Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования

«СКОЛКОВСКИЙ ИНСТИТУТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ»

(Сколковский институт науки и технологий)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

ОТЧЁТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Создание макета квантового сенсора для перспективного оптического гравипотенциометра

(шифр НИР: «КС-ОГП»)

СТПВ.430369.001Д1

Москва 2025

**СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Руководитель НИР,  Заведующий лабораторией системных исследований проблем измерения времени и частоты проектного центра прикладной фотоники и квантовых технологий, PhD | подпись, дата | И.В. Шерстов  (введение, заключение, раздел 1,2) |
|  |  |  |
|  |  |  |
| Инженер-исследователь | подпись, дата | Т.С. Аббасов  (введение, заключение, раздел 1, 2, 3, 4) |
| Инженер-исследователь | подпись, дата | С.А. Зибров  (раздел 4) |
| Инженер-исследователь | подпись, дата | А.Д. Алексанян  (раздел 3) |
| Инженер-исследователь, к.х.н. | подпись, дата | К.В. Маерле  (раздел 1) |
| Нормоконтроль | подпись, дата | Н.К. Ананян |

# **РЕФЕРАТ**

# **СОДЕРЖАНИЕ**

[**РЕФЕРАТ** 3](#_Toc201158743)

[**СОДЕРЖАНИЕ** 4](#_Toc201158744)

[**ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ** 5](#_Toc201158745)

[**ВВЕДЕНИЕ** 7](#_Toc201158746)

[**1.** **Обзор** 8](#_Toc201158747)

[**2.** **Использование сервера времени в качестве БССС для МКА.** 9](#_Toc201158748)

[**2.1.** **Структура сервера времени** 9](#_Toc201158749)

[**3.** **Анализ возможностей интеграции рубидиевого стандарта частоты с сервером времени.** 10](#_Toc201158750)

[**3.1.** **Технические характеристики рубидиевого стандарта частоты** 10](#_Toc201158751)

[**3.2.** **Описание сервера времени** 10](#_Toc201158752)

[**3.3.** **Возможности интеграции** 11](#_Toc201158753)

[**3.4.** **Перспективы использования в других решениях.** 13](#_Toc201158754)

[**4.** **Результаты и рекомендации** 15](#_Toc201158755)

[**4.1.** **Результаты** 15](#_Toc201158756)

[**4.2.** **Рекомендации** 15](#_Toc201158757)

[**4.2.1.** **Тестирование в условиях имитации космической среды** 15](#_Toc201158758)

[**4.2.2.** **Внедрение в перспективные космические миссии** 16](#_Toc201158759)

# **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

В настоящем отчёте используются термины, их определения и сокращения:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| БССС | – | бортовая система синхронизации и сличения |
| ГЛОНА́СС |  | глобальная навигационная спутниковая система |
| ГНСС | ‒ | глобальная навигационная спутниковая система |
| КМОП | ‒ | комплементарная структура металл-оксид-полупроводник |
| МКА | – | малый космический аппарат |
| ПИД |  | пропорционально-интегрально-дифференциальный |
| ПЛИС | ‒ | программируемая логическая интегральная схема |
| ТТЛ | ‒ | транзисторно транзисторная логика |
| ЦАП |  | цифро-аналоговый преобразователь |
| GPS |  | Global Position System |
| PPS |  | Pulse Per Second |
| PTP | ‒ | Precision Time Protocol |
| NTP | ‒ | Network Time Protocol |
| NMEA |  | National Marine Electronics Association |

# **Введение**

Для обеспечения точного времени на борту малых космических аппаратов (МКА) применяются бортовые системы синхронизации и сличения (БССС), которые могут включать:

* внешние источники времени (Глонасс (ГНСС), сигналы с наземных станций),
* автономные стандарты частоты (атомные часы, термостабилизированные кварцевые генераторы),
* алгоритмы коррекции и синхронизации (Precision Time Protocol (PTP), Network Time Protocol (NTP), алгоритмы прогнозирования дрейфа).

Целью работы является изучение использования сервера времени в качестве бортовой системы синхронизации и сличения.

# **Использование сервера времени в качестве БССС для МКА.**

Сервер времени — это устройство или программно-аппаратный комплекс, предназначенный для точного хранения, обработки и распределения временных меток. В контексте космических аппаратов он может выступать в качестве центрального элемента БССС, интегрируя внешние и внутренние источники времени.

## **Структура сервера времени**

Основные компоненты сервера времени в составе БССС МКА представлены в таблице 1.

Таблица 2.1 - Основные компоненты сервера времени

|  |  |
| --- | --- |
| Компонент | Функция |
| 1 | 2 |
| Источник времени | ГНСС-приемник, рубидиевый стандарт частоты, кварцевый генератор |
| Процессор синхронизации | Реализует алгоритмы (PTP, NTP, фильтр Калмана) для коррекции временных меток |
| Интерфейсы связи | Радиоканал, лазерная связь, межспутниковый обмен данными |
| Память и логирование | Хранение временных меток, ведение журнала событий |

Варианты реализации

1. автономный сервер (на базе ПЛИС/микроконтроллера) — компактное решение.
2. программный сервер (на бортовом компьютере) — гибкость, но выше задержки.
3. гибридная система — комбинация аппаратного и программного обеспечения

# **Анализ возможностей интеграции рубидиевого стандарта частоты с сервером времени.**

## **Технические характеристики рубидиевого стандарта частоты**

Рубидиевый стандарт с выходом 10 МГц со следующими параметрами:

Точность: ±5×10⁻¹¹ (после калибровки).

Стабильность:

* Краткосрочная (1 сек): ≤1×10⁻¹¹.
* Долгосрочная (сутки): ≤5×10⁻¹².

Выходной сигнал: Синусоида или меандр 10 МГц (уровень ТТЛ/КМОП, 50 Ом).

Отсутствие ежесекундного импульса (PPS) усложняет синхронизацию времени цифровыми методами связи.

## **Описание сервера времени**

Сервер времени — это устройство, которое распределяет точное время по сети, используя протоколы синхронизации (NTP, PTP).

Типовые характеристики:

Протоколы: NTP (SNTP), PTP (IEEE 1588-2008), PPS.

Точность синхронизации:

* NTP: 100 мкс – 10 мс (зависит от сети),
* PTP: 10 – 100 нс (в локальной сети).

Источники времени:

* Встроенные (OCXO, рубидиевый стандарт),
* Внешние (GPS/ГЛОНАСС).

Интерфейсы:

* Ethernet (1G/10G), упрощенный Ethernet для космических аппаратов (SpaceWire)
* Выходы PPS, 10 МГц,

Сервер времени должен уметь:

* Принимать внешний опорный сигнал 10 МГц.
* Генерировать метки времени (PPS) на основе этого сигнала.
* Поддерживать протоколы: NTP, PTP, PPS.

Сервер времени в составе БССС МКА должен быть реализован на основе радиационно-стойких компонентов.

Дополнительным элементом сервера является GPS/ГЛОНАСС-приемник, который сформирует NMEA пакеты и скорректирует долговременный дрейф рубидиевого стандарта.

## **Возможности интеграции**

Использование рубидиевого в текущем исполнении в космических аппаратах и наземных телекоммуникационных системах синхронизации времени возможно только вместе с сервером времени посредством прямой передачи выходной частоты 10 МГц на сервер. GPS-дисциплинированный модуль сервера времени позволит скорректировать фазу 10 МГц от рубидиевого стандарта и получить на выходе стабильные 10 МГц, привязанные по фазе к сигналу PPS, что позволит использовать устройство в МКА для внутренней синхронизации и стандартов PTP и NTP.

Предлагается несколько сценариев использования подобной системы:

* Автономный режим (без GPS, на высоких орбитах): сервер времени работает только от рубидиевого генератора.
* Гибридный режим (GPS + рубидиевый генератор), обеспечивающий стабильность при кратковременной потере GPS.
* Резервирование: При отказе GPS на низких орбитах сервер переключается на рубидиевый стандарт.

Для оптимизации работы системы в условиях переменных факторов (таких как изменение температуры, радиационное воздействие и временная потеря сигнала ГНСС) необходима разработка алгоритмов адаптивной синхронизации, которые будут использовать:

* Фильтр Калмана для прогнозирования дрейфа частоты рубидиевого стандарта.
* Машинное обучение для анализа исторических данных и корректировки параметров синхронизации в реальном времени.
* Динамическое переключение между источниками времени (ГНСС, рубидиевый стандарт, кварцевый генератор) на основе оценки их текущей точности и надежности.

Вышеуказанные сценарии и алгоритмы позволят реализовать необходимые для БССС функции сервера времени, а именно:

* Формирование и хранение шкалы времени

Сервер времени позволит реализовать бортовые часы реального времени , хранить шкалу времени в энергонезависимой памяти . Внутренняя шкала будет синхронизироваться с внешними источниками по сетевым протоколам при наличии сигнала ГНСС на низких орбитах и связи с наземными станциями по протоколам NTP/PTP.

* Формирование секундного импульса (PPS)

Генерация PPS возможна на основе счётчика-делителя частоты, встроенного в управляющей микропроцессор и синхронизированного с 10 МГц. Также это позволит корректировать длительность и фазу PPS сигнала относительно внешнего эталона (GPS/ГЛОНАСС) с помощью алгоритма цифровой подстройки.

* Коррекция частоты от внешнего эталонного сигнала частоты

Использование фазового детектора на базе отдельной микросхемы позволит сравнивать внутренний сигнал 10 МГц с внешним эталоном, а генерация управляющего напряжения на позволит подстраивать частоту в необходимых пределах.

* Коррекция секундных импульсов от внешнего эталонного сигнала секундного импульса

Сравнение внутреннего PPS с внешним (в частности, от GPS) с помощью временного интервального счетчика и коррекция задержки через цифровой интерфейс управления.

* Коррекция цифровым кодом частоты генератора

Использование цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) для управления частотой рубидиевого стандарта через цифровой интерфейс. Встроенный алгоритм автоматической подстройки на базе ПИД-регулятора в микроконтроллере позволит подстраивать частоту самостоятельно.

* Коррекция цифровым кодом секундного импульса (PPS)

Программная регулировка фазы PPS через задержку в микропроцессоре с шагом 1 нс с помощью микросхемы цифрового синтезатора частоты.

* Коррекция цифровым кодом формируемой шкалы времени

Внесение поправок в шкалу времени через команды по интерфейсу RS-232/USB. А также применение фильтра Калмана для компенсации систематических ошибок.

## **Перспективы использования в других решениях.**

Дополнительно исследование возможностей интеграции атомного стандарта частоты на основе рубидиевой ячейки с серверами точного времени показало, что устройство может быть использовано в оборудовании для построения высокоточной сетевой системы синхронизации времени.

Высокоточная система синхронизации в сетевой инфраструктуре необходима для обеспечения корректной работы современных телекоммуникационных и IT-систем. Вот основные причины её важности:

1. Синхронизация в сетях передачи данных (5G, LTE, IP-сети)

В мобильных сетях (4G/5G) базовые станции должны быть синхронизированы с точностью до микро- или наносекунд для корректного управления радиоканалами и предотвращения интерференции.

В IP-сетях (для VoIP, видеоконференций) рассинхронизация вызывает джиттер и потерю пакетов.

1. Финансовые транзакции и биржевая торговля

В высокочастотной торговле (HFT) даже микросекундная задержка может привести к финансовым потерям. Точное время позволяет точно фиксировать время сделок.

1. Энергосистемы и Smart Grid

В электроэнергетике синхронизация ( по стандарту IEEE 1588) нужна для мониторинга фаз тока и напряжения в реальном времени, что критично для стабильности сети.

1. Транспорт и логистика

В системах управления движением (железные дороги, авиация) точное время необходимо для координации датчиков, светофоров и систем автоматизации.

1. Кибербезопасность и аудит

Логи событий в распределённых системах должны иметь точные временные метки для расследования инцидентов.

1. Научные и распределённые вычисления

В суперкомпьютерах и кластерах синхронизация критична для корреляции событий.

# **Результаты и рекомендации**

## **Результаты**

Определены основные методы интеграции рубидиевого стандарта с серверами времени.

* Прямое подключение 10 МГц.
* Гибридный режим (GPS + рубидий).

Показана возможность построения отказоустойчивых систем времени.

Для повышения функциональности и удобства использования рубидиевого генератора рекомендуется:

1. Оснащение цифровым интерфейсом управления

Добавление стандартных интерфейсов (RS-232, USB, Ethernet) позволит:

* Встраивать устройство в автоматизированные системы без дополнительных аппаратных преобразователей.
* Упростить удалённый мониторинг и управление параметрами.
* Реализовать самодостаточное решение с возможностью программной коррекции.

1. Последующая программная поддержка

Которая позволит:

* Управление через AT-команды или ПО.
* Сбор данных о дрейфе частоты через скрипты.
* Интеграция с системами логирования.

Итог:

Цифровизация управления превращает рубидиевый генератор в универсальный компонент временной инфраструктуры, устраняя необходимость во внешних корректорах частоты.

## **Рекомендации**

## **Тестирование в условиях имитации космической среды**

Для подтверждения работоспособности системы в реальных условиях необходимо провести следующие испытания:

* Термовакуумные тесты для оценки стабильности работы при экстремальных температурах и в вакууме.
* Радиационные испытания для проверки устойчивости электронных компонентов к ионизирующему излучению.
* Вибрационные тесты для имитации нагрузок при запуске ракеты-носителя.
* Тесты на электромагнитную совместимость для исключения влияния помех на работу системы.

## **Внедрение в перспективные космические миссии**

Система синхронизации на основе рубидиевого стандарта и сервера времени может быть использована в следующих проектах:

* Лунные и марсианские миссии:

Обеспечение точного времени для навигации и связи в условиях отсутствия ГНСС.

Синхронизация научных экспериментов и работы роверов.

* Группировки спутников (например, CubeSat):

Координация работы спутников в режиме реального времени.

Поддержка межспутниковой связи для распределенных измерений.

* Квантовые коммуникации

Обеспечение синхронизации для систем квантовой криптографии и передачи данных.

Использование в проектах по созданию глобальных квантовых сетей.