



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

Институт (Филиал) №8 «Компьютерные науки и прикладная математика» Кафедра 806

Группа М8О-406Б-21 Направление подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика»

Профиль Информатика

Квалификация бакалавр

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

на тему: «Desktop приложение для совместного редактирования файлов»

Автор ВКРБ Медведев Кирилл Викторович ()

Руководитель Булакина Мария Борисовна ()

Консультант ()

Консультант ()

Рецензент ()

К защите допустить

Заведующий кафедрой № 806 «Вычислительная математика и программирование»
Крылов Сергей Сергеевич ()

___ мая 2025 г.

Москва 2025

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра состоит из 48 страниц, 17 рисунков, 5 таблиц, 10 использованных источников, 1 приложения.

СОВМЕСТНОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ, СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ
РАЗРЕШЕНИЕ КОНФЛИКТОВ, ПРИЛОЖЕНИЕ, КЛИЕНТ, СЕРВЕР

Объектом разработки в данной работе является приложение для совместного редактирования файлов.

Цель работы — разработка автономного приложения для совместного редактирования файлов, подходящего для кратковременных рабочих сессий в условиях ограниченного доступа к Интернету и стороннему программному обеспечению.

Основное содержание работы состояло в проектировании архитектуры приложения, реализации механизмов синхронизации изменений и разрешения конфликтов, а также создании терминального интерфейса для работы в командной строке.

Основным результатом работы является кроссплатформенное приложение, позволяющее нескольким пользователям одновременно редактировать тексты и код в локальной сети без использования браузеров, внешних API, облачных сервисов или сложных IDE.

Данные результаты разработки предназначены для команд, работающих в условиях ограниченного доступа к Интернету, повышенных требований к безопасности информационного обмена, а также ограничений на использование стороннего программного обеспечения.

Применение результатов данной работы позволит упростить проведение краткосрочных коллективных рабочих сессий направленных на работу с кодом, анализ логов и других текстовых файлов в автономном режиме с минимальными требованиями к инфраструктуре.

Оглавление

РЕФЕРАТ.....	2
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АРХИТЕКТУРА ПРОЕКТА.....	9
1.1 Техническое задание.....	9
1.2 Интерфейс.....	10
1.3 Клиент.....	11
1.4 Сервер.....	12
1.5 Механизм синхронизации изменений.....	13
2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА.....	19
2.1 Стек технологий.....	19
2.2 Реализация CRDT.....	21
2.3 Реализация TUI.....	27
2.4 Реализация Клиента.....	31
2.5 Реализация Сервера.....	35
3 ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА.....	38
3.1 Сфера применения программного продукта.....	38
3.2 Диаграмма вариантов использования.....	39
3.3 Интерфейс редактора.....	40
3.4 Запуск сеанса совместного редактирования.....	42
3.5 Сравнение с существующими решениями.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	47
ПРИЛОЖЕНИЕ А Исходный код.....	48

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей выпускной квалификационной работе бакалавра применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Лог — хронологическая запись наиболее значимой информации о работе системы

Скрипт — короткая программа для автоматизации рутинных действий в других программах

Плагин — дополнительный программный модуль, расширяющий функциональность основной программы, но не работающий самостоятельно

Браузерный интерфейс — способ взаимодействия пользователя с программой через веб-браузер, где интерфейс отображается как веб-страница

Облачный сервис — технология, предоставляющая доступ к вычислительным ресурсам, хранению данных и приложениям через Интернет

Терминальный интерфейс — способ взаимодействия пользователя с программой через командную строку (терминал), где ввод и вывод данных происходит в текстовом режиме без графических элементов

Кросс-платформенное приложение — программное обеспечение, разработанное с использованием технологий, обеспечивающих его запуск на различных ОС с одинаковой функциональностью

Клиент — устройство, программа или процесс, который запрашивает услуги или ресурсы у сервера. Клиент инициирует соединение и отправляет запросы, ожидая ответа.

Сервер — устройство, программа или процесс, который предоставляет данные или вычислительные ресурсы клиентам. Сервер ожидает запросов и отвечает на них.

Репликация — механизм синхронизации содержимого нескольких копий объекта

P2P (Peer-to-Peer) — система, в которой два или более компьютера или устройства напрямую взаимодействуют друг с другом, минуя центральные серверы

Батчинг (Batching) — техника оптимизации взаимодействия между клиентом и сервером, при которой несколько отдельных операций объединяются в одну группу (пакет, batch) и отправляются вместе, вместо последовательной передачи каждого действия по отдельности

Дуплексная связь — способ передачи данных, при котором коммуникация может одновременно осуществляться в обоих направлениях

Сериализация JSON — это процесс преобразования состояния объекта, то есть значений его свойств в строковую форму, которая может храниться и передаваться

Мьютекс — механизм синхронизации, который используется для управления доступом к общему ресурсу в среде многопоточного программирования.

Состояние гонки (Race condition) — ошибка проектирования многопоточной системы или приложения, при которой работа системы или приложения зависит от того, в каком порядке выполняются части кода

Инкапсуляция — принцип, согласно которому внутреннее устройство сущностей нужно объединять в специальной оболочке и скрывать от вмешательств извне.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОС — Операционная Система

API — Application Programming Interface

IDE — Integrated Development Environment

TUI — Text-based User Interface

БД — База Данных

OT — Operational Transformation

CRDT — Conflict-free Replicated Data Types

P2P — Peer-to-Peer

JSON — JavaScript Object Notation

WOOT — With-Out Operational Transformation

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире инструменты для совместной работы с текстом и кодом становятся неотъемлемой частью повседневной практики разработчиков, системных администраторов, инженеров и других специалистов, чья деятельность связана с редактированием и анализом текстовых данных. На практике во многих командах возникает необходимость в быстрых и легких сессиях совместной работы с текстом или фрагментами кода. Часто речь идет о кратковременных правках, консультировании коллег по ходу работы, прототипировании, разборе конфигурационных файлов, логов или скриптов.

Однако существует широкий класс компаний и организаций (в том числе в оборонной, энергетической и финансовой сферах), функционирующих в замкнутых сетевых контурах, где доступ к Интернету отсутствует или строго регулируем. В таких условиях невозможно использовать облачные редакторы или любые инструменты, зависящие от сторонних сервисов и API, что делает необходимым наличие полностью автономного, легкого, и при этом функционального решения.

Большинство существующих решений ориентированы на браузерные интерфейсы, IDE с установленными плагинами, облачные платформы или сложную инфраструктуру, что делает их неприменимыми в ряде специфических сценариев, упомянутых выше — например, при работе в условиях ограниченного доступа к Интернету, повышенных требований к безопасности информационного обмена, а также ограничений на использование стороннего программного обеспечения.

Цель работы — разработка автономного приложения для совместного редактирования файлов, подходящего для кратковременных рабочих сессий в условиях ограниченного доступа к Интернету и стороннему программному обеспечению.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- спроектировать архитектуру приложения совместного редактора;
- разработать модуль согласования изменений;
- разработать интерфейс редактора с минимальной зависимостью от окружения исполнения;
- разработать клиентскую и серверную части приложения с поддержкой множественных подключений и real-time редактирования;
- произвести сравнительный анализ разработанного приложения и существующих решений.

В результате выполнения работы было разработано приложение для совместного редактирования текстовых файлов, позволяющее участникам одновременно вносить изменения в реальном времени, оставаясь при этом в пределах своей командной строки. Оно не требует наличия браузера, установки сторонних компонентов и может работать в локальной сети.

Использование разработки позволяет существенно упростить процесс инициации краткосрочных сессий совместного редактирования кода, конфигураций или текстовой документации в рамках ограниченной среды исполнения и замкнутых контуров.

1 АРХИТЕКТУРА ПРОЕКТА

1.1 Техническое задание

Одной из ключевых задач при разработке совместного автономного редактора является обеспечение возможности многопользовательского редактирования файла в реальном времени без использования браузеров, внешних API, облачных сервисов или IDE. Таким образом можно выделить ряд функциональных требований к приложению:

- возможность запуска как сервера, так и клиента из командной строки;
- подключение нескольких пользователей к одной сессии редактирования;
- отображение общего текста и изменений в реальном времени;
- наличие интерфейса с возможностью навигации и редактирования текста;

Переходя к архитектуре разрабатываемого приложения, выделим основные компоненты системы:

- Клиентская часть, включающая интерфейс для ввода и отображения текста, а также отправки изменений;
- Обработчик событий;
- Механизм синхронизации изменений и разрешения конфликтов;
- Серверная часть, выполняющая маршрутизацию сообщений и трансляцию изменений в файле между всеми пользователями.

Высокоуровневая архитектура приложения приведена на рисунке 1.

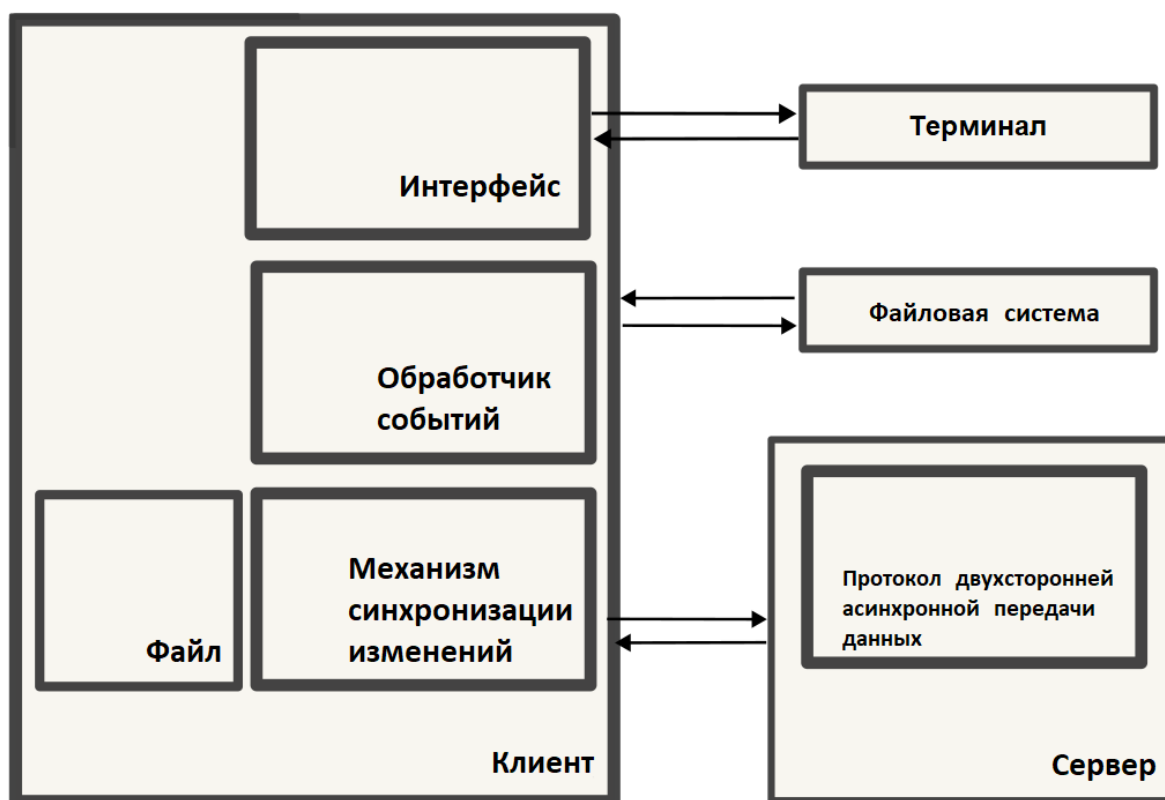


Рисунок 1 — Высокоуровневая архитектура приложения

1.2 Интерфейс

В качестве способа реализации пользовательского интерфейса выбран TUI (Text-based User Interface). Это решение позволяет отойти от необходимости использования браузера или графического оконного приложения, при этом обеспечивая необходимый функционал: навигация по файлу, просмотр текста и его редактирование. С точки зрения автономности и работы в ограниченных средах исполнения данное решение полностью оправданно, так как позволяет запускать приложение даже в системах без оконных интерфейсов (серверах, встраиваемых системах).

Архитектура пользовательского интерфейса приведена на рисунке 2.

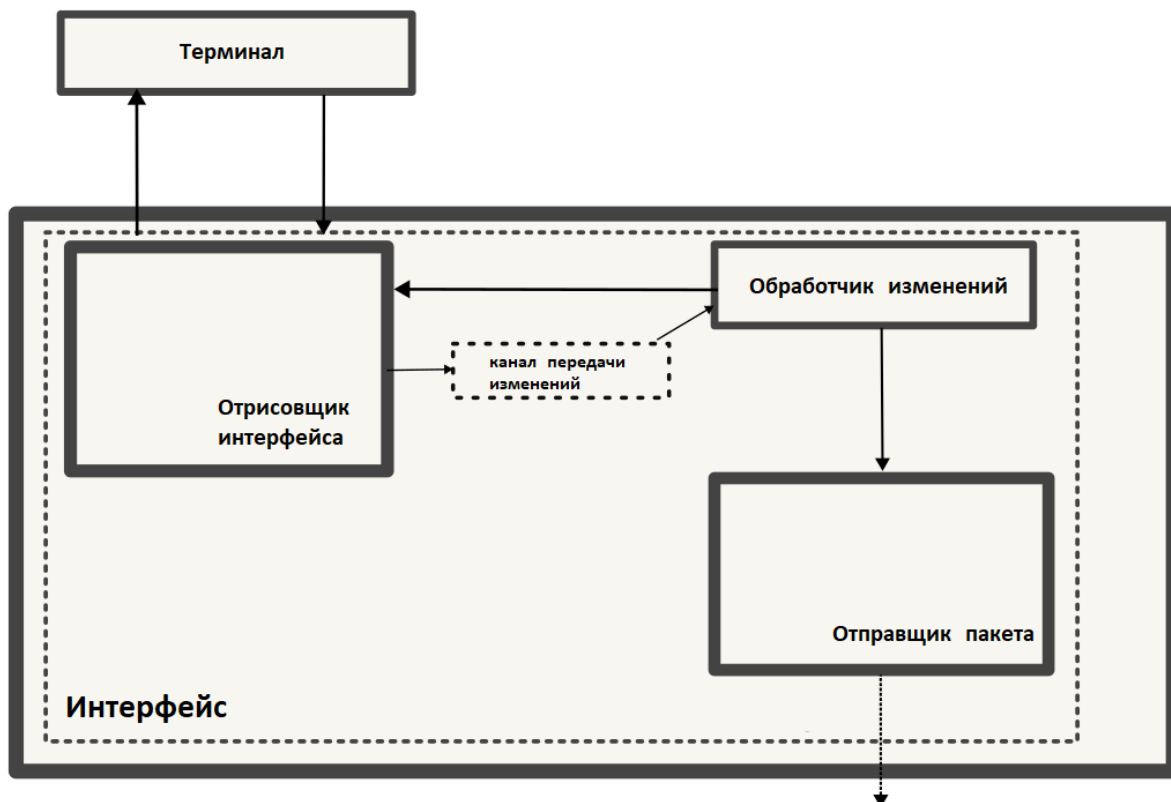


Рисунок 2 — Архитектура графического ядра

1.3 Клиент

Клиентская часть поддерживает постоянное соединение с сервером через протокол двусторонней асинхронной передачи данных, в первую очередь передавая отправляемые и получаемые пакеты в модуль разрешения конфликтов, чтобы поддерживать актуальную версию файла на стороне TUI-интерфейса.

Архитектура клиентской части приложения приведена на рисунке 3.

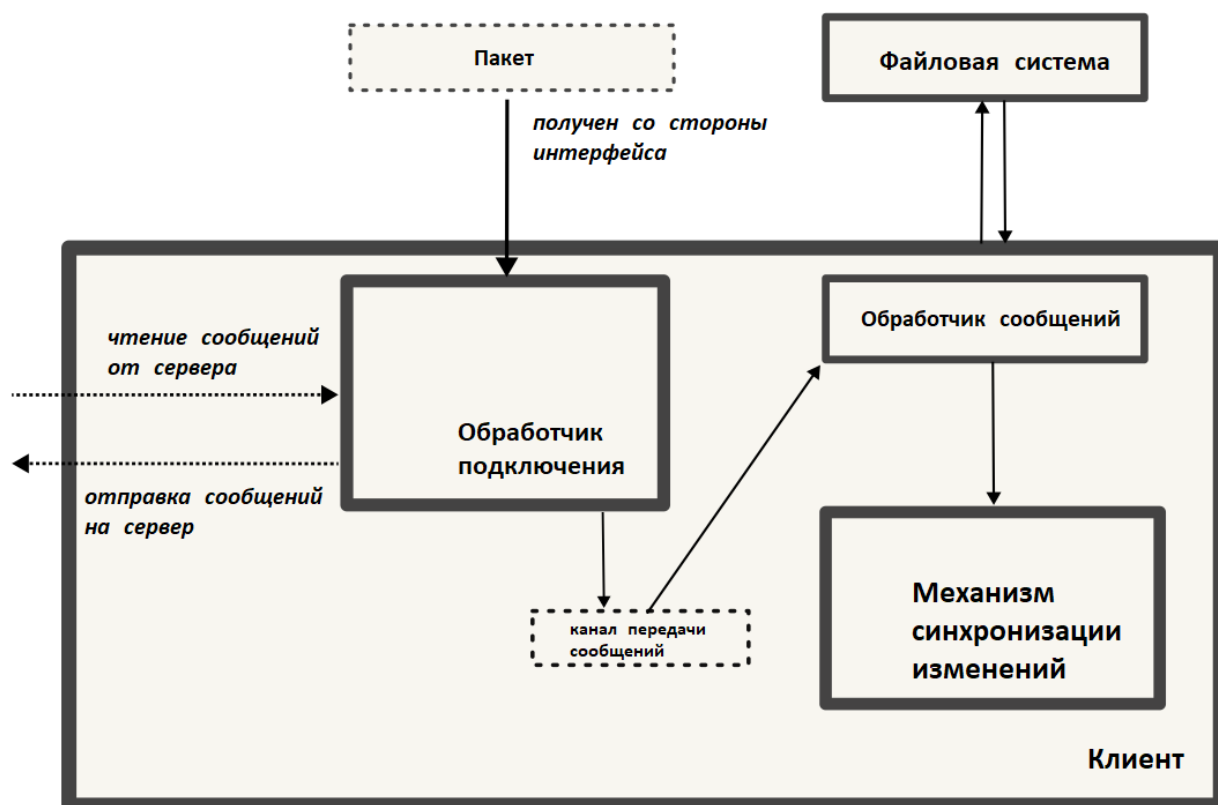


Рисунок 3 — Архитектура клиентской части приложения

1.4 Сервер

Сервер в приложении выполняет роль ретранслятора изменений между клиентами, и не содержит логику управления состоянием документа. Этот подход снижает нагрузку на сервер, а также делает его более безопасным «by design», так как он не сохраняет данные о файле и его изменениях. Также пропадает необходимость в организации работы с БД. Сервер может быть запущен локально на компьютере одного из участников, без требований к инфраструктуре и постоянному поддержанию сервера в рабочем состоянии и его обслуживании. Этот подход соответствует цели создания приложения для кратковременных сеансов редактирования файла.

Архитектура серверной части приложения приведена на рисунке 4.

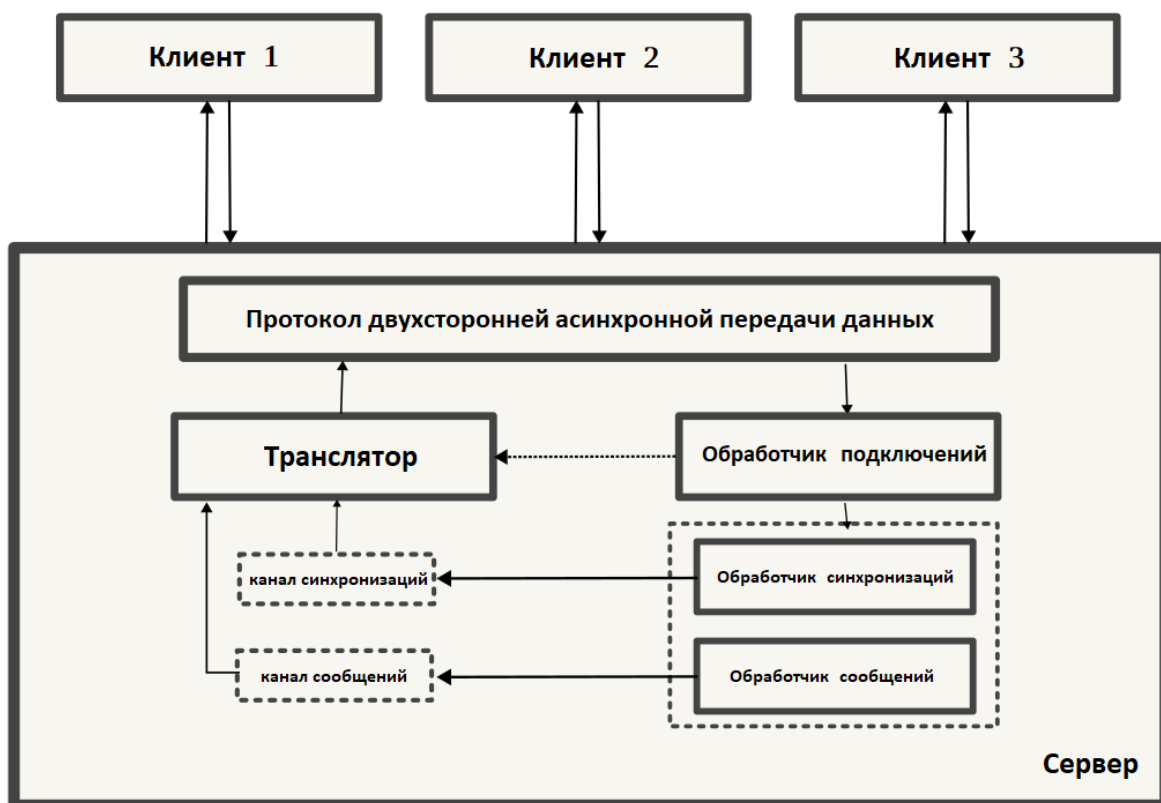


Рисунок 4 — Архитектура серверной части приложения

1.5 Механизм синхронизации изменений

В проекте, ориентированном на совместное редактирование текстовых файлов, наличие модуля синхронизации изменений критически важно. Он обеспечивает согласованное отображение текста у всех участников редактирования в реальном времени и корректное разрешение конфликтов при одновременном внесении правок. Без подобного механизма любое распределенное редактирование приведет к рассинхронизации данных, потере изменений или логическим противоречиям в документе.

Существуют два основных подхода к решению задачи синхронизации в многопользовательских редакторах: Operational Transformation (OT) [8] и Conflict-free Replicated Data Types (CRDT) [7].

ОТ (Операционные преобразования) — это класс алгоритмов, которые при получении операции изменения трансформируют их относительно уже примененных локальных операций. Это позволяет согласовать порядок применения и сохранить логическую корректность изменений.

Большинство алгоритмов операционного преобразования исходят из предположения о том, что все взаимодействия выполняются через единый сервер, который хранит актуальную версию документа и применяет полученные от клиентов операции изменения с последующим их согласованием.

Если два пользователя одновременно вносят изменения, их операции могут конфликтовать. Алгоритмы класса ОТ трансформируют одну операцию относительно другой так, чтобы конечное состояние документа было согласованным. Принцип работы алгоритма отражен на Рисунке 5.

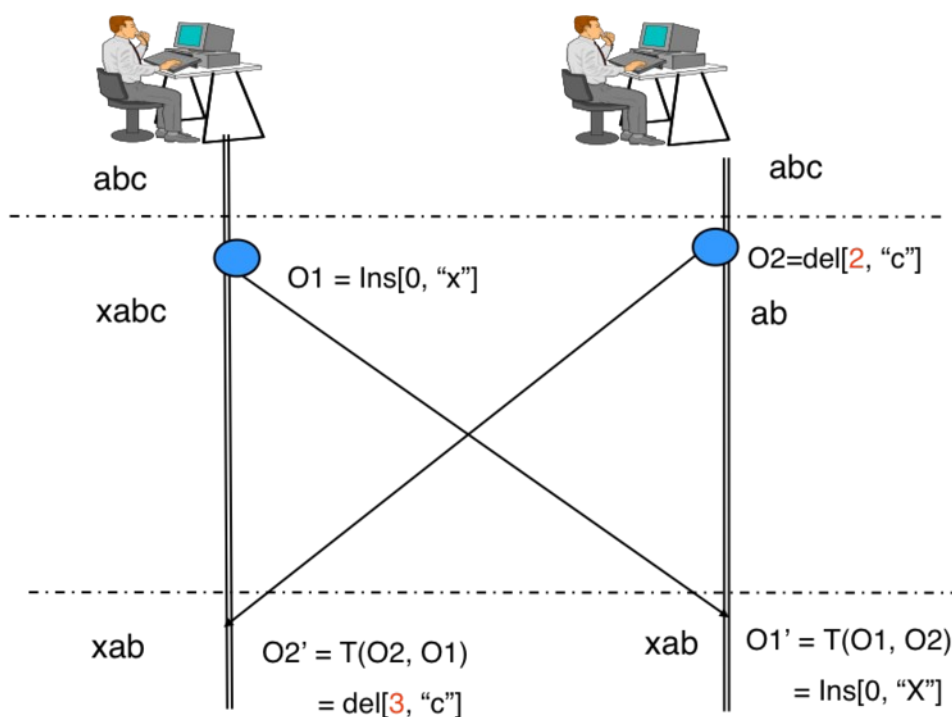


Рисунок 5 — Пример работы алгоритма Operational Transformation [8]

Добавив новый символ, первый пользователь изменил индексацию текста. Однако удаление, произведенное вторым пользователем в тот же момент времени, производилось с учетом старого порядка символов текста. Поэтому

перед применением изменений будет произведена трансформация операции «удалить символ под индексом 2» в операцию «удалить символ под индексом 3».

CRDT (Бесконфликтные реплицированные структуры данных) — это структуры данных, разработанные таким образом, чтобы их копии могли независимо эволюционировать, а затем сливаться без потери информации, сохраняя при этом согласованное состояние. CRDT гарантируют автоматическое разрешение конфликтов при репликации. Эти структуры опираются на строгие математические свойства:

- **Ассоциативность** — операции можно применять в любом порядке группами;
- **Коммутативность** — результат не зависит от порядка двух любых операций;
- **Идемпотентность** — повторное применение одной и той же операции не изменяет состояние.

В отличие от ОТ, где сервер играет ключевую роль и выступает в роли арбитра полученных операций изменения, в случае применения CRDT каждый узел (клиент) самостоятельно объединяет локальную версию текста и полученные от других узлов изменения. [9]

Сравнительный анализ двух классов алгоритмов представлен в Таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительный анализ ОТ и CRDT

Критерий	ОТ	CRDT
Подход	Основывается на централизованной трансформации операций в соответствии с историей их применения	Использует децентрализованную структуру данных с встраиваемой логикой разрешения конфликтов

Продолжение таблицы 1

Критерий	OT	CRDT
Обработка конфликтов	Разрешение конфликтов достигается путем трансформации входящих операций относительно предыдущих	Конфликты устраняются автоматически за счет свойств коммутативности и идемпотентности операций
Клиент-серверная модель	Предполагает наличие централизованного сервера, координирующего порядок и трансформации операций	Может функционировать с сервером ретранслятором
P2P	Не применяется в P2P-среде из-за необходимости централизованной координации	Подходит для работы в распределённой P2P-среде без центральной координации
Коммутативность	Обеспечивается путем явной трансформации операций для согласования их воздействия	Является встроенным свойством: все операции коммутативны и могут применяться в произвольном порядке
Порядок доставки сообщений	Требуется строгое соблюдение порядка доставки операций для обеспечения корректного результата	Не предъявляет требований к порядку доставки, допускает асинхронную и расстроенную репликацию

Продолжение таблицы 1

Критерий	OT	CRDT
Удаление символов	Удаление осуществляется посредством исключения операций из истории	Удаленные символы остаются в структуре, но становятся невидимыми
Сложность реализации	Необходима реализация сложной логики трансформаций, буферизации и согласования состояний	Требует реализации специфичных структур данных и алгоритмов генерации уникальных идентификаторов
Использование памяти	Объем используемой памяти остается умеренным благодаря возможному удалению устаревших операций	Объем памяти может расти из-за хранения всех версий символов, включая логически удалённые элементы

С учетом решаемых задач, выбран вариант CRDT, поскольку он лучше соответствует таким качествам, как легкость реализации и автономность. CRDT позволяет организовать совмещение изменений в файле без ресурсоемких к вычислительным мощностям операций, так как при его использовании отсутствует необходимость производить трансформацию одних операций в другие. В отличие от OT, CRDT не требует производить согласование порядка операций на централизованном сервере, что позволяет реализовать архитектуру итогового приложения с сервером, занимающимся только пересылкой сообщений [10]. Это, в свою очередь, упрощает разработку и делает возможным запуск сервера на машине одного из пользователей. Кроме того, CRDT позволяет корректно обрабатывать операции даже в условиях временной потери

соединения — накопленные изменения можно применить позднее, не нарушив согласованности.

Также при рассмотрении вопроса с точки зрения организации связи между пользователями, построение модуля синхронизации изменений на основе CRDT позволит использовать как многоранговую сеть (клиент-серверная архитектура), так и одноранговую сеть (P2P) [1].

Однако на практике, и в реализованном приложении, при применении CRDT используется именно клиент-серверная архитектура по ряду причин:

- более простая реализация проверки прав подключаемых к сеансу совместного редактирования клиентов;
- возможность обеспечения отзывчивости всей системы, даже если некоторые ее клиенты имеют проблемы с соединением за счет батчинга операций изменения на стороне сервера;
- меньшая нагрузка на сеть.

2 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

2.1 Стек технологий

В качестве основного языка для написания серверной и клиентской части приложения выбран язык программирования Golang.

Go (Golang) — язык системного уровня, спроектированный для написания простого, надежного и высокопроизводительного сетевого программного обеспечения [4]. Он подходит для проектов, в которых важны параллелизм, кроссплатформенность, минимализм и легкая сборка, что делает его отличным выбором для реализации автономного приложения для совместного редактирования файлов в TUI-режиме.

В Golang представлен легкий механизм параллелизма — создание легковесных потоков (goroutines) и коммуникации между ними через каналы (channels), которые позволяют эффективно обрабатывать множество соединений без сложностей традиционной многопоточности. Также встроенные примитивы синхронизации (Mutex) обеспечивают безопасный доступ к общим данным при работе с клиентами и файлами. Этот функционал, например, используется для безопасного инкрементирования счетчика символов, локального для каждого узла, и переменной, используемой для получения уникального идентификационного номера клиента, которые будут описаны далее.

В контексте разработки приложения для совместного редактирования файлов в реальном времени необходимо обеспечить двустороннюю асинхронную связь между клиентом и сервером. Двухнаправленный канал связи позволяет как клиентам, так и серверу, обмениваться сообщениями в обе стороны. Асинхронность позволяет клиенту продолжать редактирование текста, не ожидая завершения процесса синхронизации с сервером. Это предотвращает блокировки на стороне клиента и сервера, улучшая отклик

интерфейса и производительность системы.

Учитывая вышеописанные требования, для организации сетевого взаимодействия был выбран протокол WebSocket.

WebSocket [6] — это протокол связи, обеспечивающий двухстороннюю (дуплексную) передачу данных между клиентом и сервером через постоянное соединение, что позволяет обмениваться сообщениями в реальном времени с минимальной задержкой и без необходимости повторного установления соединений. В Go имеется стандартная поддержка этого протокола через пакет «*net/http*» и стороннюю библиотеку «*gorilla/websocket*» [3], что упрощает интеграцию протокола WebSocket в приложение.

Для обмена данными между клиентом и сервером в процессе синхронизации изменений и выполнения служебных запросов используется текстовый формат JSON.

JSON (JavaScript Object Notation) [5] — это легковесный текстовый формат обмена данными, основанный на языке JavaScript, но используемый независимо от него. JSON легко читаем человеком и может быть легко обработан машинами. Он представляет данные в виде пар «ключ-значение» и поддерживает структуры данных, такие как: объекты, массивы, строки, числа, булевы значения и null. JSON широко используется для передачи данных между сервером и клиентом. Выбранный для написания приложения язык программирования Golang также имеет встроенную поддержку JSON.

Каждое изменение текста, произведенное пользователем, сериализуется в JSON-формат для передачи через WebSocket-соединение. Формат JSON используется для представления запросов редактирования, таких как вставка и удаление символов, а также для служебных запросов, необходимых для подключения новых клиентов к сеансу редактирования.

2.2 Реализация CRDT

Как было описано ранее, CRDT — это типы данных, которые можно реплицировать на множество узлов и обновлять параллельно без координации между узлами. Для использования данного подхода был выбран и реализован алгоритм WOOT (With-Out Operational Transforms) [1].

WOOT работает с текстом символов, инкапсулируя дополнительную информацию о каждом из них в следующую структуру данных, представленную на Рисунке 6.

```
type Document struct {  
    Characters []Character  
}  
  
type Character struct {  
    ID          string  
    Visible     bool  
    Value       string  
    IDPrevious  string  
    IDNext      string  
}
```

Рисунок 6 — Структуры символа и текста в алгоритме WOOT

Таким образом, текст логически представлен структурой связанного списка для хранения символов с указанием их позиций относительно друг друга. Описание каждого поля структуры представлено в Таблице 2.

Таблица 2 — Описание полей структуры *Character*

Тип данных	Поле	Описание
string	ID	Уникальный идентификатор символа
bool	Visible	Флаг, отражающий видимость символа
string	Value	Значение символа

Продолжение таблицы 2

Тип данных	Поле	Описание
string	IDPrevious	Уникальный идентификатор символа, стоящего перед рассматриваемым
string	IDNext	Уникальный идентификатор символа, стоящего после рассматриваемого

ID представляет собой строковое значение и генерируется путем конкатенации двух значений:

- *SiteID* — уникальный идентификатор узла (клиента);
- *LocalClock* — значение локального клиентского счетчика для рассматриваемого символа.

При подключении к сеансу совместного редактирования клиент получает от сервера *SiteID* уникальный для каждого узла. При вставке нового символа в документ его ID генерируется из уникального идентификатора узла (клиента), выдаваемого ему при подключении к сеансу редактирования и локального для каждого узла счетчика символов, который инкрементируется при добавлении узлом нового символа в документ. Таким образом пара {уникальный идентификатор узла, локальный номер символа по счетчику} формируют глобально уникальный ID символа.

Для корректного связывания символов в последовательные линейные цепочки документ должен содержать специальные невидимые символы (*Visible* = false), обозначающие начало и конец документа {*Char_{Start}*, *Char_{End}*}.

При внесении изменения в локальную версию документа, узел генерирует операцию изменения, каждая из которых:

- выполняется на локальной версии документа;

- отправляется на сервер, транслирующий ее всем узлам, участвующим в сеансе совместного редактирования;
- отправляется сервером на вход всем остальным узлам, которые интегрируют изменение каждый в своей локальной версии документа.

Каждая операция изменения файла может быть выражена через следующие примитивы:

- $Insert(a < e < b)$ – вставка элемента e между символами a и b ;
- $Delete(e)$ – удаление символа e .

Данный базис операций, вкупе с тем фактом, что каждый символ имеет свой уникальный идентификационный номер, позволяет основывать операции на самих символах, а не их позициях в тексте.

Таким образом, операция $Delete(a)$ примененная к тексту «*zaal*» выполнима однозначно. Однако особого внимания требует ситуация, в которой интеграция полученной операции $Insert(a < b < c)$ происходит после локального удаления символа c («*a e*»). Для разрешения подобного конфликта, при удалении очередного символа не происходит фактического исключения его из структуры документа. Вместо этого параметр символа *Visible* становится равным *false* и его отображение в окне редактирования прекращается (Он становится невидимым). В таком случае символ все еще можно будет использовать для корректной интеграции операций, работающих с его позицией, а именно для разрешения описанной выше ситуации. Пример работы алгоритма представлен на Рисунке 7.

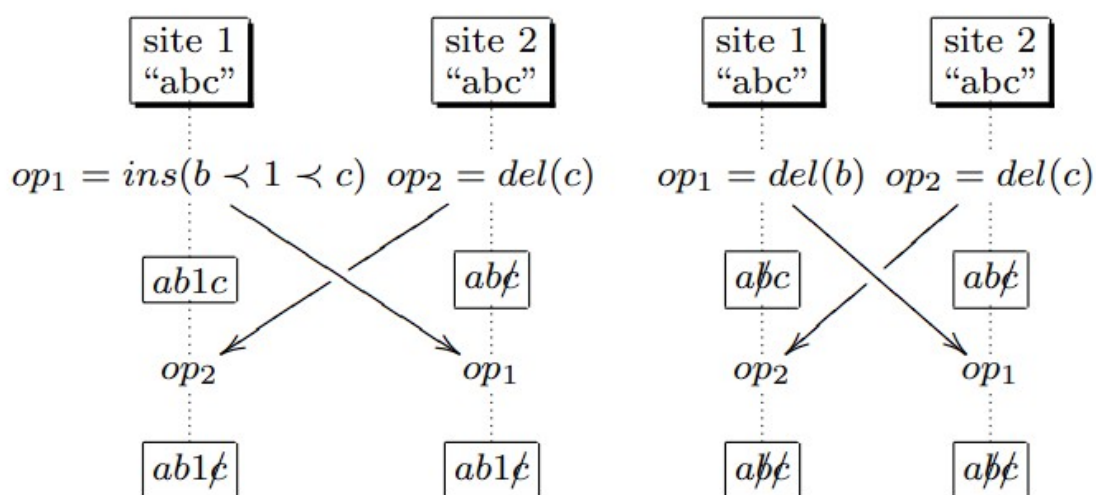


Рисунок 7 — Пример работы алгоритма WOOT.

Для непосредственной реализации операций $Insert(a \prec e \prec b)$ и $Delete(e)$ необходимо реализовать ряд служебных методов для позиционной работы с локальной копией файла, которые описаны в Таблице 3.

Таблица 3 — описание низкоуровневых методов работы с локальной копией файла клиента

Метод	Описание
$Length()$	Получение длины файла в символах с учетом невидимых
$ElementAt(p \text{ int})$	Получение структуры <i>Character</i> символа на позиции p
$Position(ID \text{ string})$	Получение позиции символа в тексте по его уникальному идентификатору
$Contains(ID \text{ string})$	Проверка на существование в тексте символа с заданным уникальным идентификатором

Продолжение таблицы 3

Метод	Описание
<code>Content(doc Document)</code>	Получение текста для отображения (только видимые символы)
<code>Subseq(charStart, charEnd Character)</code>	Получение подмножество символов между двумя указанными символами, включая невидимые
<code>IthVisible(doc Document, p int)</code>	Получение i-го видимого символа в тексте

С опорой на вышеизложенные принципы алгоритма и методы работы с локальной копией на узле, были реализованы операции $Insert(a < e < b)$ и $Delete(e)$, исходный код которых представлен на Рисунках 8 и 9.

```
func (doc *Document) IntegrateDelete(char Character) *Document {
    position := doc.Position(char.ID)
    if position == -1 {
        return doc
    }

    doc.Characters[position-1].Visible = false

    return doc
}

func (doc *Document) GenerateDelete(position int) *Document {
    char := IthVisible(*doc, position)
    return doc.IntegrateDelete(char)
}
```

Рисунок 8 — Программная реализация операции $Delete(e)$

```

func (doc *Document) IntegrateInsert(char, charPrev, charNext Character) (*Document, error) {
    subsequence, err := doc.Subseq(charPrev, charNext)
    if err != nil {
        return doc, err
    }
    position := doc.Position(charNext.ID)
    position--
    if len(subsequence) == 0 {
        return doc.LocalInsert(char, position)
    }

    if len(subsequence) == 1 {
        return doc.LocalInsert(char, position-1)
    }

    i := 1
    for i < len(subsequence)-1 && subsequence[i].ID < char.ID {
        i++
    }
    return doc.IntegrateInsert(char, subsequence[i-1], subsequence[i])
}

func (doc *Document) GenerateInsert(position int, value string) (*Document, error) {
    mu.Lock()
    LocalClock++
    mu.Unlock()

    charPrev := IthVisible(*doc, position-1)
    charNext := IthVisible(*doc, position)

    if charPrev.ID == "-1" {
        charPrev = doc.Find("start")
    }
    if charNext.ID == "-1" {
        charNext = doc.Find("end")
    }

    char := Character{
        ID:          fmt.Sprintf(SiteID) + fmt.Sprintf(LocalClock),
        Visible:     true,
        Value:       value,
        IDPrevious:  charPrev.ID,
        IDNext:      charNext.ID,
    }

    return doc.IntegrateInsert(char, charPrev, charNext)
}

```

Рисунок 9 — Программная реализация операции $Insert(a < e < b)$

2.3 Реализация TUI

Реализация текстового графического интерфейса (TUI) была выполнена с использованием библиотеки «*termbox-go*» [2].

Termbox-go — это кросс-платформенная низкоуровневая библиотека для создания текстовых пользовательских интерфейсов (TUI) в терминале на языке Go. Она обеспечивает прямой доступ к экрану и клавиатуре, позволяя управлять отдельными ячейками терминала, устанавливать символы и цвета, отслеживать нажатия клавиш, а также управлять положением курсора. В отличие от стандартных средств ввода-вывода, «*termbox-go*» работает в режиме полной перерисовки экрана, что делает ее подходящей для создания интерактивных приложений, таких как редакторы, игры или панели мониторинга.

Текстовый пользовательский интерфейс редактора представляет собой терминальное приложение, экран которого делится на две области: область редактирования и строка состояния (Status Bar). Навигация и редактирование текста осуществляется посредством позиционирования курсора пользователя, в основной области редактирования. Приложение поддерживает горизонтальную и вертикальную прокрутку при помощи логики смещения окна отображаемых символов.

Компонент *editor.go* реализует структуру *Editor*, которая инкапсулирует:

- состояние текстового редактора (текст, позиция курсора);
- параметры окна терминала;
- метаданные о сессии редактирования;
- каналы и мьютексы для асинхронной и потокобезопасной работы.

Структура *Editor* и описание ее полей представлены на Рисунке 10 и в Таблице 4 соответственно.

```

type Editor struct {
    Text    []rune
    Cursor  int

    Width, Height      int
    ColumnOffset, RowOffset int

    ScrollEnabled bool

    // StatusBar
    ShowMessage bool
    StatusMsg    string
    StatusChan   chan string
    StatusBarMu  sync.Mutex
    Users        []string

    DrawChan chan int
    mu       sync.RWMutex

    IsConnected bool
}

```

Рисунок 10 — Ядро редактора структура *Editor*

Таблица 4 — Описание полей структуры *Editor*

Тип данных	Поле	Описание
Массив rune	<i>Text</i>	Содержимое документа
int	<i>Cursor</i>	Текущая позиция курсора
int	<i>Width, Height</i>	Размер области для редактирования в символах
int	<i>ColumnOffset, RowOffset</i>	Вертикальный и горизонтальный отступ, используемый для реализации прокрутки экрана

Продолжение таблицы 4

Тип данных	Поле	Описание
bool	<i>ScrollEnabled</i>	Флаг, отражающий статус режима прокрутки
bool	<i>ShowMessage</i>	Флаг, отражающий наличие информационного сообщения, ожидающего отображения в строке состояния
string, массив строк	<i>StatusMsg, Users</i>	Информационное сообщение, список имен пользователей в сессии
канал int	<i>StatusChan, DrawChan</i>	Каналы, используемые как триггер к обновлению строки состояния и области редактирования
bool	<i>IsConnected</i>	Флаг, отражающий статус подключения к серверу
мьютекс	<i>StatusBarMu, mu</i>	Мьютексы, используемые для потокобезопасного доступа к строке состояния и области редактирования

Поддержка различных языков в редакторе реализована с учетом особенностей стандарта кодирования символов Unicode и проблемы разной ширины символов. В языке Go для представления символов используется тип *rune* — псевдоним для *int32*, предназначенный для хранения одного Unicode-символа. Для определения количества экранных ячеек, занимаемых каждым символом, используется библиотека «*go-runewidth*», которая позволяет точно рассчитывать позицию курсора.

Компонент *editor.go* формирует API из методов-геттеров/сеттеров:

- *GetText()* / *SetText()*;
- *GetCursorX()* / *SetCursorX()*;
- *GetWidth()* и *GetHeight()*;
- *SetSize()*;
- *GetRowOffset()* / *IncrementRowOffset()*;
- *GetColumnntOffset()* / *IncrementColumnntOffset()*.

Эти методы используются при перерисовке интерфейса и навигации курсора в клиентской части приложения, и используются другими компонентами программы, гарантируя, что состояние редактора не будет повреждено при параллельных операциях.

Таким образом, первоначально производится очистка всего экрана приложения, после чего под защищенным чтением средствами мьютекса *ti* вычисляются актуальные координаты курсора с учетом горизонтального и вертикального смещений прокрутки. Перерисовка обновленного значения области редактирования производится посимвольно с учетом ширины широких Unicode-знаков. После этого под защитой мьютекса *StatusBarMu* производится перерисовка строки состояния согласно статусу флага *ShowMessage* и индикатора подключения. Завершающим этапом является вызов метода *termbox.Flush()*, фиксирующего все изменения во внешнем буфере и отображающего их в окне терминала, чтобы достичь атомарности рендеринга и сохранения отзывчивости пользовательского интерфейса. Метод перерисовки интерфейса представлен на Рисунке 11.

```

func (e *Editor) Draw() {
    _ = termbox.Clear(termbox.ColorDefault, termbox.ColorDefault)

    e.mu.RLock()
    cursor := e.Cursor
    e.mu.RUnlock()

    cursor_x, cursor_y := e.TextIndToCellCoord(cursor)

    if cursor_x - e.GetColumnOffset() > 0 {
        cursor_x -= e.GetColumnOffset()
    }

    if cursor_y - e.GetRowOffset() > 0 {
        cursor_y -= e.GetRowOffset()
    }

    termbox.SetCursor(cursor_x-1, cursor_y-1)

    yStart := e.GetRowOffset()
    yEnd := yStart + e.GetHeight() - 1

    xStart := e.GetColumnOffset()

    x, y := 0, 0
    for i := 0; i < len(e.Text) && y < yEnd; i++ {
        if e.Text[i] == rune('\n') {
            x = 0
            y++
        } else {
            setY := y - yStart
            setX := x - xStart
            termbox.SetCell(setX, setY, e.Text[i], termbox.ColorDefault, termbox.ColorDefault)

            x = x + runewidth.RuneWidth(e.Text[i])
        }
    }

    e.DrawStatusBar()

    termbox.Flush()
}

```

Рисунок 11 — Метод перерисовки интерфейса

2.4 Реализация Клиента

Клиентская часть редактора реализована как модульная многопоточная система, состоящая из четырех основных компонентов: *main.go*, *ui.go*, *engine.go* и *utils.go*. Каждый из которых выполняет строго определенную роль,

обеспечивая распределение ответственности и лучшую читаемость кода.

Компонент *main.go* отвечает за инициализацию приложения и является точкой входа для клиентской части. Он выполняет парсинг аргументов командной строки, установку WebSocket-соединения с сервером, генерацию или запрос имени пользователя и приведение входного редактируемого файла к CRDT-представлению. В этом компоненте создается основной объект редактора *Editor* и переменная, хранящая CRDT-документ. После начальной конфигурации управление передается в метод *initUI()*, обеспечивающий запуск пользовательского интерфейса. Компонент *utils.go* инкапсулирует инфраструктурные службы парсинга аргументов командной строки и установки WebSocket-подключения. Точка входа в клиентскую часть приложения отображена на Рисунке 12.

Компонент *ui.go* отвечает за инициализацию терминала и объединение потоков событий на основе event-driven модели. В данном компоненте происходит запуск фоновых горутин для перерисовки интерфейса и строки состояния, а также формируется главный цикл обработки событий. Источниками событий служат два канала — ввод с клавиатуры и поступающие по WebSocket сообщения. Горутина *handleStatusMsg()* реализует механизм временного отображения системных уведомлений в строке состояния: она асинхронно читает сообщения из канала *StatusChan*, обновляет текст и флаг отображения под защитой мьютекса, запускает перерисовку интерфейса и автоматически скрывает сообщение спустя фиксированный интервал времени. Вторая горутина *drawLoop()* реализует реактивную модель обновления экрана: она слушает канал *DrawChan*, в который поступают сигналы о необходимости отрисовки, и вызывает метод *Draw()* TUI-редактора, обеспечивая потокобезопасную визуализацию актуального состояния файла.

Компонент *engine.go* представляет собой центральный обработчик событий ввода и сетевых сообщений в клиентской части приложения и

реализует низкоуровневую логику взаимодействия с пользователем и сервером. Его основное назначение — преобразовывать внешние и внутренние события (нажатия клавиш, входящие сетевые пакеты) в операции над документом и состоянием интерфейса. Структурно *engine.go* разделен на три функциональных подсистемы: генераторы событий, обработчики терминального ввода и обработчики сетевых сообщений. Компонент работает в тесной связке с глобальными объектами редактора, CRDT-документа и сетевого соединения, доступными из *main.go*.

Генератор событий реализует асинхронное получение входных данных и передачу их в основной цикл пользовательского интерфейса. Функция *getTermboxChan()* запускает горутину, непрерывно вызывающую *termbox.PollEvent()* — блокирующий системный вызов, реагирующий на действия пользователя в терминале. Полученные события отправляются в буферизированный канал, который затем передается в главный цикл из *ui.go*. Аналогично, функция *getMsgChan()* запускает отдельную горутину, осуществляющую чтение JSON-сообщений из WebSocket-соединения. Каждое сообщение десериализуется в структуру *Message*, и затем помещается в канал. Такой подход позволяет изолировать потенциально блокирующие операции ввода-вывода от основного цикла логики, обеспечивая немедленную реакцию интерфейса на события.

Вторая подсистема отвечает за обработку пользовательского ввода и реализацию логики редактирования документа. Функция *handleTermboxEvent()* анализирует тип события и конкретную клавишу. В зависимости от действия пользователя вызывается одна из функций: перемещение курсора, вставка символа, удаление символа. После модификации документа вызывается Метод для инициирования перерисовки, и, при наличии активного подключения, сформированная операция сериализуется и передается на сервер через WebSocket. Таким образом, реализуется локально-упреждающая модель (*local-*

first), при которой пользователь моментально видит результат своих действий без ожидания ответа от сервера.

Третья подсистема обрабатывает входящие операции от других участников сессии. Функция *handleMsg()* вызывается при получении сообщения в канале и выполняет десериализацию вложенной операции. В случае успешного разбора операция применяется к текущему состоянию CRDT-документа с помощью метода *Insert()* или *Delete()*. После этого редактор обновляет отображаемый текст, и вызывается Метод для визуального отражения изменений.

```
func main() {  
  
    flags = parseFlags()  
    s := bufio.NewScanner(os.Stdin)  
    name := randomdata.SillyName()  
  
    if flags.Login {  
        fmt.Print("Enter your name: ")  
        s.Scan()  
        name = s.Text()  
    }  
  
    conn, _, err := createConn(flags)  
    if err != nil { ...  
    }  
    defer conn.Close()  
  
    msg := commons.Message{Username: name, Text: "has joined the session.", Type: commons.JoinMessage}  
    _ = conn.WriteJSON(msg)  
  
    logFile, debugLogFile, err := setupLogger(logger)  
    if err != nil { ...  
    }  
    defer closeLogFiles(logFile, debugLogFile)  
  
    if flags.File != "" {  
        if doc, err = crdt.Load(flags.File); err != nil { ...  
        }  
    }  
  
    uiConfig := UIConfig{  
        EditorConfig: editor.EditorConfig{  
            ScrollEnabled: flags.Scroll,  
        },  
    }  
  
    err = initUI(conn, uiConfig)  
    if err != nil { ...  
    }  
}
```

Рисунок 12 — Инициализация клиентской части редактора

2.5 Реализация Сервера

Серверная часть приложения организована вокруг двух ключевых структур: *Clients* и *client*, которые формируют ядро управления состоянием всех подключенных пользователей. Структура *Clients* представляет собой потокобезопасную обертку над отображением активных клиентов, реализованную в виде структуры ключ-значение. Она включает набор каналов (*addRequests*, *deleteRequests*, *readRequests*, *nameUpdateRequests*) для обработки всех возможных операций над этим состоянием. Это решение обеспечивает строгую последовательность действий и исключает гонки при доступе к общей памяти. Каждому клиенту сопоставляется объект структуры *client*, содержащий WebSocket-соединение, уникальный идентификатор, имя пользователя, а также два мьютекса: один для защиты от одновременных попыток записи в соединение *writeMu*, второй — для изменения локальных полей клиента *mu*. Структуры *client* и *Clients* отображены на Рисунке 13.

```
type client struct {
    Conn    *websocket.Conn
    SiteID  string
    id      uuid.UUID

    writeMu sync.Mutex
    mu      sync.Mutex

    Username string
}

type Clients struct {
    list map[uuid.UUID]*client

    mu sync.RWMutex

    deleteRequests chan deleteRequest
    readRequests   chan readRequest
    addRequests     chan *client
    nameUpdateRequests chan nameUpdate
}
```

Рисунок 13 — структуры *client* и *Clients*

При разработке сервера учитывался тот факт, что итоговая архитектура программного решения будет иметь гибридную клиент-серверную структуру, в которой запуск сервера предполагается осуществлять инициатору сеанса редактирования. Роль сервера в итоговой архитектуре проекта представлена на Рисунке 14.

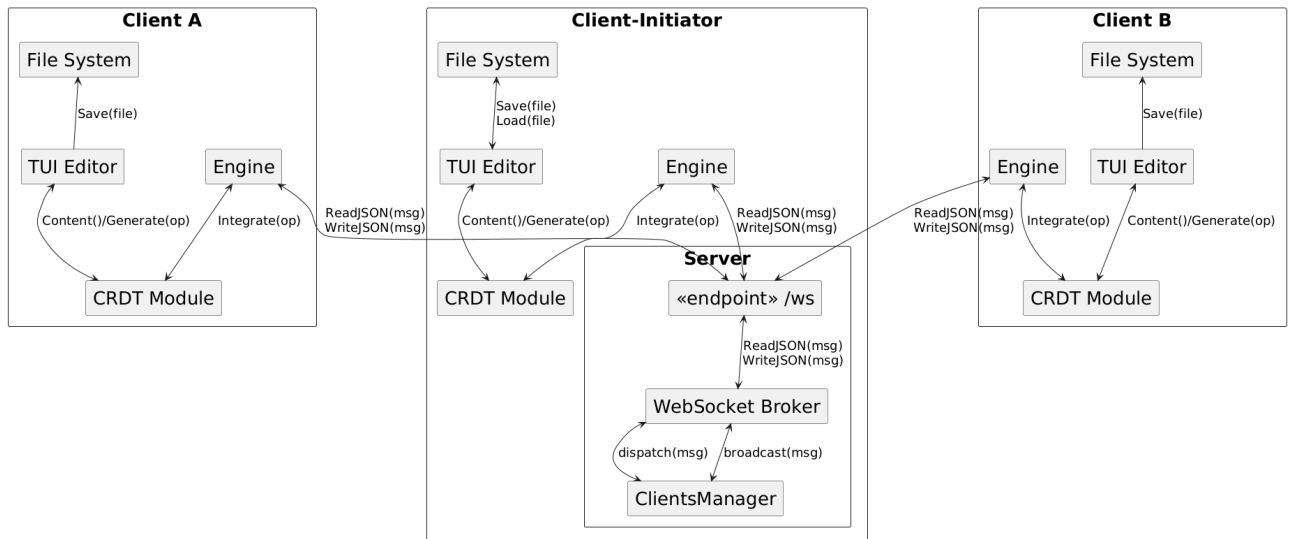


Рисунок 14 — Итоговая архитектура программного решения

Представленная гибридная клиент-серверная архитектура сочетает децентрализованный подход к синхронизации данных через CRDT с централизованным управлением подключениями через WebSocket-сервер, что обеспечивает оптимальный баланс между автономностью клиентов и контролем над совместным сеансом редактирования. Серверная часть, состоящая из WebSocket Broker и ClientManager, выполняет минимальную роль маршрутизатора сообщений между клиентами, не участвуя в обработке операций изменения или разрешении конфликтов, что снижает нагрузку на инфраструктуру. По сравнению с чистыми P2P-решениями, данный подход проще в реализации и масштабировании, а в отличие от полностью серверных систем на базе Operational Transformation, не требует сложной логики разрешения конфликтов на стороне сервера и хранения состояния документа. Ключевым компромиссом является увеличенное потребление памяти на

клиентах из-за особенностей CRDT, сохраняющего историю операций, что, однако, оправдано для сценариев работы с текстовыми файлами умеренного размера в условиях ограниченной инфраструктуры.

3 ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

3.1 Сфера применения программного продукта

Разработанное решение ориентировано на профессиональные команды, работающие в условиях ограниченной или полностью отсутствующей возможности подключения к внешней инфраструктуре. Продукт создан специально для организаций, где критически важными являются такие факторы как автономность работы, безопасность обработки данных и минимальные требования к техническому оснащению рабочих мест.

Основное назначение приложения — обеспечение эффективной коллективной работы с текстовыми файлами различного назначения. Система одинаково хорошо подходит для совместного редактирования программного кода, работы с конфигурационными файлами серверов и сетевого оборудования, создания и корректировки технической документации. Уникальная особенность решения заключается в реализации механизма синхронизации изменений в режиме реального времени, что позволяет участникам рабочего процесса оперативно взаимодействовать и видеть все вносимые правки моментально.

Ключевыми пользователями могут стать специалисты, которым необходимо быстро вносить правки в общие файлы без зависимости от сложных IDE, облачных сервисов или стабильного интернет-соединения. Продукт особенно актуален в средах, где использование сторонних решений ограничено или запрещено.

Программный продукт может быть полезен в оборонной и энергетической отраслях. Организации, функционирующие в изолированных сетях, смогут использовать приложение для совместной работы над конфигурационными файлами, технической документацией или анализом логов без необходимости подключения к Интернету. Банки и другие финансовые

учреждения, где требования к безопасности данных высоки, также смогут применять приложение для внутреннего взаимодействия, исключая риски, связанные с использованием облачных сервисов.

3.2 Диаграмма вариантов использования

Варианты использования программного решения охватывают полный цикл работы с текстовыми документами в условиях коллективного редактирования. Система предоставляет возможность выбора существующего файла из файловой системы или создания нового документа для совместной работы. Каждый участник процесса идентифицируется по уникальному имени, что обеспечивает персонализацию вносимых изменений и контроль авторства правок. Диаграмма представлена на Рисунке 15.

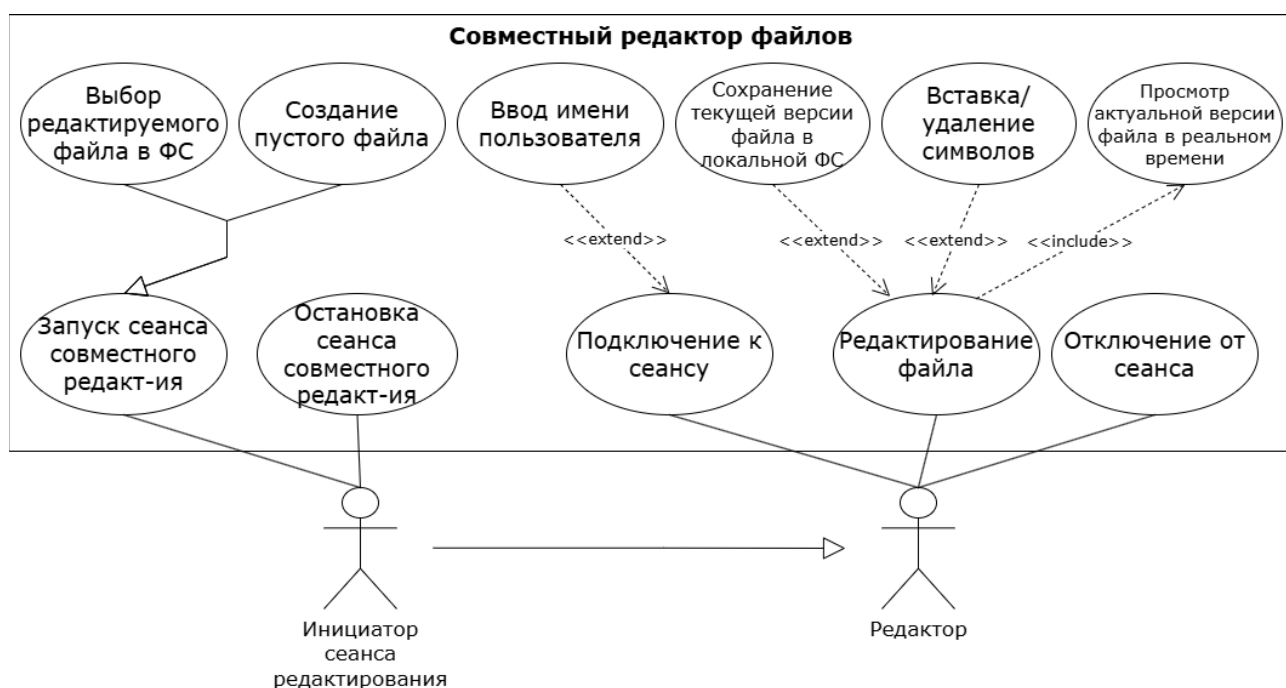


Рисунок 15 — Диаграмма вариантов использования

В системе предусмотрено два типа пользователей с разным уровнем доступа: инициатор сеанса редактирования и редактор. Принципиальное

отличие заключается в том, что инициатор обладает всем функционалом обычного редактора, дополненным административными возможностями управления сеансом.

Инициатор сеанса совмещает две ключевые роли. С одной стороны, он выполняет все операции по работе с текстом — вносит изменения, просматривает актуальную версию файла, взаимодействует с содержимым документа в реальном времени. С другой стороны, только ему доступны функции управления жизненным циклом сеанса, включая его запуск, остановку и настройку базовых параметров работы. Такой подход обеспечивает целостность системы, позволяя одновременно участвовать в редактировании и контролировать процесс коллективной работы.

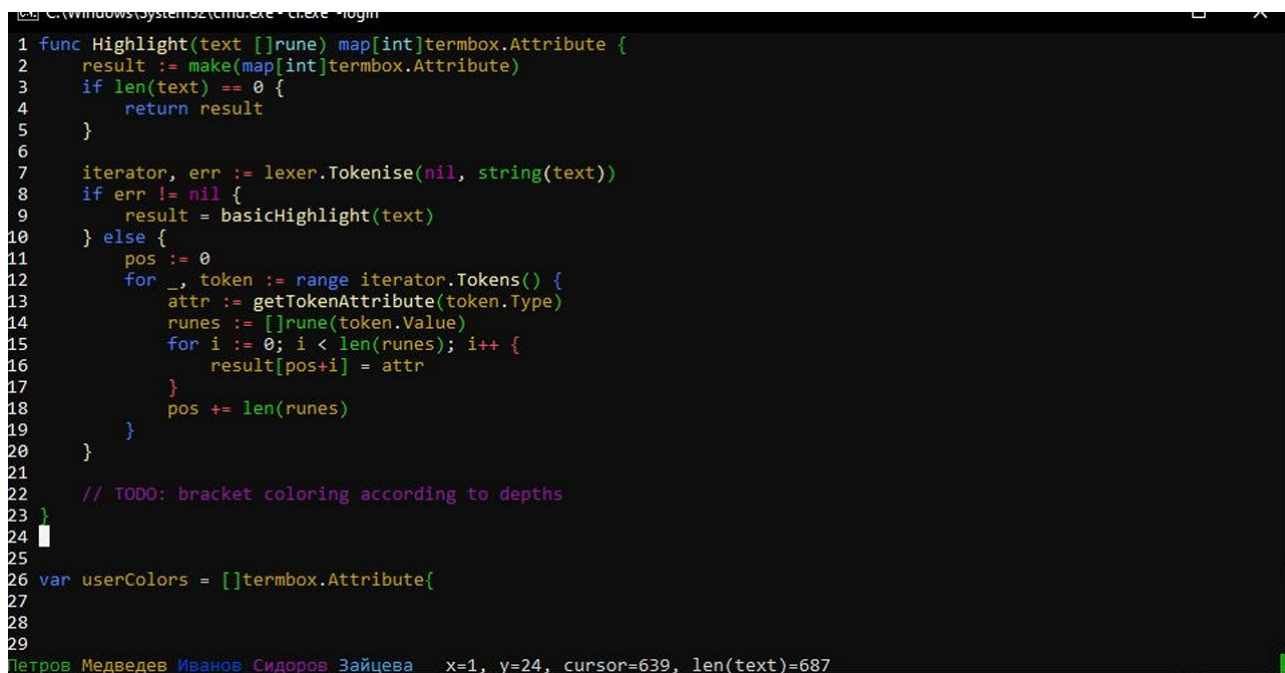
Обычные редакторы обладают стандартным набором возможностей, ограниченным непосредственно работой с текстом. Они могут подключаться к активному сеансу, вносить правки, отслеживать изменения других участников, сохранять актуальную версию редактируемого файла и отключаться по завершении работы.

3.3 Интерфейс редактора

Разработанное приложение предлагает текстовый пользовательский интерфейс (TUI). Этот подход обеспечивает минималистичное, но функциональное взаимодействие с системой через командную строку, что полностью соответствует требованиям автономности и работы в ограниченных средах исполнения.

Интерфейс разделен на две основные области: рабочую зону редактирования и строку состояния. В рабочей зоне пользователь может свободно перемещать курсор, вводить и удалять символы, а также просматривать изменения, вносимые другими участниками сессии в реальном

При работе с кодом поддержана возможность активации режима подсветки синтаксиса и нумерации строк. Данный режим сочетает в себе функциональность стандартного режима редактирования текста и дополнительные возможности, упрощающие написание и анализ кода. Интерфейс редактора в режиме работы с кодом представлен на Рисунке 17.



```
1 func Highlight(text []rune) map[int]termbox.Attribute {
2     result := make(map[int]termbox.Attribute)
3     if len(text) == 0 {
4         return result
5     }
6
7     iterator, err := lexer.Tokenise(nil, string(text))
8     if err != nil {
9         result = basicHighlight(text)
10    } else {
11        pos := 0
12        for _, token := range iterator.Tokens() {
13            attr := getTokenAttribute(token.Type)
14            runes := []rune(token.Value)
15            for i := 0; i < len(runes); i++ {
16                result[pos+i] = attr
17            }
18            pos += len(runes)
19        }
20    }
21
22    // TODO: bracket coloring according to depths
23 }
24
25
26 var userColors = []termbox.Attribute{
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
2567
2568
2569
2570
2571
2572
2573
2574
2575
2576
2577
2578
2579
2580
2581
2582
2583
2584
2585
2586
2587
2588
2589
2590
2591
2592
2593
2594
2595
2596
2597
2598
2599
2600
2601
2602
2603
2604
2605
2606
2607
2608
2609
2610
2611
2612
2613
2614
2615
2616
2617
2618
2619
2620
2621
2622
262
```

осуществляется командой вида *«go run main.go --server 192.168.0.10:8080 --name user1»*, где указывается IP-адрес сервера и имя пользователя.

После установления соединения клиент получает уникальный идентификатор, загружает актуальное состояние текста и открывает терминальный интерфейс редактора. Пользователь может выполнять операции ввода, удаления и перемещения по тексту, а все изменения передаются остальным участникам сессии в режиме реального времени.

3.5 Сравнение с существующими решениями

Разработанное решение обладает рядом ключевых преимуществ по сравнению с популярными аналогами в рамках работы в изолированных средах. В отличие от облачных сервисов вроде Google Docs, требующих постоянного интернет-соединения и аккаунта Google, разработанное приложение полностью автономно и не требует подключения к сети для организации сеанса совместного редактирования.

По сравнению с редактором с открытым исходным кодом Etherpad, которому необходима инфраструктура Node.js и база данных, разработанная программа не имеет внешних зависимостей и запускается как самостоятельный исполняемый файл.

Важным отличием от комбинации редактора кода и расширения для совместной работы VS Code Live Share является отсутствие необходимости в наличии стороннего программного обеспечения в виде определенного кодового редактора и использовании сетевых сервисов. Терминальный интерфейс разработанного решения обеспечивает работу в минималистичной среде без графической оболочки, что выгодно отличает его от веб-интерфейсов Etherpad и Google Docs, требующих полноценного браузера, то есть предъявляющих определенные требования к окружению исполнения.

Эти особенности делают разработанный редактор оптимальным выбором для сценариев, где критически важны автономность, минимальные требования к инфраструктуре и работа в защищенных изолированных сетях, где доступ к Интернету может быть ограничен или полностью исключен. Более детальный сравнительный анализ отображен в таблице 5.

Таблица 5 — Сравнение разработанного решения с существующими аналогами

Критерий/ Программное решение	Разработанная программа	Etherpad	Google Docs	VS Code Live Share
Автономность	полная	полная	нет, работа через облако Google	нет, работа через сервисы Microsoft
Интерфейс	терминальный UI	веб- интерфейс	веб- интерфейс, мобильное приложение	кодовый редактор VS Code
Внешние зависимости	нет	node.js, npm, браузер, БД	браузер, аккаунт Google	кодовый редактор, расширение Share
Типы файлов	текстовые	текстовые	текстовые, Docx, ODT, PDF	текстовые
Подсветка синтаксиса	встроенная	нет без внешних расширений	нет	встроенная

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была разработана архитектура, реализована и протестирована система для совместного редактирования текстовых файлов в терминальном интерфейсе. Поставленная цель была достигнута посредством реализации клиент-серверного взаимодействия на основе WebSocket-протокола, использования бесконфликтных реплицированных структур данных (CRDT), а также проектирования текстового пользовательского интерфейса (TUI), не требующего наличия графической среды.

Ключевым достижением проекта стало создание полноценного многопользовательского редактора, способного обрабатывать параллельные изменения в документе и сохранять согласованность между всеми участниками сессии. Благодаря использованию алгоритма WOOT, структура документа на каждом клиентском узле может эволюционировать независимо, а затем синхронизироваться с другими участниками без потери данных и конфликтов. Выбранный стек технологий — язык программирования Go и библиотеки *«termbox-go»* и *«gorilla/websocket»* — позволил достичь высокой производительности, надежности и минимального потребления ресурсов. Реализация многопоточности через горутины, синхронизация с использованием мьютексов и каналов обеспечили потокобезопасное управление состоянием как на клиентской, так и на серверной стороне приложения.

Разработанное приложение демонстрирует, что совместное редактирование возможно и в условиях ограниченной вычислительной среды, без зависимости от браузеров и облачной инфраструктуры. Оно может быть полезно в профессиональных сферах, где требуется автономность и повышенные требования к контролю информационного обмена — например, в корпоративных или производственных сетях. Кроме того, архитектурные принципы и модульная реализация создают основу для последующего

расширения проекта: внедрения шифрования трафика, поддержки вложенных документов, версии P2P-синхронизации и интеграции с внешними инструментами анализа текстов и логов.

Таким образом, результаты работы представляют собой практическое решение, сочетающее в себе актуальные подходы к распределенной обработке данных, параллелизму и устойчивости, и могут быть использованы как основа для дальнейших исследований и инженерных разработок в области автономного многопользовательского программного обеспечения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gérald Oster, Pascal Urso, Pascal Molli, Abdessamad Imine. Data Consistency for P2P Collaborative Editing — URL: <https://inria.hal.science/inria-00108523/document> (дата обращения 25.03.2025)
2. GitHub – nsf/termbox-go: Pure Go termbox implementation. — URL: <https://github.com/nsf/termbox-go> (дата обращения: 01.04.2025).
3. GitHub – gorilla/websocket: A Go implementation of the WebSocket protocol. — URL: <https://github.com/gorilla/websocket> (дата обращения: 01.04.2025).
4. Go Documentation — The Go Programming Language. — URL: <https://golang.org/doc/> (дата обращения: 05.04.2025).
5. JSON — The JSON Data Interchange Standard. — URL: <https://www.json.org/json-en.html> (дата обращения: 05.04.2025).
6. WebSocket API — MDN Web Docs. — URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebSocket> (дата обращения: 01.04.2025).
7. Викиконспекты. CRDT. — URL: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=CRDT> (дата обращения 10.03.2025).
8. Операциональные преобразования — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Операциональное_преобразование (дата обращения 14.03.2025).
9. Chengzheng Sun, Real Differences between OT and CRDT for Co-Editors — URL: <https://arxiv.org/pdf/1810.02137v1> (дата обращения 20.03.2025).
10. Geoffrey Litt, A CRDT for Collaborative Rich Text Editing — URL: https://groups.csail.mit.edu/sdg/pubs/2022/Peritext_PACM_HCI_2022.pdf (дата обращения 20.03.2025)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходный код

На рисунке А.1 изображен QR-код со ссылкой на GitHub репозиторий с исходным кодом разработанного программного продукта.

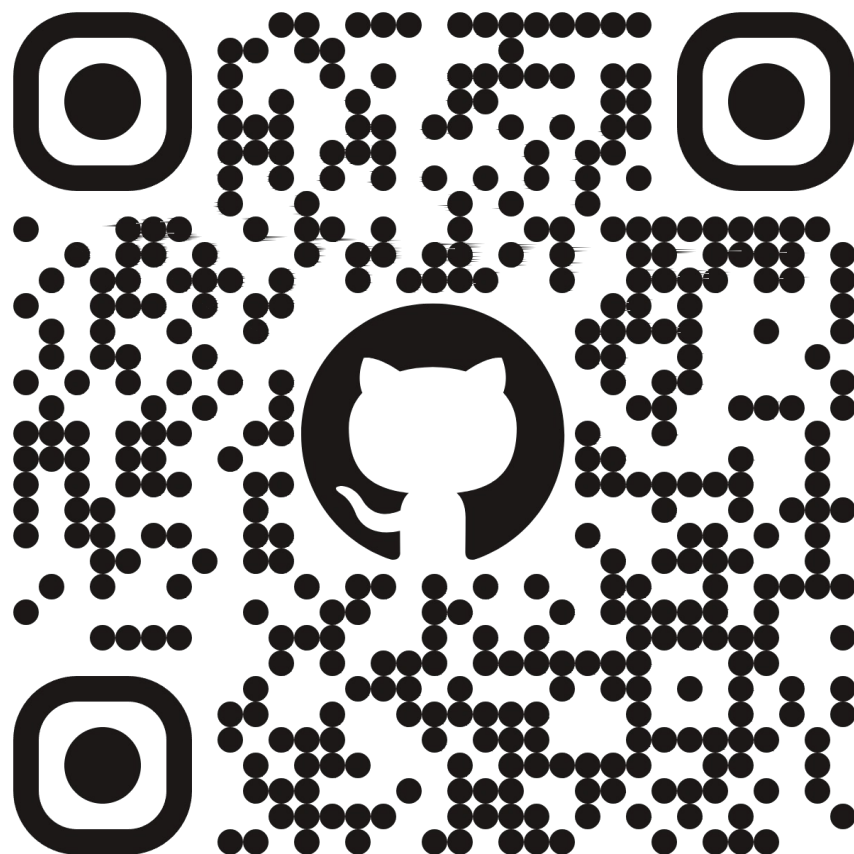


Рисунок А.1 — QR-код на репозиторий