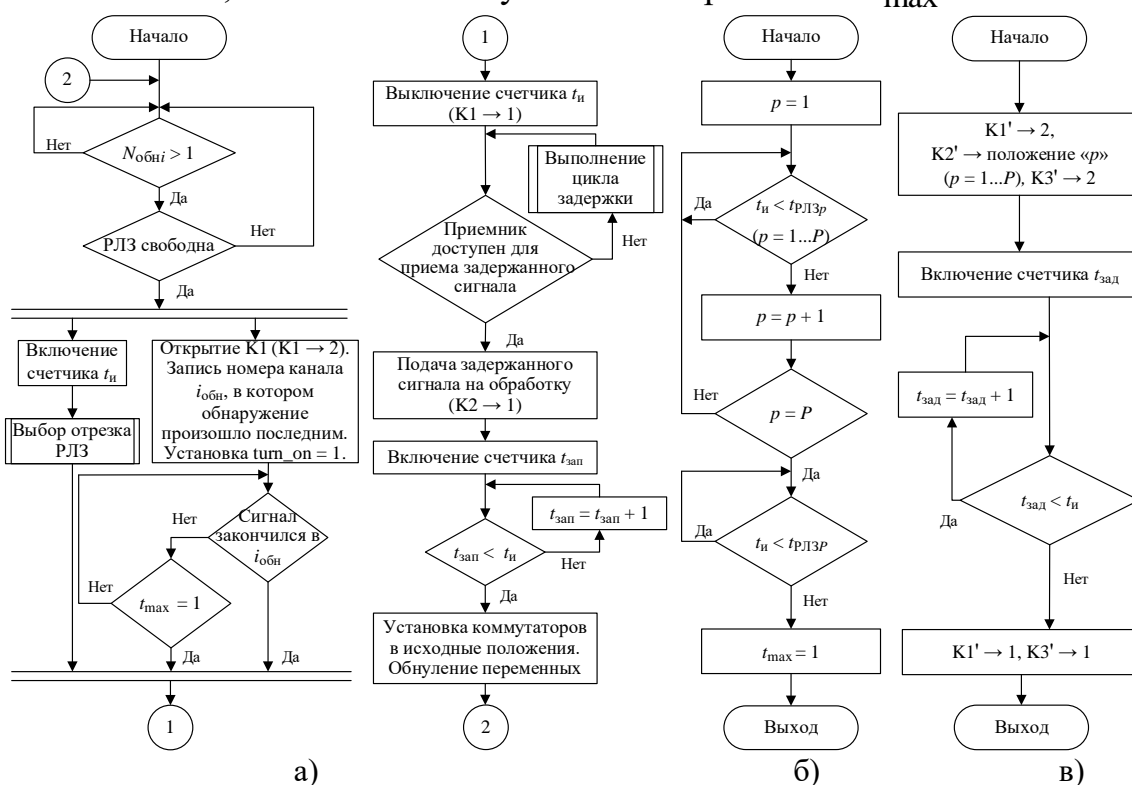


Рисунок 5 – Алгоритмы: а) работы устройства задержки; б) выбора отрезка оптоволоконна; в) выполнения цикла задержки

Задержка принятого импульса до тех пор, пока матричный приемник не освободится для его приема, обеспечивается алгоритмом, приведенным на рисунке 5, в. Вначале коммутаторы $K1'$, $K2'$ и $K3'$ (рис. 4) устанавливаются в положения, соответствующие подключению выбранного в предыдущем алгоритме p -го отрезка оптоволоконна ко входу регулируемой линии задержки. Далее включается счетчик времени задержки $t_{\text{зад}}$, значение которого сравнивается с длительностью принятого импульса $t_{и}$. После того, как значения $t_{\text{зад}}$ и $t_{и}$ сравниваются, выполняется установка коммутаторов $K1'$, $K3'$ в исходные значения.

В третьей главе разработаны и исследованы макеты устройств с фиксированной и регулируемой задержкой.

При использовании в СФП устройства с фиксированной задержкой ввиду протяженности оптоволоконного тракта существенно увеличивается негативное влияние динамических температурных воздействий на точность пеленгования. Чтобы оценить необходимый период калибровки, компенсирующий нарастающую ошибку пеленгования, в климатической камере исследован двухканальный интерферометр с макетом устройства задержки в каждом канале. Макет состоит из оптического модулятора, оптоволоконного кабеля длиной 60 м и фотоприемного устройства. Максимально допустимый период калибровки интерферометра составляет $T_{\text{кал max}} = \tilde{D}(1 - \cos \alpha_{\text{ош max}}) / f \Delta \tau'_{\text{гр max}}$, где $\tilde{D} = D/\lambda$ – база пеленгования (D – расстояние между антеннами интерферометра, λ – длина волны при-

нимаемого сигнала), $\alpha_{\text{ош max}}$ – допустимая систематическая ошибка пеленгования, f – несущая частота принимаемого сигнала, $\Delta\tau'_{\text{гр max}}$ – максимальная по модулю скорость изменения разности группового времени задержки между каналами макета.

На макете получены временные зависимости скорости изменения разности группового времени задержки $\Delta\tau'_{\text{гр}}(t)$ между каналами интерферометра при скачкообразном охлаждении от 26 °С до минус 20 °С и скачкообразном нагреве от 26 °С до 50 °С (рис. 6). Колебания кривых вызваны регулированием температуры при работе климатической камеры. Экспериментально обоснована величина $\Delta\tau'_{\text{гр max}} = 0,43$ пс/с.

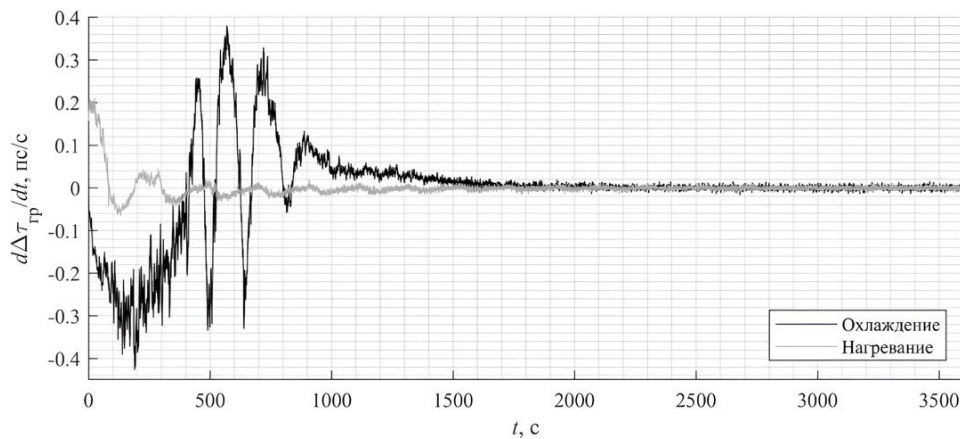


Рисунок 6 – Зависимости $\Delta\tau'_{\text{гр}}(t)$ при охлаждении и нагреве

С учетом $\Delta\tau'_{\text{гр max}}$ получена зависимость $T_{\text{кал max}}(\alpha_{\text{ош max}})$ для $f = 18$ ГГц при базе пеленгования $\tilde{D} = 0,1 \dots 2$ (рис. 7).

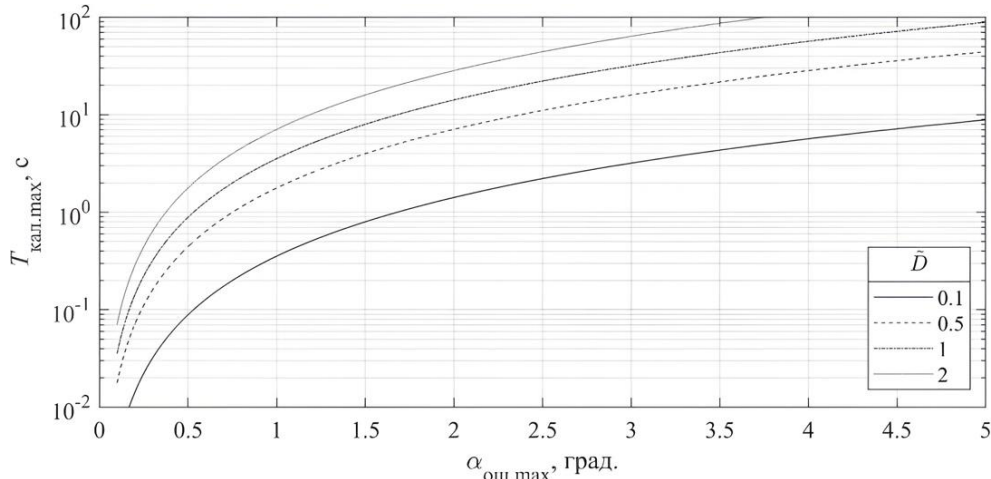


Рисунок 7 – Зависимости $T_{\text{кал max}}(\alpha_{\text{ош max}})$

Показано, что для типовой СФП ($f = 18$ ГГц, $\tilde{D} = 2$) в условиях динамических температурных воздействий максимальная систематическая ошибка пеленгования $\alpha_{\text{ош max}} = 5^\circ$ обеспечивается при $T_{\text{кал max}} \approx 1$ с. Тогда при типовом времени калибровки $t_{\text{кал}} = 5$ мкс доля полезной информации, теряемой за время калибровки, составит порядка $P_{\text{ТИ}} = t_{\text{кал}}/T_{\text{кал max}} = 5 \cdot 10^{-6}$, что допустимо в большинстве практических приложений.

При использовании в СРТО устройства с регулируемой задержкой вносятся дополнительные шумы, сужающие мгновенный динамический диапазон СРТО. Чтобы исследовать влияние вносимых шумов на это сужение, в соответствии с разработанной методикой спроектирован макет устройства с регулируемой задержкой. Использовались следующие исходные данные: $M_{\max 1} = 2$, $N_{\text{МП}} = 10$, $\tau_{\text{и min}} = 100$ нс и $\tau_{\text{и max}} = 100$ мкс, $k_{\text{зап}} = 1,1$, $\tau_{\text{тр}} = 0,1 \dots 1000$ мкс, $\tau_{\text{д}} = 4,8; 17,2; 48,4$ мкс, $q_{\text{МП min}} = 100$, $f_k = 3$ ГГц. При условии максимального количества циклов задержки $N_{\text{з max}} = 10$ максимальный шум-фактор составил $F_{\text{урз max}} = 405$, а сужение мгновенного динамического диапазона СРТО $\Delta D_{\text{СРТО}} = 9,47$ дБ. Итоговый мгновенный динамический диапазон СРТО составил 76,45 дБ, что соответствует требованиям практики. Соответственно, возможно использование устройства с регулируемой задержкой с двумя и более каналами, что обеспечивает обработку не менее $M_{\max 1} = 2$ наложенных во времени импульсов.

В четвертой главе оценено повышение полноты данных радиомониторинга с использованием устройств задержки.

Согласно разработанной в главе 1 методике, рассчитана доля импульсов $R_{\text{ПИ}}$, принимаемых комплексом радиомониторинга при использовании разработанных устройств задержки. Исходя из эксперимента в главе 3, $T_{\text{кал max}} = 0,01$ с. Порог обнаружения $h_{\text{П}}$ выбран при вероятности ложной тревоги 10^{-6} . Заданы остальные параметры: $\tau_{\text{н}} = 30$ нс, $\tau_{\text{н}} = 1$ мкс, $T_{\text{н}} = 10; 20; 50$ мкс, $\tau_{\text{СРТО}} = 5$ мкс, $t_{\text{кал}} = 5$ мкс, $M_{\max 1} = 2$.

Получены графики зависимости $R_{\text{ПИ}}(N)$ с учетом различной скважности ($S = 10; 20; 50$) при ОСШ $q = 23$ дБ (рис. 8, а).

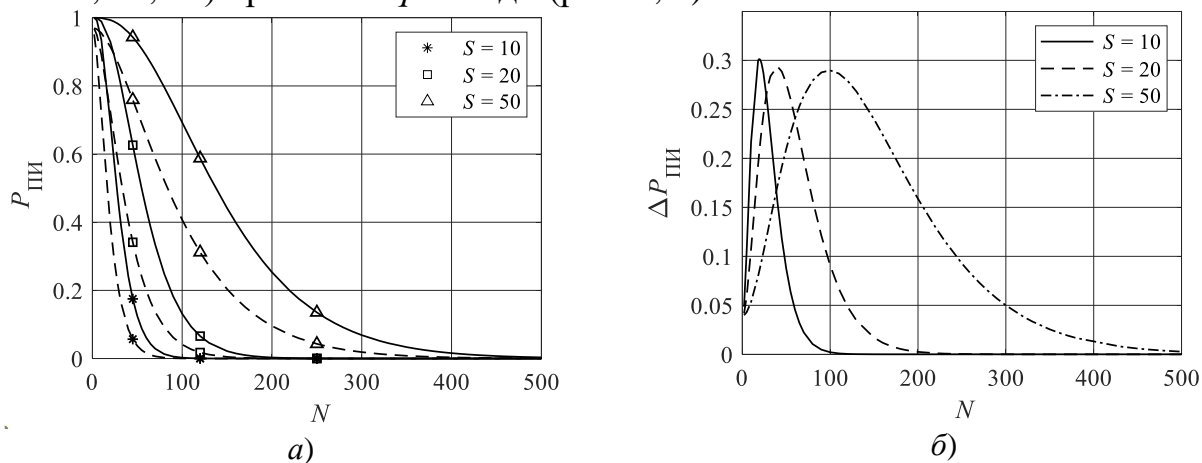


Рисунок 8. Зависимости: а) доли принимаемых импульсов $R_{\text{ПИ}}$ от количества ИРИ N с устройствами задержки (сплошная линия) и без (штриховая линия) при $S = 10; 20; 50$; б) изменения доли принимаемых импульсов $\Delta R_{\text{ПИ}}$ при использовании устройств задержки от количества ИРИ N при $S = 10; 20; 50$

Графики на рис. 8, а показывают, что по критерию доли принимаемых импульсов $R_{\text{ПИ}} \geq 0,9$ при $S = 10 \dots 50$, $q \geq 23$ дБ без устройств задержки число ИРИ $N \leq 4 \dots 22$, а с ними возрастает до $N \leq 10 \dots 55$. Графики зависимости

изменения доли принимаемых импульсов $\Delta P_{\text{ПИ}}$ на рис. 8, б показывают, что для $S = 10...50$ применение устройств задержки обеспечивает наибольший прирост доли принимаемых импульсов до $\Delta P_{\text{ПИ}} = 0,3$ в ССО, образованной $N \leq 500$ ИРИ.

Разработанные устройства задержки могут быть реализованы с учетом рассмотренных выше ограничений на основе элементной базы, использованной при создании макетов (гл. 3). Использование устройства с регулируемой задержкой целесообразно только в сопряжении с матричным приемником при удовлетворении всех предъявляемых в методике проектирования требований. Использование устройства с фиксированной задержкой целесообразно при обеспечении возможности периодической калибровки и достаточности принимаемых вне калибровки данных.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. С учетом структурных особенностей комплексов радиомониторинга разработана методика оценки доли импульсов, принимаемых комплексом в условиях ССО. Чтобы увеличить эту долю, в СРТО и СФП комплекса введены устройства задержки. Исходя из разработанной схемы комплекса радиомониторинга обоснованы технические требования к устройствам задержки.

2. С учетом параметров принимаемых сигналов, используемого приемника и требований к обработке для СРТО разработаны методика проектирования и алгоритм работы устройства с регулируемой задержкой. Разработан ключевой узел этого устройства – регулируемая линия задержки (патент РФ № 2716283), позволяющая «на ходу» подбирать задержку адаптивно к априорно неизвестной длительности импульса. Обосновано использование структурной схемы устройства с фиксированной задержкой для СФП.

3. На основе методики проектирования разработан макет устройства с регулируемой задержкой, и экспериментально установлено сужение мгновенного динамического диапазона СРТО при использовании устройства с регулируемой задержкой не более, чем на 10 дБ. Показано, что при типовых параметрах СФП в условиях динамических температурных воздействий возможно пеленгование сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты при систематической ошибке пеленгования не более 5° на частоте 18 ГГц и доле полезной информации, теряемой за время калибровки, порядка $5 \cdot 10^{-6}$.

4. Получена оценка увеличения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга при использовании исследованных устройств задержки. Показано, что по критерию доли принимаемых импульсов $P_{\text{ПИ}} \geq 0,9$ при $S = 10...50$ и $q \geq 23$ дБ количество ИРИ без устройств задержки составляет $N \leq 4...22$, а с ними возрастает до $N \leq 10...55$. В ССО, образованной несколькими сотнями ИРИ со скважностью сигналов 10 и более, предложенные технические решения на величину до 30% повышают долю принимаемых комплексом радиомониторинга импульсов. Проведенные исследования позволили разработать рекомендации по реализации и практическому применению устройств задержки.

Полученные результаты обеспечивают достижение цели диссертационной работы, а именно, повышают полноту данных радиомониторинга в сложной сигнальной обстановке.

В приложении А представлена копия патента. В приложении Б представлена копия акта внедрения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Podstrigaev, A. S. The operating algorithm of the delay device processing time-overlapped pulses in a matrix receiver / A. S. Podstrigaev, A. S. Lukiyanov // T-Comm. – 2022. – Vol. 16. No. 3. Pp. 36–42. **(К1)**

2. Подстригаев, А. С. Возможность использования оптико-электронного тракта в фазовом радиопеленгаторе СВЧ-диапазона в условиях динамических температурных воздействий / А. С. Подстригаев, А. В. Смоляков, А. С. Лукиянов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76. № 9. С. 55–65. **(К2)**

3. Лукиянов, А. С. Оценка повышения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в условиях сложной сигнальной обстановки, при использовании устройств задержки / А. С. Лукиянов, А. С. Подстригаев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2024. – Т. 78. № 3. С. 13–21. **(К2)**

4. Лукиянов, А. С. Обеспечение эффективной работы корабельного комплекса радиомониторинга в сложной сигнальной обстановке на основе внедрения в него устройств задержки / А. С. Лукиянов, А. В. Красуляк, В. С. Анкудинова // Морская радиоэлектроника. – 2024. № 4 (90). С. 22–27. **(К3)**

5. Лукиянов, А. С. Методика проектирования устройства с регулируемой задержкой для системы радиотехнического обзора комплекса радиомониторинга / А. С. Лукиянов, А. С. Подстригаев // Морская радиоэлектроника. – 2025. № 1 (91). С. 14–19. **(К3)**

Охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности

6. Патент 2716283 С2 РФ, G02B 6/28, H01P 9/00. Способ регулирования задержки СВЧ-сигнала и реализующая его линия задержки / А. С. Подстригаев, А. А. Галичина, А. С. Лукиянов; заявитель и патентообладатель АО «НИИ «Вектор». – № 2019122982; заявл. 19.07.2019; опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8. – 11 с.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

7. A study of temperature dependence of phase shift in optoelectronic path of direction finder channels / E. A. Sinicyna, A. A. Galichina, A. S. Lukiyanov et al. // International Conference «Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019» (ETACSP-2019). – 2019 – V. 1236. 6 p.

8. The expediency of fiber-optical communication line used in different schemes of reception tract of the radio monitoring complex / A. S. Podstrigaev, A. S. Lukiyanov, A. V. Smolyakov et al. // The expediency of fiber-optical communication line used in different schemes of reception tract of the radio monitoring complex. V Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2019). – 2019. – V. 1368. 7 p.

9. The research of temperature instability influence of fiber optic communication line in phase direction finder channels on peleng accuracy / A. S. Podstrigaev, A. S.

Lukiyanov, A. V. Smolyakov et al. // 6th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2019: Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures». – 2019. – V. 1410. 6 p.

10. Wideband Tunable Delay Line for Microwave Signals Based on RF Photonic Components / A. S. Podstrigaev, A. S. Lukiyanov, A. A. Galichina et al. // Lecture Notes in Computer Science (NEW2AN and ruSMART 2020). – 2020. – V. 12525. – Pp. 424-431.

11. Podstrigaev, A.S. Improving the efficiency of RF spectrum monitoring when receiving superimposed pulses based on an adjustable optical delay line / A. S. Podstrigaev, A. S. Lukiyanov // 2023 IEEE ElConRus. – 2023. – Pp. 36-42.

Прочие публикации

12. Подстригаев, А. С. Перспективы использования волоконно-оптической линии связи в радиоэлектронном комплексе / А. С. Подстригаев, А. С. Лукиянов, А. Н. Шишков / Научно-технические проблемы в промышленности: научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий. III научно-техническая конференция СПб. – 2019. – С 34-37.

13. Подстригаев, А. С. Исследование оптоволоконной линии задержки для системы радиотехнического обзора комплекса радиомониторинга / А. С. Подстригаев, А. С. Лукиянов // Сборник трудов XIX Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». М.: Мир науки. – 2021. – С 43-45.

14. Лукиянов, А. С. Разработка устройства задержки на основе регулируемой линии задержки для обеспечения работы матричного приемника в условиях сложной сигнальной обстановки / А. С. Лукиянов // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022. – С 348-351.

15. Лукиянов, А. С. Экспериментальная оценка влияния изменения температуры окружающей среды на параметры радиопеленгатора с многоканальным оптико-электронным трактом / А. С. Лукиянов // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022. – С 502-505.

16. Подстригаев, А. С. Совершенствование комплексов радиомониторинга на основе средств радиофотоники / А. С. Подстригаев, А. С. Лукиянов, У. А. Емельянова // Научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий. V научно-техническая конференция СПб. – 2024. – С. 158-162.