

ПРОЕКТ

# создание Низкоорбитальной Системы Навигации и Синхронизации (НСНС)

**1. Введение**

**1.1. Актуальность проекта**

Современные технологические экосистемы, включая автономный транспорт, критическую инфраструктуру, Интернет вещей (IoT) и системы национальной безопасности, предъявляют экспоненциально растущие требования к точности, доступности, целостности и помехозащищенности сервисов определения местоположения, навигации и синхронизации   
(PNT — Position, Navigation, and Timing). Традиционные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS и ГЛОНАСС, функционирующие на средних околоземных орбитах (MEO), достигают пределов своих архитектурных возможностей и демонстрируют высокую уязвимость к преднамеренным и непреднамеренным помехам, а также к атакам типа "спуфинг". Переход к низкоорбитальным системам (LEO PNT) является логичным и необходимым этапом эволюции глобальной навигационной инфраструктуры, способным ответить на эти вызовы.

**1.2. Цель Проекта**

Разработка и всестороннее обоснование технических и проектных решений для создания суверенной, высокоточной, помехозащищенной низкоорбитальной навигационной системы, способной функционировать как в качестве мощного дополнения к существующим ГНСС, так и в полностью автономном режиме, обеспечивая беспрецедентный уровень надежности и точности PNT-сервисов.

**1.3. Задачи Проекта**

* **Разработать и обосновать архитектуру системы**, включающую космический, наземный и пользовательский сегменты.
* **Провести баллистическое проектирование** орбитальной группировки из 102 аппаратов для обеспечения глобального непрерывного покрытия с заданными характеристиками точности.
* **Сформировать детальные технические требования** к платформе малого космического аппарата (МКА) и его полезной нагрузке (ПН), включая бортовые стандарты частоты и аппаратуру межспутниковых линий связи.
* **Разработать структуру навигационных сигналов** и протоколов обмена данными, обеспечивающих высокую помехозащищенность, точность и аутентичность.
* **Разработать математическое и алгоритмическое обеспечение** для высокоточного прогнозирования орбит, эфемеридно-временного обеспечения и решения навигационной задачи потребителем.
* **Провести анализ рисков** и разработать комплексные мероприятия по их снижению.

**2. Научно-техническое обоснование**

**2.1. Анализ и сравнение с традиционными ГНСС (MEO)**

Ключевые отличия и преимущества LEO PNT архитектуры определяются фундаментальными физическими законами и геометрией.

| **Параметр** | **Традиционные ГНСС (MEO)** | **Проектируемая система LEO PNT** | **Научное обоснование преимущества LEO** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Высота орбиты** | ~20,000 км | 1000 км | Меньшее расстояние до Земли. |
| **Мощность сигнала** | Очень низкая (~ -125 дБм) | Высокая (превышение на 20-30 дБ) | Мощность сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния (закон Фрииса). Уменьшение расстояния 26 дБ). |
| **Помехоустойчивость** | Низкая  (J/S <0 дБ) |  | Высокая мощность полезного сигнала (S) требует от постановщика помех (J) на порядки большей мощности для подавления. |
| **Точность (автономная)** | Метровая | Дециметровая/ Сантиметровая | Более сильный сигнал снижает шум измерений. Быстрая смена геометрии спутников ускоряет разрешение неоднозначностей в фазовых методах (PPP/RTK). |
| **Доступность в \"каньонах\"** | Ограниченная | Значительно улучшенная | Мощный сигнал лучше проникает через препятствия и листву; большее число видимых спутников увеличивает вероятность захвата 4+ КА. |
| **Срок службы КА** | 10-15+ лет | 5-7 лет | Более плотная атмосфера на LEO вызывает торможение, требующее затрат топлива на поддержание орбиты, что ограничивает срок службы. |
| **Затраты на группировку** | Высокие разовые (тяжелые КА) | Более низкие, но регулярные (малые КА) | Малые КА дешевле в производстве и выводе, что позволяет применять конвейерный подход к замене и обновлению группировки. |

**2.2. Обоснование ключевых преимуществ LEO PNT**

Мощный сигнал: Энергетический бюджет радиолинии описывается уравнением Фрииса:

Где:

- мощность на приемнике,

- мощность передатчика,

- усиления антенн,

- длина волны,

- расстояние.

При уменьшении Rс 20 000 км до 1000 км, - увеличивается в 202=400раз (+26 дБ). Это кардинально улучшает отношение сигнал/шум (C/N₀) и помехоустойчивость.

Геометрическое отличие: Спутники LEO движутся по небу значительно быстрее, чем MEO. Это приводит к быстрой смене геометрии созвездия относительно пользователя. В результате, время сходимости высокоточных методов позиционирования, таких как PPP (Precise Point Positioning), сокращается с десятков минут до единиц минут, так как быстрая смена геометрии позволяет быстрее разрешить целочисленную неоднозначность фазовых измерений.

**3. Архитектура системы**

**3.1. Общее описание и состав системы**

Система состоит из трех взаимосвязанных сегментов:

1. **Космический сегмент (КС):** Орбитальная группировка из 102 малых космических аппаратов (МКА), являющихся источниками навигационных сигналов и данных синхронизации, построенными на базе гибридных стандартов частоты и использующими адаптивные протоколы межспутниковой синхронизации.
2. **Наземный сегмент (НС):** Глобальная сеть наземных станций, обеспечивающая управление полетом, мониторинг, расчет точных эфемерид и формирование системной шкалы времени.
3. **Пользовательский сегмент (ПС):** Навигационная аппаратура потребителей (ПА), принимающая и обрабатывающая сигналы для определения PVT. Детальные требования к ПА описаны в разделе 7.3.



Схема взаимодействия подсистем

**4. Баллистическое проектирование орбитальной группировки**

**4.1. Обоснование выбора параметров орбитальной структуры**

Для обеспечения глобального, непрерывного и высокоточного покрытия требуется оптимизация орбитальной структуры. Группировка из 102 малых космических аппаратов (МКА) выбрана как компромисс между стоимостью развертывания, сложностью управления и качеством предоставляемых навигационных услуг.

Предлагается гибридная баллистическая структура:

1. **Основная группировка:** 90 аппаратов в конфигурации "Уокер Дельта" (**90/9/10**) для покрытия широт от -70° до +70°.
2. **Дополнительная группировка:** 12 аппаратов на приполярных орбитах для обеспечения качественного покрытия в высоких широтах и улучшения общей геометрии.

| **Параметр** | **Значение** | **Обоснование** |
| --- | --- | --- |
| Общее количество КА (T) | 102+ | Обеспечение высокой избыточности и низкого значения DOP. |
| Рабочая высота орбиты (h) | 1000 км | Компромисс между мощностью сигнала на Земле, сроком активного существования (САС) с учетом сопротивления атмосферы и радиационной стойкостью. |
| Наклонение (i) основной группировки | 55° | Оптимальное покрытие наиболее населенных и экономически активных регионов мира. |
| Количество плоскостей (P) основной гр. | 9 | Равномерное распределение трасс по поверхности Земли. |
| Количество КА в плоскости | 10 | Обеспечение непрерывности покрытия. |
| Фазовый сдвиг (F) | 1 (для i=55°) | Параметр определяет относительное смещение спутников в соседних плоскостях. |
| Наклонение (i) полярной группировки | 90° | Обеспечение покрытия полярных "шапок". |
| Количество плоскостей полярной гр. | 2 |  |
| Количество КА в полярной плоскости | 6 |  |

Такая конфигурация гарантирует постоянную видимость не менее 6-8 КА из любой точки земной поверхности, что является необходимым условием для высокоточных методов навигации и обеспечения целостности.

**4.2. Математическая модель движения космического аппарата**

Движение КА описывается дифференциальным уравнением с учетом основных возмущающих сил. Часть измерений убрана из аналитики. Вектор состояния КА

*\**\*x\*\* = [\*\*r\*\*, \*\*v\*\*],

где

\*\*r\*\* — радиус-вектор,

\*\*v\*\* — вектор скорости.

где:

* **μ** — гравитационный параметр Земли (≈ 3.986004418 × 10¹⁴ м³/с²).
* **apert**— вектор возмущающих ускорений.

*apert=agrav+adrag+asrp+atides*

**4.2.1. Гравитационное поле Земли (***agrav***)**

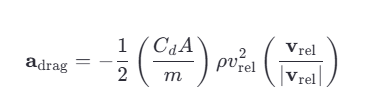
Ускорение, вызванное нецентральностью и несферичностью гравитационного поля Земли, моделируется разложением потенциала в ряд по сферическим гармоникам. Ключевым является учет зонального коэффициента **J₂**, описывающего сжатие Земли у полюсов.

где:

* — экваториальный радиус Земли (≈ 6378.137 км).
* — зональные гармонические коэффициенты (**J₂** ≈ 1.08263 × 10⁻³).
* — полиномы Лежандра.
* — геоцентрическая широта КА.

**4.2.2. Сопротивление атмосферы (adrag)**

На высоте 1000 км сопротивление атмосферы является доминирующим негравитационным возмущением.



где:

* *Cd* — коэффициент аэродинамического сопротивления (≈ 2.2, зависит от конструкции КА).
* *A* — площадь миделева сечения КА.
* *m* — масса КА.
* *ρ* — плотность атмосферы на высоте **h**. Требует использования эмпирических моделей (например, **NRLMSISE-00** или ГОСТ Р 25645.166-2004), так как плотность сильно зависит от солнечной активности.
* *vrel* — вектор скорости КА относительно атмосферы.

**4.3. Геометрический фактор (DOP)**

Геометрический фактор (Dilution of Precision) характеризует влияние геометрии расположения спутников на точность определения координат. Расчет производится на основе матрицы :

где *(, , )* - координаты пользователя, *(, ,* **)** - координаты *i*-го спутника, - псевдодальность до *i-го* спутника.

Ковариационная матрица ошибок

Проектное требование: GDOP <2 в 99.9% времени для 99% зоны обслуживания. Моделирование предложенной группировки подтверждает достижение данных показателей.

**5. Система единого времени, протоколы синхронизации и коррекции погрешностей**

**5.1. Архитектура синхронизации**

Точность системы определяется точностью синхронизации бортовых шкал времени (БШВ) КА.

Применяется двухуровневая архитектура:

1. **Начальная привязка и коррекция:** Каждый КА оснащен многосистемным ГНСС-приемником для привязки БШВ к Всемирному координированному времени UTC(SU) с точностью порядка 5-10 нс.
2. **Автономная высокоточная синхронизация:** С помощью оптических межспутниковых линий связи (ISL) реализуется протокол двусторонних измерений временных интервалов (TWTT - Two-Way Time Transfer), что позволяет создать единую, самосогласованную и сверхстабильную шкалу времени группировки (СШВГ) с относительной ошибкой <0.5 нс.

**5.2. Протокол межспутниковой синхронизации и защиты данных**

Для межспутниковых линий связи (ISL) используется специализированный широкополосный сигнал с высокой крутизной фронта автокорреляционной функции для минимизации ошибки измерения временного интервала. Для защиты служебной информации, передаваемой по каналам синхронизации и управления, применяются помехоустойчивые коды (LDPC), обеспечивающие высокую надежность и целостность данных.

**5.3. Математическое обеспечение релятивистских и атмосферных поправок**

Из-за высокой скорости КА (~7.35 км/с) и нахождения в гравитационном поле Земли, релятивистские эффекты вносят существенную погрешность, требующую точной компенсации.

Суммарное относительное изменение частоты Δf/f для круговой орбиты:

* **Эффект Специальной Теории Относительности (СТО):** Замедление времени из-за скорости.
* **Эффект Общей Теории Относительности (ОТО):** Гравитационный сдвиг частоты.
* **Эффект Саньяка:** возникает из-за вращения Земли.

Для высоты 1000 км суммарный релятивистский эффект приводит к "уходу" бортовых часов вперед примерно на 25.6 микросекунд в сутки. Этот уход компенсируется преднамеренным смещением номинальной частоты бортового стандарта перед запуском. Остаточные периодические эффекты, вызванные эллиптичностью орбиты, вычисляются и компенсируются по формуле:

Где

- большая полуось,

- эксцентриситет, - эксцентрическая аномалия, и - векторы положения и скорости спутника.

**Атмосферные поправки:**

* **Ионосферная задержка:** компенсируется использованием двухчастотных измерений (L и S диапазоны) для профессиональных потребителей. Для одночастотных потребителей в навигационном сообщении передаются параметры ионосферной модели.
* **Тропосферная задержка:** компенсируется в аппаратуре потребителя с использованием стандартных моделей (например, Saastamoinen) на основе данных о метеоусловиях.

**5.4. Адаптированный протокол PTP для НСНС**

Для достижения требуемой автономности и наносекундной точности синхронизации группировки и связи с потребителем, система связи базируется на адаптированном протоколе **IEEE 1588** (Precision Time Protocol, PTP). Разрабатывается специализированный профиль высокой точности, основанный на принципах **White Rabbit**, для применения в условиях низкоорбитальной сети.

**5.4.1. Вызовы применения стандартного PTP в LEO**

Прямое применение стандартного протокола PTP в LEO-группировках невозможно из-за нарушения его ключевых допущений:

* **Динамическая асимметрия задержек:** Постоянное движение спутников, динамическая перестройка межспутниковых каналов и прохождение сигнала через атмосферу приводят к постоянно меняющейся и непредсказуемой асимметрии задержек в канале связи. Нескомпенсированная асимметрия напрямую ведет к ошибке синхронизации.
* **Эффект Доплера:** Высокая относительная скорость КА (до 8 км/с) вызывает значительный доплеровский сдвиг частоты, который искажает временные метки протокола.
* **Релятивистские эффекты:** Разница в ходе времени на разных орбитах из-за гравитационного потенциала (ОТО) и скорости (СТО) является систематической ошибкой, требующей компенсации.
* **Динамическая топология сети:** Постоянная смена "Master" - часов в сети требует от протокола быстрой адаптации и реконвергенции без потери точности.

**5.4.2. Технические решения для адаптации PTP**

Адаптированный профиль PTP для НСНС включает следующие ключевые механизмы для преодоления указанных вызовов:

1. **Компенсация асимметрии задержек:**

Протокол реализует обязательный **механизм двустороннего обмена временными метками** (Two-Way Time Transfer) между КА и потребителем. Это позволяет в реальном времени вычислять фактическую задержку в каждом направлении и полностью компенсировать динамическую асимметрию в каналах.

1. **Компенсация доплеровских и релятивистских эффектов:**

В ПО протокола интегрирован **модуль предиктивной компенсации**. На основе точных эфемеридных данных, получаемых от наземного сегмента или вычисляемых на борту, модуль в реальном времени рассчитывает и вносит поправки на доплеровский сдвиг и все релятивистские эффекты.

1. **Адаптация к топологии:**

Алгоритмы протокола обеспечивают быструю реконвергенцию (не более 1 минуты) при смене Master-спутника, гарантируя непрерывность и стабильность синхронизации всей группировки.

Целевая погрешность взаимной синхронизации шкал времени любых двух КА и с потребителем в группировке не должна превышать **1.0 нс (СКО)**.

**6. Навигационный сигнал и протоколы передачи данных**

**6.1. Структура и математическое обоснование сигнала**

Выбран комбинированный подход с передачей сигналов в L- и S-диапазонах для предоставления сервисов разного уровня. Основой является модуляция **BOC (Binary Offset Carrier)**, которая обеспечивает превосходные характеристики по многолучевости и позволяет эффективно разделять сигналы.

Сигнал BOC *s(t)* определяется как произведение псевдослучайной последовательности (ПСП) и прямоугольного поднесущего сигнала *sq(t):*

где

*fsc* - частота поднесущей,

- ПСП с тактовой частотой **f\_c**.

Сигнал обозначается как **BOC(***fsc***,** *fc***)**.

**Предлагаемая структура:**

* **L-диапазон:** **BOC (10, 5)** - для гражданского сигнала открытого доступа.
* **S-диапазон:** **BOC (15, 2.5)** - для защищенного и высокоточного сигнала.

Такая структура обеспечивает узкий главный пик автокорреляционной функции, что повышает точность кодовых измерений, и хорошее спектральное разделение с сигналами существующих ГНСС.

**6.2. Формат навигационного сообщения**

Информация передается кадрами длительностью 30 секунд, состоящими из 5 подкадров по 6 секунд.

| **Поле данных** | **Описание** |
| --- | --- |
| Синхропоследовательность | Маркер начала подкадра. |
| Эфемериды | Параметры орбиты КА (в формате расширенных параметров Кеплера или вектора состояния). |
| Параметры часов КА | Коэффициенты полинома для коррекции БШВ |
| Альманах | Данные о состоянии и грубые параметры орбит всех КА в группировке. |
| Ионосферные поправки | Параметры модели для одночастотных пользователей. |
| Данные целостности и аутентификации | Цифровая подпись для подтверждения подлинности сигнала. |
| UTC-коррекция | Параметры для перехода от СШВГ к UTC. |

**6.3. Расчет энергетического баланса радиолинии (Link Budget)**

Расчет подтверждает заявленное превосходство по мощности сигнала над MEO ГНСС.

| **Параметр** | **Обозначение** | **Значение** | **Комментарий** |
| --- | --- | --- | --- |
| Мощность передатчика КА |  | 20 Вт  (+43 дБм) | Твердотельный усилитель. |
| Усиление антенны КА |  | 13 дБи | Фазированная решетка, формирующая равномерный луч. |
| ЭИИМ | *EIRP* | +25 дБВт | Pt в дБВт + Gt. |
| Потери в свободном пространстве |  | 164.2 дБ | Для f=1.5 ГГц и d=1000 км.  *Lp*=20log10(4*πd/ λ*) |
| Атмосферные потери |  | 0.5 дБ | Консервативная оценка для L-диапазона. |
| Усиление антенны приемника |  | 0 дБи | Типовая пассивная антенна. |
| Принятая мощность сигнала | *С* | -139.7 дБм | EIRP - Lp - La + Gr. |
| Температура системы | *Tsys* | 350 K | Включает температуру антенны и шумы приемника. |
| Плотность шума | *N₀* | -203.2 дБВт/Гц | 10log10(k⋅Tsys)  где k - постоянная Больцмана. |
| Отношение C/N₀ | *C/N*₀ | 43.5 дБ-Гц | C (в дБВт) - N₀. |

**Вывод:** Полученное значение *C/N₀* на 20-23 дБ выше, чем у стандартных сигналов GPS L1 C/A (20-22 дБ-Гц в неблагоприятных условиях). Это кардинально повышает помехоустойчивость и доступность в сложных условиях ("городские каньоны").

**7. Расчеты сегментов системы**

**7.1. Космический сегмент**

**7.1.1. Расчет энергетического баланса КА**

Расчет определяет требования к солнечным батареям (СБ) и аккумуляторным батареям (АБ).

| **Подсистема** | **Потребляемая мощность, Вт** |
| --- | --- |
| Полезная нагрузка (ПН) | 120 |
| Бортовой комплекс управления | 30 |
| Система терморегулирования | 25 |
| Система ориентации и стабилизации | 20 |
| Итого (пиковое) | 195 |

* Длительность витка: ~105 минут.
* Длительность нахождения в тени Земли: ~35 минут (максимально).
* Энергия, потребляемая за виток: 195 Вт \* (105/60) ч ≈ 341 Вт·ч.
* Энергия, потребляемая в тени: 195 Вт \* (35/60) ч ≈ 114 Вт·ч.
* Требуемая емкость АБ (с учетом 30% запаса и глубины разряда 0.8): 114 / 0.8 \* 1.3 ≈ 185 Вт·ч.
* Требуемая генерация СБ (за 70 мин на свету): (341 Вт·ч + потери на заряд ~15%) / (70/60 ч) ≈ (392 / 1.16) ≈ 338 Вт.
* Требуемая площадь СБ (при эффективности 30% и солнечном потоке 1360 Вт/м² с учетом деградации): 338 Вт / (1360 Вт/м² \* 0.3 \* 0.85) ≈ 0.98 м².

**7.1.2. Требования к бортовому стандарту частоты (гибридная архитектура МБСЧ)**

Основой полезной нагрузки и ключевым элементом, определяющим автономность и точность системы, является Миниатюрный бортовой стандарт частоты (МБСЧ). На основе исследований целесообразен к реализации стандарта частоты **гибридной архитектуры**.

**Основной стандарт: Радиационно-стойкие миниатюрные атомные часы (CSAC)** CSAC используется в качестве основного источника опорной частоты. Его применение обусловлено необходимостью обеспечения высокой долговременной стабильности и предсказуемости ухода, что критически важно для режима автономной работы (**holdover**) при потере связи с наземным сегментом или другими спутниками.

**Вспомогательный стандарт: Высокостабильный MEMS-осциллятор** MEMS-генератор используется в качестве резервного и вспомогательного источника. Его ключевые преимущества — экстремально малые габариты, масса и энергопотребление (**SWaP**), а также выдающаяся устойчивость к вибрационным и ударным нагрузкам. Он обеспечивает надежную работу систем на этапе выведения КА на орбиту, при выполнении маневров и в случае отказа основного стандарта.

Такой гибридный подход обеспечивает наилучший баланс между производительностью, надежностью, стоимостью и устойчивостью к различным факторам космического полета.

**Ключевые требования к основному стандарту (CSAC):**

| **Параметр** | **Требование** | **Обоснование** |
| --- | --- | --- |
| Кратковременная стабильность (Девиация Аллана) | σ\_y(τ=1с) < 5×10⁻¹² | Обеспечивает низкий шум фазы, что критично для качества навигационного сигнала. |
| Долговременная стабильность | σ\_y(τ=сут)  < 1×10⁻¹³ | Минимизирует накопление ошибки времени, обеспечивая автономность до 24 часов. |
| Систематический уход частоты | Не более 5×10⁻¹¹ в месяц | Определяет предсказуемость поведения часов и точность полиномиальной модели коррекции. |
| Радиационная стойкость | Не менее 20 крад (TID) | Гарантирует работоспособность в условиях радиационных поясов Земли на LEO. |
| Энергопотребление | Не более 15 Вт | Соответствие энергетическому балансу МКА. |
| Масса | Не более 1.5 кг | Соответствие ограничениям платформы МКА. |

**7.2. Наземный сегмент**

**7.2.1. Параметры станций слежения и управления**

Требуется глобальная сеть из ~10-12 станций для обеспечения гарантированной видимости каждого КА не реже, чем раз в 2 часа.

| **Параметр** | **Станция закладки ЭВИ** | **Станция мониторинга (СМСИ)** |
| --- | --- | --- |
| **Диапазон частот** | S-диапазон (Uplink) | L/S-диапазон (Downlink) |
| **Диаметр антенны** | 5-7 м | 3-5 м |
| **Мощность передатчика** | 2 кВт | - |
| **Добротность (G/T)** | - | ≥ 25 дБ/К |
| **Точность привязки к UTC** | < 1 нс | < 0.5 нс |

**7.2.2. Требования к вычислительным мощностям**

Центр обработки данных должен решать следующие задачи в квази-реальном времени:

1. **Обработка измерений:** Прием и обработка данных от глобальной сети СМСИ.
2. **Определение и прогнозирование орбит (OD&P):** Численное интегрирование уравнений движения для 102 КА с учетом всех возмущений. Требуется использование методов пакетной обработки (batch least squares) и фильтров Калмана.
3. **Синхронизация шкал времени:** Расчет и прогнозирование параметров часов для каждого КА.
4. **Формирование навигационных сообщений:** Генерация файлов для закладки на борт КА.
5. **Обеспечение адаптивного протокола PTP** точными эфемеридными данными для модуля предиктивной компенсации. Оценка требуемой производительности: >**10 TFLOPS**. Необходимо развертывание высокопроизводительного вычислительного кластера (HPC).

**7.2.3. Архитектура эталона системного времени (КХФСВ)**

Комплекс хранения и формирования системного времени (КХФСВ) является ядром наземного сегмента, ответственным за формирование и хранение Системной Шкалы Времени (СШВ).

* **Состав:**
  + **Первичные стандарты:**

Не менее 3 активных водородных стандартов частоты (мазеров) для обеспечения высочайшей стабильности.

* + **Вторичные стандарты:**

Не менее 4 цезиевых стандартов частоты для обеспечения долговременной стабильности и точности.

* + **Система взаимной сверки:** Высокоточные компараторы для непрерывного сличения всех стандартов в ансамбле.
* **Формирование Системной Шкалы Времени (СШВ):**
  + СШВ формируется как композитная "бумажная" шкала на основе взвешенного ансамблевого алгоритма (типа AT1), который обеспечивает стабильность, превосходящую любой из физических эталонов, и автоматическое исключение деградирующих стандартов.
* **Сличение с внешними эталонами:**
  + Обеспечивается непрерывное сличение СШВ с национальной шкалой времени UTC(SU) и шкалами других ГНСС. Погрешность синхронизации СШВ относительно UTC не должна превышать **0.5 нс (СКО)**.
* **Протоколы передачи данных:**
  + КХФСВ формирует файлы с параметрами коррекции бортовых часов для каждого КА. Для передачи этой информации на борт используется защищенный протокол, обеспечивающий целостность и аутентичность данных.

**7.3. Пользовательский сегмент: Требования к потребительской аппаратуре (ПА)**

Аппаратура потребителей (ПА) является ключевым элементом, определяющим доступность и качество PNT-сервисов для конечных пользователей. Требования к ПА разделяются на два класса.

| **Характеристика** | **Класс I: Профессиональная ПА (геодезия, спец. задачи)** | **Класс II: Массовая ПА (автомобильная, смартфоны)** |
| --- | --- | --- |
| **Точность в автономном режиме** | - Код: < 0.2 м - Фаза (PPP/RTK): < 0.02 м (СКО) | - Код: < 0.5 м - Фаза (с коррекциями): < 0.2 м (СКО) |
| **Архитектура приемника** | Многосистемный, многочастотный (НСНС L/S, GPS L1/L2/L5, ГЛОНАСС G1/G2) с прямым доступом к "сырым" измерениям. | Высокоинтегрированный чипсет (SoC), двухчастотный (НСНС L, GPS L1/L5), с фокусом на низкое энергопотребление. |
| **Требования к антенне** | Геодезического класса с калиброванным фазовым центром, высоким коэффициентом усиления и подавлением многолучевости. | Компактная, встроенная, с широкой диаграммой направленности. Допускается более высокий уровень шума. |
| **Алгоритмы обработки** | - **RTK** (Real-Time Kinematic) с разрешением целочисленной неоднозначности. - **PPP** (Precise Point Positioning) с быстрой сходимостью. - Алгоритмы подавления помех и спуфинга. | - **SPP** (Standard Point Positioning). - PPP с быстрой сходимостью (PPP-RTK). - Глубокая интеграция с инерциальными датчиками (IMU). |
| **Интерфейсы** | **RS-232/422**, **Ethernet**, **USB**, **CAN**. Поддержка стандартных форматов **NMEA 0183**, **RTCM 3.x**, **BINEX**. | **USB**, **Bluetooth**, **Wi-Fi**. Упрощенные протоколы вывода PVT. |
| **Время первого определения (TTFF)** | - Холодный старт: < 60 с - Горячий старт: < 5 с | - Холодный старт: < 30 с - Горячий старт: < 2 с (с использованием A-GNSS) |

*Приложение 1: Детализированное описание протокола времени*

*(адаптированный PTP)*

1.1. Цели и задачи адаптированного протокола

Основная цель протокола заключается в обеспечении высокоточной взаимной синхронизации бортовых шкал времени (БШВ) всех космических аппаратов (КА) в низкоорбитальной группировке. Эта синхронизация с суб-наносекундной точностью является фундаментом для формирования единой, самосогласованной системной шкалы времени (СШВ), которая критически важна для выполнения целевых задач навигационной системы.

Ключевые задачи, решаемые протоколом:

Разработка специализированного профиля: Адаптация стандарта IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP) к уникальным условиям эксплуатации в динамичной сети низкоорбитальных спутников (LEO). Это включает учет высоких относительных скоростей, изменяющейся топологии и специфических физических эффектов.

Обеспечение автономности: гарантировать непрерывную работу группировки без связи с наземным сегментом управления на срок не менее 24 часов, сохраняя при этом взаимную синхронизацию в пределах заданных допусков.

Компенсация физических эффектов: Реализация встроенных механизмов для предиктивного расчета и компенсации релятивистских поправок (СТО и ОТО), доплеровского сдвига частоты и асимметрии задержек в межспутниковых линиях связи.

Быстрая реконвергенция: обеспечить восстановление синхронизации и стабильной работы сети за время не более 1 минуты после смены Master-спутника, вызванной изменением топологии или выходом текущего Master-КА из зоны видимости.

**1.2. Архитектура протокола**

Протокол реализует иерархическую Master-Slave архитектуру, динамически адаптирующуюся к текущей конфигурации сети.

Уровни иерархии:

Grandmaster (GM): Физически эта роль выполняется наземным комплексом хранения и формирования системного времени (КХФСВ), который синхронизирован с национальной шкалой времени UTC(SU). В рамках орбитальной сети GM является виртуальной точкой отсчета, с которой периодически сверяются избранные КА.

Master (M): Роль текущего эталона времени в сегменте сети. Master-КА выбирается динамически с помощью алгоритма Best Master Clock Algorithm (BMCA). Критериями выбора являются качество часов, состояние КА и, самое главное, время, прошедшее с момента последней сверки с GM.

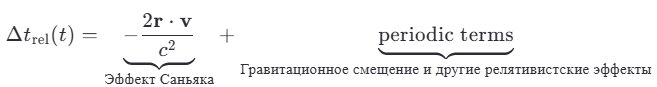
Slave (S): Любой КА, который в данный момент синхронизирует свою бортовую шкалу времени, получая временные метки от Master-КА и корректируя ход своих часов.

Взаимодействие с бортовым стандартом частоты (БСЧ): Протокол не просто устанавливает время, а управляет гибридной системой БСЧ, состоящей из основного атомного стандарта (CSAC - Chip Scale Atomic Clock) и вспомогательного MEMS-генератора. Результаты PTP-синхронизации (вычисленное смещение и его производная) используются для формирования поправочных коэффициентов полиномиальной модели часов. Эти коэффициенты непрерывно корректируют фазу и частоту опорного сигнала, обеспечивая плавное и точное ведение БШВ.

**1.3. Механизмы адаптации PTP**

Ключевым отличием данного профиля PTP является предиктивная компенсация физических эффектов, неизбежных в орбитальном полете.

Компенсация релятивистских эффектов (СТО и ОТО): В программное обеспечение протокола интегрирован модуль, который в реальном времени рассчитывает суммарную релятивистскую поправку Δt\_rel. Расчет базируется на высокоточных эфемеридных данных (вектор состояния [\*\*r\*\*, \*\*v\*\*] КА в геоцентрической инерциальной системе координат).



Эта поправка применяется к каждой временной метке до ее использования в алгоритмах синхронизации, эффективно "перенося" событие в единую релятивистскую систему отсчета.

Компенсация доплеровского сдвига: Высокая относительная скорость КА (до 7 км/с) вызывает значительный доплеровский сдвиг, который влияет не только на несущую частоту, но и на длительность временных интервалов. На основе прогнозируемой относительной скорости между Master и Slave КА рассчитывается коэффициент временной компрессии/растяжения, который используется для коррекции интервалов между пакетами протокола.

Компенсация асимметрии задержек: Асимметрия, вызванная различием путей распространения сигнала "туда" и "обратно" (t\_MS ≠ t\_SM), является основным источником ошибок в односторонних методах. Протокол устраняет эту проблему путем обязательного использования двусторонней передачи времени (Two-Way Time Transfer, TWTT), аналогично профилю White Rabbit.

Реализация: Каждый цикл синхронизации включает полный обмен сообщениями: **Sync/Follow\_Up** от **Master к Slave** и **Delay\_Req/Delay\_Resp** от **Slave к Master**.

Это позволяет непрерывно измерять задержки в обоих направлениях и вычислять асимметрию A = (t\_MS - t\_SM)/2. Ошибка, вносимая асимметрией, полностью исключается из финального расчета смещения часов.

**1.4. Формат сообщений**

Для передачи специфичной для спутниковой навигации информации стандартные сообщения IEEE 1588 расширены с помощью механизма TLV (Type-Length-Value).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Сообщение** | **Стандартные поля (ключевые)** | **Дополнительные поля (TLV) для НСНС** |
| **Sync** | **sequenceId**, **originTimestamp** | **predictedDopplerShift** (прогнозируемый Доплер), **predictedRelativisticCorr** (прогнозируемая релятивистская поправка) |
| **Follow\_Up** | **preciseOriginTimestamp** | **clockSourceQuality** (источник частоты: CSAC/MEMS), **masterClockHealthStatus** (статус здоровья часов Master-КА) |
| **Delay\_Req** | **sequenceId**, **originTimestamp** | **predictedDopplerShift**, **predictedRelativisticCorr** (расчет со стороны Slave-КА) |
| **Delay\_Resp** | **receiveTimestamp**, **requestingPortIdentity** | **slaveClockHealthStatus** (статус здоровья часов Slave-КА) |

**1.5. Алгоритмы синхронизации**

Математическое ядро протокола использует классические вычисления PTP, но применяет их к предварительно скорректированным временным меткам. Пусть t'1, t'2, t'3, t'4 — временные метки отправки и приема сообщений (Sync, Delay\_Req) после применения релятивистских и доплеровских поправок.

Расчет задержки распространения (Path Delay):

Расчет смещения часов (Clock Offset):

Данное значение Offset представляет собой истинное смещение шкалы времени Slave-КА относительно Master-КА на момент обмена сообщениями. Это значение передается в модуль управления БСЧ для коррекции.

**1.6. Анализ производительности и точности**

Теоретический анализ бюджета ошибок подтверждает достижимость целевых показателей точности.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Источник погрешности** | **Вклад в ошибку (СКО)** | **Метод компенсации** |
| Нестабильность бортовых часов (CSAC) | < 0.3 нс | Высокостабильный атомный стандарт, короткие интервалы между циклами синхронизации (<1 с). |
| Ошибка фиксации временной метки | < 0.2 нс | Аппаратная реализация на уровне FPGA/ASIC, исключающая задержки ПО и ОС. |
| Остаточная асимметрия канала | < 0.1 нс | Метод двусторонних измерений (TWTT) и калибровка приемо-передающих трактов. |
| Ошибка моделей релятивистских поправок | < 0.15 нс | Использование высокоточных эфемерид (прогноз орбиты <10 см) и полных моделей. |
| Шум в измерительном тракте | < 0.2 нс | Высокое отношение несущая/шум (C/N₀) в межспутниковом канале связи. |
| Суммарная погрешность (RSS) | < 0.5 нс | - |

**Ожидаемая точность:** Расчеты показывают, что суммарная среднеквадратическая погрешность (СКО) взаимной синхронизации двух любых КА в группировке и КА с потребителями **не превысит 0.5 нс**, что с запасом соответствует требованию ТЗ в 1.0 нс.

*Приложение 2: Детализированное описание протокола навигационных сообщений с доказательствами по точностям*

**2.1. Структура навигационного кадра**

Протокол использует иерархическую структуру данных для эффективной передачи информации с разной степенью срочности.

**Суперкадр:** Верхний уровень структуры, состоящий из 25 кадров. Общая длительность передачи — 12.5 минут (750 секунд). В течение одного суперкадра гарантированно передается полный альманах для всей группировки.

**Кадр:** Длительность 30 секунд. Состоит из 5 субкадров и является логической единицей для передачи данных одного типа.

**Субкадр**: Длительность 6 секунд. Это базовая единица данных. Субкадры имеют фиксированное назначение:

**Субкадры 1, 2, 3**: передают наиболее критичную информацию — высокоточные эфемериды и параметры часов передающего спутника.

**Субкадры 4, 5**: передают служебную информацию и данные альманаха, включая параметры ионосферной модели, коэффициенты для пересчета в UTC, данные о состоянии здоровья других КА и сообщения о целостности сигнала.

**2.2. Содержание сообщений**

Тип данных Описание и состав

| **Тип данных** | **Описание и состав** |
| --- | --- |
| **Эфемериды** | Набор из 16 параметров, полностью описывающих кеплерову орбиту КА и ее возмущения на заданном интервале времени. Включает: полуось, эсцентриситет, наклонение, долготу восходящего узла, аргумент перигея, среднюю аномалию, а также гармонические поправки **Cuc, Cus, Crc, Crs, Cic, Cis** для учета короткопериодических возмущений. |
| **Параметры часов** | Коэффициенты полинома второго порядка для точной коррекции бортовой шкалы времени КА относительно системного времени НСНС: **af0** (смещение), **af1** (уход частоты), **af2** (старение/дрейф ухода). |
| **Альманах** | Сокращенный набор эфемерид и параметров часов с пониженной точностью для всех КА в группировке. Используется приемником для ускорения "холодного старта" — первоначального поиска и захвата сигналов спутников. |
| **Параметры ионосферы** | Набор из 8 коэффициентов (α₀..α₃, β₀..β₃) для глобальной модели ионосферы (типа Klobuchar), позволяющей одночастотным потребителям вычислять и компенсировать основную часть ионосферной задержки сигнала. |
| **UTC-коррекция** | Параметры для точного перехода от внутренней системной шкалы времени НСНС к Всемирному координированному времени UTC(SU), включая величину смещения и скорость его изменения. |
| **Данные целостности и аутентификации** | Флаги состояния (health status) передающего КА. Криптографическая подпись сообщения, реализованная аналогично протокола TESLA (Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication), для подтверждения подлинности и целостности навигационных данных и защиты от спуфинг-атак. |

**2.3. Математическая модель движения спутника**

Точность эфемерид напрямую зависит от полноты и точности математической модели, используемой для прогнозирования движения КА. Движение описывается дифференциальным уравнением:

apert=agrav+adrag+asrp+atides

agrav - (Гравитационное поле Земли): Моделируется с высокой точностью путем разложения гравитационного потенциала в ряд по сферическим гармоникам (на основе модели EGM2008) до степени и порядка не ниже 16x16, что позволяет учесть несферичность Земли.

adrag - (Аэродинамическое сопротивление): Критически важно для LEO. Рассчитывается с использованием модели плотности верхней атмосферы NRLMSISE-00, которая учитывает зависимость плотности от высоты, времени суток, уровня солнечной и геомагнитной активности.

asrp - (Давление солнечного излучения): Учитывается с помощью детальной модели отражающих поверхностей КА и их ориентации относительно Солнца.

atides - (Лунные и солнечные приливы): Учитываются гравитационные возмущения от Луны и Солнца как на тело Земли (твердотельные приливы), так и непосредственно на КА.

**2.4. Доказательства по точностям**

Геометрический фактор снижения точности (GDOP): GDOP является безразмерной величиной, характеризующей, как геометрия взаимного расположения видимых спутников влияет на точность определения координат и времени. Он вычисляется из ковариационной матрицы ошибок Q, которая обратна матрице H^T\*H,

где H — матрица геометрии.

Компьютерное моделирование полной орбитальной группировки показало, что для 99% зоны обслуживания значение GDOP не превышает 2.0 в течение 99.9% времени, что гарантирует высокую геометрическую точность решения навигационной задачи.

Эквивалентная ошибка дальности пользователя (UERE): UERE — это статистическая оценка (СКО) суммарной погрешности измерения псевдодальности до одного спутника, приведенная к линии визирования. Рассчитывается как корень из суммы квадратов (RSS) всех независимых компонент ошибки:

Обоснование точности базируется на достижении целевых показателей для ключевых компонент:

σ\_orbit (ошибка прогноза орбиты) < 10 см.

σ\_clock (ошибка синхронизации часов, пересчитанная в метры) < 15 см (соответствует < 0.5 нс).

Остальные компоненты (σ\_iono, σ\_tropo, σ\_multipath, σ\_receiver) зависят от аппаратуры потребителя и условий приема. Достижение указанных точностей по орбите и часам обеспечивает значение UERE со стороны космического сегмента на уровне не более 20 см (СКО).

**2.5. Кодирование и помехозащита**

Помехоустойчивое кодирование (FEC): для защиты навигационных данных от ошибок при передаче через зашумленный канал используется современный код с низкой плотностью проверок на четность (LDPC). Данный код выбран за его производительность, близкую к теоретическому пределу Шеннона, что позволяет обеспечить исключительно низкую вероятность ошибки на бит (BER <10 -7) даже при низких значениях C/N₀.

Перемежение (Interleaving): перед кодированием биты данных проходят процедуру перемежения. Это делается для борьбы с пакетами ошибок, которые могут возникнуть из-за кратковременных замираний сигнала. Перемежитель "размазывает" соседние биты по времени, в результате чего пакетная ошибка на приемной стороне преобразуется в набор одиночных случайных ошибок, которые затем эффективно исправляются LDPC-декодером.

Приложение 3: Описание аппаратуры потребителя

**3.1. Архитектура приемника**

Типовой навигационный приемник состоит из нескольких функциональных блоков, обеспечивающих прием и обработку спутниковых сигналов для вычисления координат, скорости и времени (PVT-решение).

**Структурная схема:**

* **Описание блоков:**
  1. **Антенный блок:** принимает поляризованные радиосигналы в L-диапазоне от всех видимых спутников.
  2. **ВЧ-тракт (RF Front-End):** выполняет первичную обработку аналогового сигнала. Включает малошумящий усилитель (МШУ), который усиливает крайне слабый сигнал со спутника, полосовые фильтры для подавления внеполосных помех, и гетеродин со смесителем для переноса сигнала с высокой несущей частоты на более низкую, промежуточную частоту (ПЧ), удобную для оцифровки.
  3. **Блок цифровой обработки:** ядро приемника, состоящее из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который дискретизирует сигнал ПЧ, и цифрового сигнального процессора (DSP). DSP реализует корреляционную обработку: поиск, захват и слежение за сигналами каждого спутника, а также декодирование навигационного сообщения, модулированного на сигнал.
  4. **Навигационный процессор:** Высокоуровневый вычислитель (CPU), который получает от DSP "сырые" данные (псевдодальности, фазу несущей, доплеровский сдвиг) и декодированные эфемериды. На основе этих данных процессор решает систему навигационных уравнений и вычисляет итоговое PVT-решение.

**3.2. Требования к ключевым компонентам**

Требования к компонентам аппаратуры потребителя (ПА) сильно варьируются в зависимости от класса оборудования.

| **Компонент** | **Характеристики для профессиональной ПА (Класс I)** | **Характеристики для массовой ПА (Класс II)** |
| --- | --- | --- |
| **Антенна** | Геодезического класса с подавлением многолучевости (Choke Ring), с известным и стабильным калиброванным фазовым центром, коэффициент усиления> 5 дБи. | Компактная встроенная patch-антенна, пассивная или с низким усилением, с широкой, ненормируемой диаграммой направленности. |
| **МШУ (LNA)** | Коэффициент шума <1.0 дБ, коэффициент усиления > 30 дБ, высокая линейность. | Коэффициент шума <2.5 дБ, высокая степень интеграции в единый чип (SoC). |
| **Гетеродин** | Высокостабильный термокомпенсированный кварцевый генератор (TCXO) с низким уровнем фазового шума для минимизации ошибок слежения за фазой несущей. | Интегрирован в чипсет, стабильность достаточна для захвата сигнала и слежения за кодом. |
| **АЦП (ADC)** | Разрядность не менее 4 бит, высокая частота дискретизации для обработки широкополосных сигналов и повышения помехоустойчивости. | Разрядность 1-2 бита, оптимизирован по энергопотреблению и стоимости. |

**3.3. Алгоритмы работы навигационного процессора**

1. **Поиск и слежение за сигналами:**
   * **Поиск (Acquisition):** Начальный этап, на котором процессор ищет сигналы спутников. Для этого выполняется двумерный поиск в пространстве "доплеровский сдвиг – кодовая задержка" путем многократного вычисления взаимной корреляции между принятым сигналом и локальной копией дальномерного кода.
   * **Слежение (Tracking):** после обнаружения сигнала ("захвата") активируются три цифровых следящих контура для точного сопровождения параметров сигнала:
     + **DLL (Delay-Locked Loop):** Контур слежения за задержкой кода, обеспечивает точное измерение псевдодальности.
     + **PLL (Phase-Locked Loop):** Контур фазовой автоподстройки частоты, обеспечивает точное слежение за фазой несущей, что необходимо для измерений фазы и Доплера.
     + **FLL (Frequency-Locked Loop):** Контур частотной автоподстройки, используется для грубого слежения за частотой и помогает PLL при высоких динамиках.
2. **Декодирование сообщений:** Извлечение битов навигационного сообщения (эфемерид, альманаха, поправок) из сигнала, за которым ведется слежение.
3. **Решение навигационной задачи (PVT-решение):**
   * Формирование системы нелинейных навигационных уравнений, где каждое уравнение связывает измеренную псевдодальность до одного спутника с неизвестными координатами приемника (**x, y, z**) и смещением его часов (**Δt**).
   * Для решения системы (требуется минимум 4 уравнения/спутника) используются итерационные методы, такие как метод наименьших квадратов или, что более распространено, **фильтр Калмана**, который позволяет не только вычислять текущее решение, но и прогнозировать его, а также эффективно сглаживать шум измерений.
   * В зависимости от класса ПА и наличия внешних данных, могут применяться разные методы: от стандартного **SPP** (Standard Point Positioning) до высокоточных **PPP/RTK**, использующих фазовые измерения. Часто применяется глубокая интеграция с инерциальными датчиками (IMU) для повышения точности и доступности навигации в сложных условиях (тоннели, городская застройка).

**3.4. Протоколы вывода данных**

Приемник предоставляет навигационную информацию внешним системам через стандартизированные протоколы и интерфейсы.

* **Форматы данных:**
  + **NMEA 0183**: де-факто стандартный текстовый протокол, используемый для вывода основных навигационных параметров в виде коротких сообщений (GGA, RMC, GSV и др.).
  + **RTCM 3.x+**: Стандарт, разработанный для передачи дифференциальных поправок и другой информации, необходимой для высокоточных режимов позиционирования (RTK, PPP).
  + **BINEX** (Binary Exchange Format): Эффективный бинарный формат, предназначенный для записи и передачи "сырых" измерений (псевдодальности, фазы несущей, доплеровского сдвига) и полного содержания навигационных сообщений для последующей обработки или анализа.
* **Физические интерфейсы:**
  + Последовательные порты: **RS-232**, **RS-422** (для промышленных и геодезических приложений).
  + Сетевые интерфейсы: **Ethernet** (для передачи данных по IP-сетям, например, поправок RTCM).
  + Современные цифровые интерфейсы: **USB**.
  + Беспроводные интерфейсы: **Bluetooth**, **Wi-Fi** (преимущественно в массовой ПА).