

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СИНХРОНИЗАЦИИ БОРТОВОГО СИСТЕМНОГО ТАЙМЕРА СПУТНИКА СВЕРХМАЛОГО КЛАССА

*С.Д. Ивлев*

*студент группы 6304-090301D*

*г.о. Самара, Самарский университет*

*В.П. Евсеев*

*студент группы 6202-090301D*

*г.о. Самара, Самарский университет*

*Научный руководитель:*

*О.Л. Старина*

*Заведующий кафедрой динамики полёта и систем управления*

*г.о. Самара, Самарский университет*

### *Приглашённый доклад на секции «Открытый космос»*

**Ключевые слова:** сверхмалый спутник, GNSS, синхронизация, тактовая частота, таймер

**Обоснование.** Космические аппараты используют бортовое время для выполнения различных действий в определённые промежутки времени, задачи временных меток для данных, расчёт параметров движения и ориентации, а также оно требуется для работы некоторых специфических типов устройств, устанавливаемых на борту. Системные таймеры исполняются в виде отдельных аппаратных блоков, дополненных математическими расчётами для преобразования, компенсации, хранения. Такие системы имеют различную точность, в диапазоне от 50 ppm (миллионных долей процента) для обычных доступных тактовых резонаторов, до погрешности в несколько секунд на отрезках до миллиардов лет для современных атомных часов,

основанных на физических и стабильных параметрах осцилляции веществ. Последние достижения в миниатюризации электроники позволяют разрабатывать спутники всё более компактного размера, что ставит перед разработчиками задачи по портированию на такие аппараты систем, традиционно входящих в состав спутников.

**Цель.** Разработать устройство синхронизации времени бортовых часов со всемирным скоординированным временем (UTC +0) наносекундного класса.

**Методы.**

Любая реальная система определения времени имеет накапливающуюся ошибку, в том числе и самые точные атомные часы. Она включается в себя как случайную составляющую, представляющую собой нестабильность некоторых системных параметров и влияющих на конечный результат, так и прогнозируемую – параметры которой можно определить и компенсировать в итоговом устройстве, имея хорошо проработанную математическую и физическую модель.

Устройства сверхточной синхронизации недоступны для спутников сверхмалого класса, ввиду своих габаритов, энергопотребления, стоимости. Например, компания Microchip предлагает продукт MAC-SA5X - рубидиевые атомные часы (рисунок 1), однако их габариты всё равно превышают размеры сверхмалых спутниковых платформ и требуют мощных вычислительных устройств.

Однако в будущем возможно появление ещё более миниатюризированных и интегрированных продуктов. В качестве предлагаемого решения система может состоять из двух составляющих – блока абсолютной и относительной синхронизации.

Блок абсолютной синхронизации используется для получения опорного события, от которого будет проходить дальнейший отсчёт времени. В качестве основы необходимо выбирать источник, предоставляющий на один или несколько порядков величин более точные значения. Существуют разные способы получения времени, так в компьютерных сетях за это отвечают специальные сервисы и блоки операционной системы. Существуют также системы, требующие физического подключения к источнику, которые дают большую точность. Ещё одним из вариантов синхронизации времени является дешифровка данных с глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS).



Рисунок 1 -Рубидиевые атомные часы MAC-SA5X

Космические аппараты GNSS предоставляют набор специальным образом закодированных данных, расшифровка которых даёт пользователю некоторый набор данных, в том числе точное время отправки, позиция спутника, скорость, идентификатор спутника и протокола. Навигационный процессор, входящий в состав любого GNSS приёмника, решает численными методами навигационную задачу, определяя своё положение как точку в пространстве, где суммарная погрешность полученных и расчётных данных была бы минимальная.

Комбинация данных со многих спутников повышает точность решения навигационной задачи. Момент прихода навигационного сигнала фиксируется с очень высокой точностью, позволяя приёмнику определять своё местоположение до единиц метров, при скорости распространения сигнала равной скорости света.

В большинстве коммерческих приёмников данный сигнал выведен наружу и доступен для использования напрямую. Навигационный процессор всегда имеет время задержки, считающееся от момента прихода сигнала до окончания расчёта. Таким образом, полученные навигационные данные являются актуальными не на момент получения, а на момент поступления сигнала на вход. Данная задержка может достигать нескольких десятков микросекунд для различных параметров орбит спутника.

Спутники GNSS кодируют данные для успешного приёма на поверхности Земли, где достигается максимальная точность. Особенность космического полёта заключается в малой высоте и, следовательно, высокой скорости относительно поверхности Земли. Компенсировать высоту приёмника можно зная его приблизительную высоту. Она может быть установлена в бортовом компьютере постоянным числом, в случае орбит с низким эксцентриситетом, так и рассчитываться динамически на основе текущего положения космического аппарата на орбите.

Так, для высоты  $H = 500\text{км}$  время полёта сигнала будет определяться как

$$\begin{aligned} T &= \frac{H_B}{c} + \frac{H_a \cdot n}{c} = \frac{1}{c} ((H - H_a) + H_a \cdot n) \\ &= \frac{1}{299792458} ((500000 - 15000) + 15000 \cdot 1,003) = 1667,97\text{мкс} \end{aligned}$$

В задачу относительной синхронизации входит определение прошедшего времени относительно какого-либо точно известного события. Она имеет существенную накапливающуюся ошибку, однако на небольшом промежутке времени может давать неплохую точность.

Для минимизации промежутков времени необходимо определять абсолютное значение как можно чаще. В качестве опорного сигнала целесообразно использовать тактовый генератор. Увеличение частоты такового генератора может способствовать увеличению точности определения, однако чаще всего ведёт к удорожанию и усложнению схемотехники устройства. Стандартные тактовые резонаторы имеют точность около 50 ppm, однако существуют решения, предлагающие гораздо более высокую точность. В качестве таких устройств могут выступать самокомпенсированные генераторы опорной частоты, представляющие собой сложное устройство, имеющее обратные связи по температуре, напряжению питания, току и электромагнитной обстановке.

Ввиду особенностей и требований, предъявляемых к космической технике, космический аппарат находится на хранение, при транспортировке, во время подготовки и старта, а также до отделения в выключенном состоянии.

Таким образом, даже использование часов реального времени является ограниченным. Ввиду возможных нестабильностей сигнала GNSS, при необходимости снизить потребление, приёмник GNSS может быть отключён, если он не требуется для конкретной полезной нагрузки. В этом случае, последнее полученное навигационное решение может быть сохранено в микросхему часов реального времени, позволяющих хранить время и инкрементировать, пусть и с невысокой точностью, а также в случае отключения питания бортового

компьютера или ухода в безопасный режим – время может сохраняться на срок до нескольких недель, пока будет сохраняться заряд в небольшой резервной батарее.

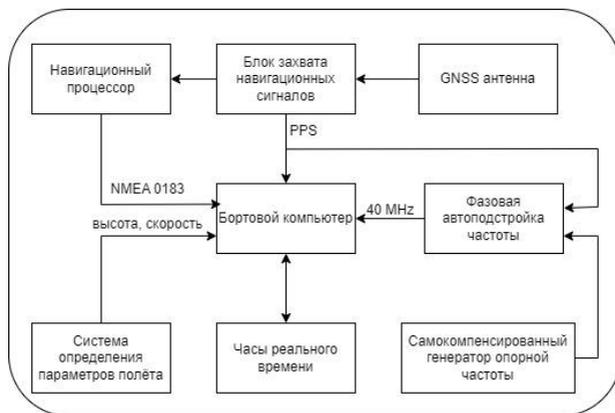


Рисунок 2 - Блок-схема разрабатываемого устройства

**Результаты.** В результате выполнения задач проекта был проработан вопрос практической реализации устройства синхронизации времени (рисунок 2), проведён анализ влияющих на точность факторов, выработаны решения по компенсации и калибровке устройства в связи со специфическими условиями применения. Полученные результаты работы над проектом являются базой для реализации такого устройства на практике.

**Выводы.** В результате работы над проектом был сделан вывод о возможности создания блока синхронизации частоты с наносекундной точностью на коммерчески доступной элементной базе.