

Космический эксперимент по сличению шкал времени средствами оптической лазерной локации

Жабин А.С.

Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения",

НПК «СПП», улица Авиамоторная, 53, Москва, 111024, Россия

e-mail: kingofevil@yandex.ru

Аннотация

В работе изложены основные результаты космического эксперимента по синхронизации шкал времени с использованием систем оптической лазерной локации. Описаны основные принципы построения и функционирования таких систем, подробно рассмотрена работа бортового терминала. В заключении приведены выводы и наиболее важные результаты, полученные в ходе проведения космического эксперимента.

Ключевые слова: лазерная локация, субнаносекундные точности, синхронизация шкал времени.

Непрерывное совершенствование глобальных навигационных систем (ГНС), а также расширение сфер их использования, наметившееся в последние годы, приводит к росту требований к точности синхронизации (сличения) шкал времени, генерируемых в пространственно разнесенных объектах. Расстояние между объектами может достигать десятков тысяч км. К этим объектам относятся как

космические аппараты (КА) системы “ГЛОНАСС” или других, так и наземные станции, на которых расположены центральные синхронизаторы группировки (ЦС), либо существуют собственные шкалы времени, используемые для локальных целей. Помимо этого, ужесточение требований к точности синхронизации времени происходит и при проведении радиоастрономических исследований. Современные радиотехнические системы, например [1] имеют точность измерений порядка единиц-десятков наносекунд и, как правило, обладают крайне низкой точностью калибровки систематических составляющих погрешности измерений, обусловленной задержками при распространении сигналов по трактам системы, что вносит серьезные ограничения к их применению при решении современных и перспективных задач и вызывает необходимость в постоянной калибровке таких систем.

Для решения перспективных задач прецизионного сличения шкал времени требуется переход от наносекундных точностей измерений к субнаносекундным (на уровне десятков-сотен пикосекунд в настоящее время и единиц-десятков пикосекунд в обозримом будущем). Так, Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012-2020 годы, в том числе, поставлены задачи повышения точности навигационного поля ГЛОНАСС по таким показателям, как погрешность определения местоположения в реальном времени в Государственной геоцентрической системе координат за счет погрешностей бортовой эфемеридно-временной информации без использования дополняющих систем на уровне 0.3 м, погрешность определения времени

потребителя в системной шкале времени за счет космического сегмента (с учетом всех элементов сегмента) на уровне 1 нс. Эти параметры должны быть достигнуты к 2020 году. Очевидно, что применение только существующих систем сличения шкал времени не сможет позволить получить столь высоких технических характеристик.

На данный момент наиболее перспективным способом обеспечения субнаносекундных точностей сличения шкал времени пространственно разнесенных объектов является использование систем оптической лазерной локации. Одной из таких систем является беззапросная квантово-оптическая система (БКОС), разрабатываемая в ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» [2]. В статье рассматриваются принципы построения бортового сегмента системы и приводятся экспериментальные результаты работы за первый год эксплуатации.

БКОС состоит из наземного и космического сегментов. Принцип работы БКОС иллюстрируется рис.1. Наземная станция излучает короткие импульсы лазерного излучения (длина волны 532 нм, длительность импульса – до 400 пс) в направлении на КА и регистрирует точное время старта импульса $t_{\text{старт}}$ и время прихода $t_{\text{прием}}$ ответного импульса (отраженного ретрорефлекторной системой, установленной на борту КА) относительно наземной шкалы времени. Вблизи центра отражения ретрорефлекторной системы (РРС) на борту КА расположено фотоприемное устройство бортового (ББКОС) сегмента БКОС, принимающее лазерный импульс, который регистрируется специальным вычислительным устройством (СВУ) в бортовой шкале времени. Время прихода импульса на борт КА, измеренное в

наземной шкале времени, приближенно равно:

$$T_{\text{борт}}^{\text{н}} = t_{\text{старт}} + \frac{t_{\text{стоп}} - t_{\text{старт}}}{2}.$$

Соотношение записано в упрощенном виде, без учета поправок на вращение Земли и взаимное расположение бортового сегмента БКОС и РРС, задержки сигнала, обусловленной кривизной пространства за счет гравитации Земли, а также релятивистское смещение шкал времени источника излучения и приемника.



Рис.1. Пояснение принципа работы БКОС

На борту КА БКОС регистрирует время прихода импульса $t_{\text{борт}}$ в бортовой шкале времени. Разность хода бортового и наземного эталонов определится выражением: $\Delta t = t_{\text{борт}}^{\text{н}} - t_{\text{борт}}$.

Рассмотрим более подробно построение бортового сегмента БКОС. Функциональная схема БКОС приведена на рис. 2. Оптический тракт системы состоит из фотоприемного устройства ФПУ с узкополосными светофильтрами на

входе (рабочая длина волны 532 нм, ширина полосы пропускания фильтров 3.5 нм). ФПУ состоит из нескольких (семи) каналов с узкими полями зрения, ориентированных таким образом, что суммарное поле зрения всех каналов составляет 24°, что с высоты орбиты КА “Глонасс” (19100 км) покрывает практически всю поверхность Земли. Использование многоканального ФПУ позволяет снизить уровень шума фоновой засветки, а также дает возможность определять сектор, из которого производится облучение наземной станцией.

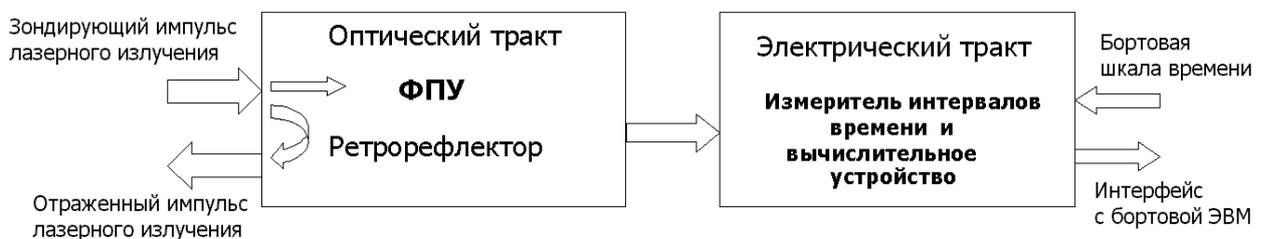
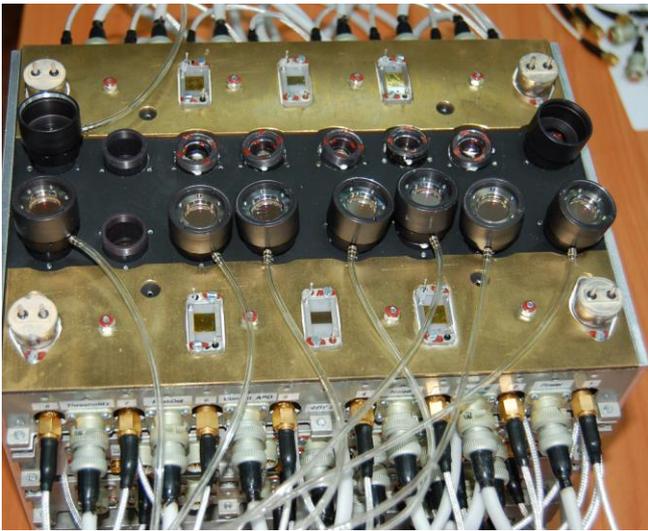


Рис.2. Функциональная схема БКОС

Сигналы с выходов ФПУ поступают на измеритель временных интервалов [3], совмещенный с вычислительным устройством и подсистемой управления. Такое совмещение вызвано целесообразностью использования одного микропроцессорного устройства как для проведения измерений и обработки их результатов, так и для управления системой в целом и связи с бортовой ЭВМ КА. Кроме того, это позволило снизить общие массогабаритные показатели и повысить надежность системы.

Обеспечить субнаносекундную точность измерений интервалов времени методами непосредственных измерений на данный момент невозможно. Существует

ряд способов измерения интервалов времени с малым дискретом. Достижение пикосекундных точностей обеспечивается за счет использования кольцевого автогенератора, представляющего собой набор элементов задержки в виде КМОП-структур. Время переключения одного элемента составляет приблизительно 20...30 пс. Таким образом, фиксация количества переключенных элементов в начале и конце измеряемого интервала времени позволяет получить дискрет измерений на уровне времени переключения одного элемента. Существенное ограничение на максимальную длительность измеряемого интервала накладывает количество элементов задержки внутри кольцевого генератора. В современных интегральных микросхемах (ИМС) с такими измерителями максимальная длительность измеряемого интервала времени составляет порядка 40 мкс [4], что явно недостаточно. Например, при решении задач корректировки шкал времени космических аппаратов “ГЛОНАСС” методами оптической локации, требования к максимальной длительности измеряемого интервала времени составляют $\tau = \frac{2H}{c} = 127$ мс, где $H=19100$ км – высота орбиты КА, c – скорость света. Поэтому измеритель коротких интервалов времени с малым дискретом дополняется грубым счетчиком времени.



а)



б)

Рис.3. Фото бортового терминала БКОС

Внешний вид терминала БКОС со снятым кожухом показан на рис. 3, а. Фото полностью собранного терминала приведено на рис.3, б. Экспериментальный образец БКОС был установлен на борт КА “Глонасс-М” №747 в конце 2011 года. КА был выведен на целевую орбиту 26.04.2013 года. Перевод бортовой аппаратуры

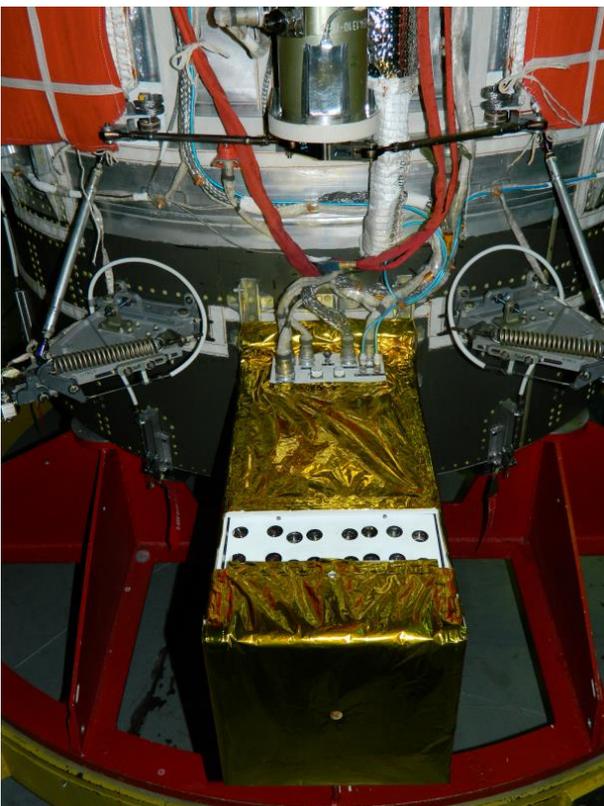


Рис.4. БКОС на борту КА “Глонасс-М”

из режима орбитального хранения в дежурный режим был успешно выполнен 27.05.2013 года.

Для отработки методики сличения шкал времени пространственно разнесенных объектов в настоящее время проводится космический эксперимент, в котором задействованы КА “Глонасс-М” №747, оснащенный бортовым терминалом

БКЭС и три лазерные станции (г.Щелково, с.Саввушки (Алтайский край), г.Комсомольск-на-Амуре) с установленными наземными модулями системы БКОС. К настоящему времени (август 2014 года) произведено более 50 сеансов работы с бортовой аппаратурой, космический эксперимент продолжается.

Наиболее важными результатами, достигнутыми на данный момент, можно считать следующее:

1) Подтверждение энергетических характеристик измерительного канала между наземным пунктом и бортовым модулем. В условиях сопровождения КА лазерной станцией при ясной погоде вероятность приема лазерного импульса на борту составляет 0.98...0.99;

2) Впервые в мировой практике зафиксирован устойчивый прием лазерных импульсов на борту КА с вероятностью 0.3...0.4 в условиях облачности в районе наземного пункта;

3) Подтверждены точностные характеристики наземной и бортовой аппаратуры;

4) Получена информация о расхождении шкал времени борта КА и наземных пунктов с точностями, недостижимыми для существующих радиотехнических систем.

30 августа 2014 г. впервые был успешно проведен эксперимент по передаче времени с субнаносекундной точностью от центрального синхронизатора в Щелково не только на борт КА, но и в два наземных пункта (Алтай, Комсомольск-на-Амуре). Суммарное расстояние, на которое удалены все объекты, участвовавшие в эксперименте, превышает 25 тысяч км. В ходе эксперимента были получены абсолютные значения расхождения шкал времени, а также его изменение на

коротких интервалах времени, вызванное конечной точностью воспроизведения номинала частоты стандартом, используемым в каждом из объектов.

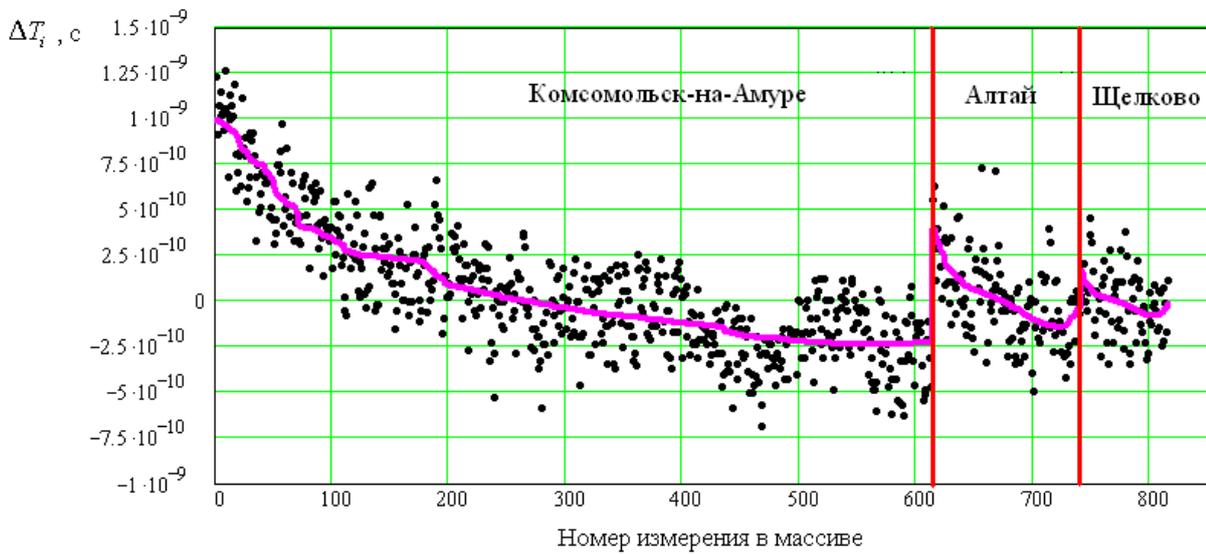


Рис.5. Результаты измерений расхождения шкал времени в рамках космического эксперимента

На рис.5 представлен массив результатов прямых измерений, полученный после вычитания среднего значения абсолютной величины расхождения шкал времени между объектами в соответствии с соотношением:

$$\Delta T_i = T_{\text{н.борта}} - T_{\text{борта}} - \text{med}(T_{\text{н.борта}} - T_{\text{борта}}),$$

Где *med* – функция, возвращающая медиану массива.

Сплошной линией на рис.5 показана аппроксимация полученных результатов полиномом 4-й степени. Наклон сплошной линии показывает динамику расхождения шкал времени борта КА и наземной станции, обусловленную конечной

точностью воспроизведения частот стандартами на борту КА и станциями на Земле, а также существующим релятивистским сдвигом частоты бортового стандарта. Во всех экспериментах СКО от аппроксимированного полиномом значения не превышало 200 пс (без статистической обработки). Осреднение измерений на интервале 10...30 с позволяет снизить СКО до значений 30...50 пс. При этом полная погрешность измерений (систематическая погрешность, вызванная конечной точностью определения аппаратных задержек в трактах системы плюс случайная погрешность измерений) не превышает 300 пс.

Выводы. Применение систем оптической лазерной локации позволяет решать задачи синхронизации шкал времени пространственно разнесенных объектов в новом диапазоне точностей (десятки...сотни пикосекунд, в перспективе – единицы...десятки пикосекунд). Такие точности до настоящего времени не были достигнуты путем применения каких-либо других средств и способов.

Работа выполняется в рамках Федеральной целевой программы “Поддержание, развитие и использование системы “ГЛОНАСС” на 2012-2020 гг”, заказчик – Министерство обороны Российской Федерации.

Литература

1. Танцай П.И., Корниенко В.Г. Экспериментальные исследования точности синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных пунктах методом запросной радиолокации // Доклады ТУСУРа. № 2 (18), ч. 2, декабрь 2008, С. 25-31.
2. Садовников М.А., Сумерин В.В., Шаргородский В.Д. Односторонняя лазерная дальнометрия и ее применение в задачах повышения точности частотно-временного

обеспечения ГЛОНАСС // International Technical Workshop WPLTN-2012, Санкт-Петербург, Россия, 2012. С 18.

3. Жабин А.С. Применение двухступенчатой системы фазовой синхронизации для обеспечения субнаносекундной точности измерений интервалов времени // Материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях». Синхроинфо – 2012. Йошкар-Ола, Россия, 25-27 июня 2012. 164 с.

4. TDC-GPX. Ultra-high Performance 8 Channel Time-to-Digital Converter. Device data sheet. www.acam.de.