

9. Laurichesse D., Mercier F., Berthias J. P. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, September 21–24, 2010, p. 2534–2544.

10. Collins P. Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities. ION NTM 2008, 28–30 January 2008, San Diego, CA, p.720–732.

11. P. de Jonge, Tiberius C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. Delft Geodetic Computing Centre, 1996, 50 p.

© Дворкин В. В., Карутин С. Н., 2013

УДК 621.391.63

## ВОПРОСЫ ТОЧНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОЙ БЕЗЗАПРОСНОЙ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. С. Жабин<sup>1</sup>, П. И. Набокин<sup>1</sup>, Д. С. Батеев<sup>2</sup>, В. А. Анжина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»  
Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 53

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: nab-pavel@yandex.ru

*Представлены материалы разработки опытного образца бортовой беззапросной квантово-оптической системы. Для решения поставленных задач был разработан измеритель временных интервалов с двухступенчатой системой фазовой синхронизации. Отработка опытного образца бортовой беззапросной квантово-оптической системы проводилась автономно и в составе космического аппарата «Глонасс». В статье приведены факторы, влияющие на точность регистрации лазерного импульса в бортовой шкале времени. Проведена оценка погрешности регистрации импульса. С помощью бортовой системы регистрации лазерных импульсов возможно проведение мониторинга бортовых синхронизирующих устройств (в том числе – определения точности и стабильности их шкал времени), сличения бортовых синхронизирующих устройств с центральными синхронизаторами ГНСС ГЛОНАСС, сличения шкал времени центральных синхронизаторов, в том числе разнесенных на континентальные или межконтинентальные расстояния.*

*Ключевые слова:* лазерное определение положения, пикосекундная точность, точное измерение времени.

## QUESTIONS OF SPACECRAFT LASER PULSES REGISTRATION ACCURACY WITH THE USE OF THE ONBOARD QUERY-FREE QUANTUM-OPTICAL SYSTEM

A. S. Zhabin<sup>1</sup>, P. I. Nabokin<sup>1</sup>, D. S. Bateev<sup>2</sup>, V. A. Anzhina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”  
53 Aviamotornaya str., Moscow, 111024, Russia. E-mail: nab-pavel@yandex.ru

<sup>2</sup>JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”  
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

*The authors present the materials of development of prototype of on-board query-free quantum-optical system. For solution of this problem a time intervals measuring instrument with two-stage phase alignment system was designed. Testing of prototype of the on-board query-free quantum-optical system was conducted autonomous and within the spacecraft "Glonass". The authors reveal the factors affecting the accuracy of registration of the laser pulse in the on-board time scale; estimate of the error of pulse detection. With the use of the instrumentality of the on-board query-free quantum-optical system we can describe accuracy and stability of the on-board synchronizer blocks and make comparative measurements of ground central synchronizers of GNSS GLONASS and on-board synchronizers, as well as measurements of ground central synchronizers including synchronizers spaced within one continent or intercontinentally.*

*Keywords:* Optical laser location, picosecond accuracy, precision time measurement.

Лазерные системы мониторинга и передачи времени потенциально позволяют достичь пикосекундных уровней точности при решении задач высокоточ-

ного контроля частотно-временных параметров ГНСС ГЛОНАСС и метрологической аттестации радиочастотных технологий передачи времени.

Основополагающий принцип технологии лазерного мониторинга показан на рис. 1.

Наземная лазерная станция излучает короткие импульсы в направлении на космический аппарат (КА), оборудованный ретрорефлекторной системой (РРС), и регистрирует точное время старта импульса и время прихода ответного импульса относительно наземной шкалы времени. Вблизи центра отражения РРС на борту КА устанавливается фотоприемное устройство (ФПУ), регистрирующее приходящий лазерный импульс в бортовой шкале времени. Время прихода импульса на бортовые РРС и ФПУ, измеренное в наземной шкале времени, равно:

$$t_{\text{борт}}^* = \frac{1}{2} \cdot (t_{\text{старт}} + t_{\text{прием}})$$

На борту КА ФПУ регистрирует время прихода импульса в бортовой шкале времени. Разность хода бортового и наземного эталонов определится выражением:

$$X = t_{\text{борт}}^* - t_{\text{борт}}$$

Таким образом, можно измерить разность хода (смещение) наземной и бортовой шкал времени, располагая тройкой (триадой) измерений.

При проведении мониторинга бортовых эталонов частоты необходимо использовать наземный эталон частоты более высокого уровня, например центральный синхронизатор. Для синхронизации разнесенных наземных эталонов частоты необходимо с каждого пункта независимо выполнить мониторинг одного и того же бортового эталона и сравнить результаты.

Фундаментальным свойством указанной лазерной технологии является то, что поправка на распространение сигнала в атмосфере для односторонней трассы в направлении на КА полностью компенсируется, когда комбинируется с обычными для дальномера измерениями двойного времени задержки, выполняе-

мыми в одно и то же время. Современные спутниковые лазерные дальномеры обеспечивают сантиметровую точность измерений дальности, что соответствует погрешности измерений времени менее 0,1 нс.

Для мониторинга бортовых синхронизирующих устройств (в том числе – определения точности и стабильности их шкал времени), сличения бортовых синхронизирующих устройств с центральными синхронизаторами ГНСС ГЛОНАСС, сличения шкал времени центральных синхронизаторов, в том числе разнесенных на континентальные или межконтинентальные расстояния, необходимо оснащение каждого КА группировки ГЛОНАСС бортовой системой регистрации лазерных импульсов.

Для ГНСС ГЛОНАСС эти задачи предполагается решать с помощью бортовой беззапросной квантово-оптической системы (ББКООС), функциональная схема которой приведена на рис. 2.

Оптический тракт системы состоит из семиканального фотоприемного устройства. Суммарное поле зрения всех каналов ФПУ составляет  $24^\circ$ , что покрывает практически всю видимую поверхность Земли. Использование многоканального ФПУ позволяет снизить уровень шума его фоновой засветки. Кроме того, такой подход дает возможность определять сектор, из которого производится облучение.

Принятые ФПУ сигналы поступают в измерительный тракт системы. Измерение интервалов времени с точностью лучше 0,1 нс осуществляется косвенным методом, основанным на применении интегральной микросхемы с набором элементов задержки, на основе которых построен измеритель [1]. Обеспечить субнаносекундную точность методами непосредственных измерений на данный момент практически невозможно, так как для этого потребовалось бы построить электронно-счетные устройства на основе цифровой логики, работающие на частотах порядка десятков ГГц.

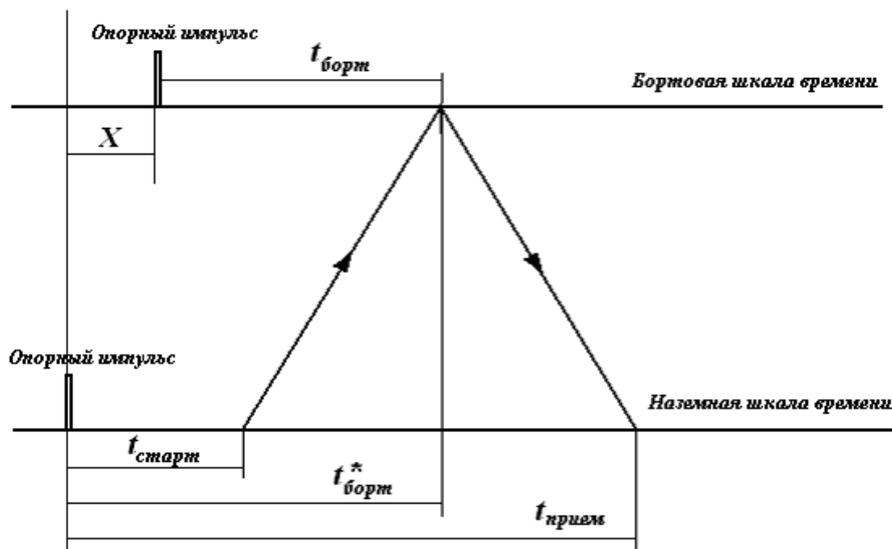


Рис. 1. Принцип лазерного мониторинга и передачи времени

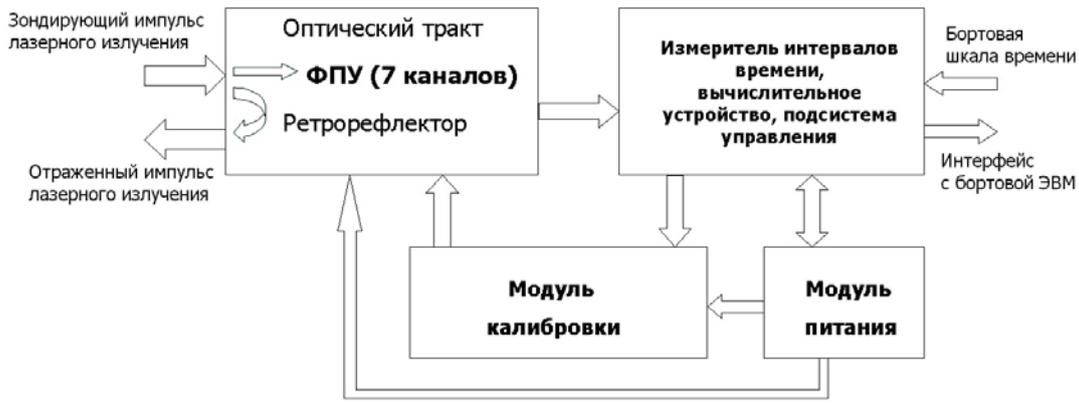


Рис. 2. Функциональная схема бортового терминала БКОС

Существует ряд способов измерения интервалов времени с малым дискретом [2; 3]. В [2] используется метод анализа вторичного события (импульса напряжения заданной формы), сформированного относительно стартовых и стоповых импульсов, инициирующих процесс измерения, позволяющий получить точность порядка десятков пикосекунд. Производятся измерения мгновенных значений амплитуды сформированного вторичного импульса в заданных точках. Затем, имея информацию о его форме, можно произвести математическую обработку результатов и получить информацию о времени появления стартового импульса. Ощутимым недостатком такого метода являются методические погрешности, обусловленные косвенными измерениями вторичных параметров, а также цепями формирования вторичного события, и даже приблизительная оценка их величины исключительно трудна. Вопрос о потенциально достижимой точности измерений в такой системе остается открытым.

Поэтому сосредоточим внимание на методе, используемом в [3]. 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 ИМС с такими измерителями максимальная длительность измеряемого интервала времени составляет порядка 40 мкс [3], что явно недостаточно. Например, при решении задач корректировки шкал времени КА ГЛОНАСС методами оптической локации, максимальная длительность измеряемого интервала времени составляет

$$\tau = \frac{2H}{c} = 127 \text{ мс, где } H = 19 \text{ } 100 \text{ км – высота орбиты}$$

космического аппарата,  $c$  – скорость света. Поэтому измерения необходимо производить в два этапа: с помощью измерителя коротких интервалов времени с малым дискретом необходимо осуществить привязку начального и конечного моментов измеряемого интервала к тактовому сигналу, а длинные интервалы времени измерять с помощью грубого счетчика периодов тактового сигнала.

Если кольцевой генератор, используемый для измерения коротких интервалов времени с малым дискретом, не синхронизирован с эталонным тактовым сигналом, то будет существовать линейно растущий во времени сдвиг фаз между этими сигналами, и при разных измерениях одной и той же величины количество переключенных элементов будут различаться, что станет дополнительным источником погрешности. Кроме того, дискрет измерений, определяемый частотой работы кольцевого генератора, зависит от многих параметров (температуры, напряжения питания и т. д.). Поэтому для обеспечения строго заданного значения дискрета измерений необходимо осуществить синхронизацию кольцевого генератора относительно эталонного тактового сигнала.

Для решения этих задач был разработан измеритель временных интервалов с двухступенчатой системой фазовой синхронизации. Его функциональная схема приведена на рис. 3.

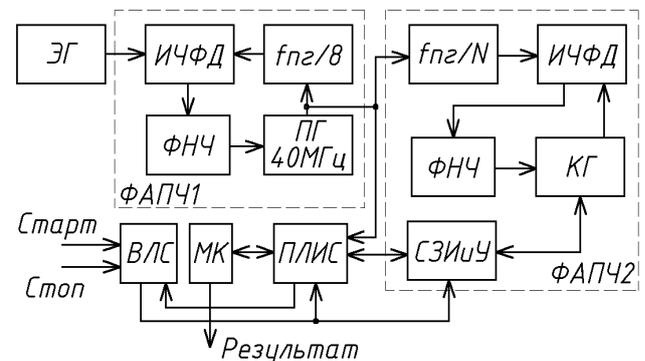


Рис. 3. Функциональная схема измерителя

С помощью ФАПЧ1 происходит формирование опорного тактового сигнала. Колебание эталонного генератора ЭГ, в качестве которого используется атомно-лучевой стандарт частоты, поступает на вход импульсного частотно-фазового дискриминатора ИЧФД, на другой вход которого подается сигнал от перестраиваемого в узком диапазоне кварцевого генератора КГ, пропущенного через делитель частоты. Таким образом, формируется высокостабильное опорное колебание, с точностью настройки номинальной частоты, определяемой ЭГ и низким уровнем фазовых шумов, определяемым КГ. С помощью ФАПЧ2 происходит синхронизация кольцевого автогенератора КГ относительно эталонного колебания, полученного на выходе ФАПЧ1. Стартовые и стоповые сигналы, управляющие работой измерителя, подаются на входную логическую схему ВЛС, вырабатывающую сигналы для схемы запуска измерений и управления (СЗИУ) измерителем коротких интервалов времени и счетчика периодов тактового сигнала для измерения длинных интервалов времени, реализованного на ПЛИС. Микроконтроллер МК управляет режимами работы измерителя, производит вычисления и выдает итоговые результаты измерений.

Измеритель временных интервалов (ИВИ) совмещен с вычислительным устройством и подсистемой управления. Такое совмещение носит условный характер и 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. Это позволило снизить массогабаритные показатели и повысить надежность системы.

Модуль калибровки формирует собственные импульсы излучения от калиброванного лазерного излучателя, которые с помощью оптических волокон подаются в приемные объективы каждого из каналов ФПУ. Это позволяет контролировать временные задержки в оптико-электронном тракте, а также проводить его тестирование перед рабочим сеансом.

Модуль питания обеспечивает стабильными питающими напряжениями все функциональные узлы системы, используя бортовую сеть питания КА.

**Бюджет погрешностей регистрации ББКос времени прихода импульсов на борт КА.** Время регистрации лазерного импульса модулем СВУ ББКос:

$$T_{\text{сву}}^{\text{ли}} = T_{\text{отр}}^{\text{ли}} + T_{\text{геом}} + T_{\text{фпу}} + T_{\text{иви}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{отр}}^{\text{ли}}$  – время прихода лазерного импульса в центр отражения РРС;  $T_{\text{геом}}$  – время задержки лазерного импульса, соответствующей расстоянию от центра отражения РРС до ФПУ ББКос;  $T_{\text{фпу}}$  – время задержки импульса в тракте ФПУ, от входа ФПУ до входа измерителя временных интервалов;  $T_{\text{иви}}$  – время задержки импульса в тракте ИВИ.

Поступивший импульс регистрируется относительно секундной метки СВУ ББКос.

Положение (время) секундной метки СВУ относительно секундной метки БСУ определяется за-

держками в ВЧ кабелях БСУ-СВУ и схемой выделения секундной метки СВУ:

$$T_{\text{сву}}^{\text{lc}} = T_{\text{бсу}}^{\text{lc}} + T_{\text{бсу-сву}} + T_{\text{1c1c}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{бсу}}^{\text{lc}}$  – время «точной секундной метки» (ТСМ) БСУ;  $T_{\text{бсу-сву}}$  – время задержки ТСМ от выхода БСУ до входа СВУ ББКос;  $T_{\text{1c1c}}$  – время задержки выделенной секундной метки СВУ относительно ТСМ БСУ, поступившей на вход СВУ.

ТСМ БСУ определяется сигналом 5 МГц и, следовательно, задержка  $T_{\text{бсу-сву}}$  – это задержка сигнала 5 МГц в ВЧ кабелях от выхода БСУ до входа СВУ ББКос.

Опуская промежуточные преобразования, приведем соотношение для времени прихода лазерного импульса  $T^{\text{ли}} \equiv (T_{\text{отр}}^{\text{ли}} - T_{\text{бсу}}^{\text{lc}})$  в центр РРС в шкале времени БСУ КА, с учетом изменения задержек при изменении температуры и параметров сигналов:

$$T^{\text{ли}} = T_{\text{изм}} - L^k c^{-1} + [T_{\text{каб}} + \Delta T_{\text{каб}}(t^0 C)] - [T_{\text{ббкос}}^k + \Delta T_{\text{ббкос}}^k(t^0 C) + \Delta T_{\text{сигн}}^k + \Delta T_{\text{ббкос}}(V_5)]. \quad (3)$$

Здесь  $T_{\text{изм}}$  – измеренное ИВИ СВУ время регистрации импульса в сетке времени СВУ ББКос;  $c$  – скорость света (в вакууме);  $L^k$  – расстояние от центра РРС до входа канала  $k$  ФПУ;  $T_{\text{каб}}$  – задержка сигнала 5 МГц кабелями БСУ-СВУ ББКос;  $T_{\text{ббкос}}^k = T_{\text{фпу}}^k + T_{\text{иви}} - T_{\text{1c1c}}$  – суммарная задержка времени детектирования и регистрации лазерного импульса: от входа ФПУ<sup>k</sup> до входа сигнала 5 МГц в ББКос;  $\Delta T_{\text{каб}}(t^0 C)$  и  $\Delta T_{\text{ббкос}}^k(t^0 C)$  – изменение задержек с температурой;  $\Delta T_{\text{сигн}}^k(V_{\text{сигн}})$  – изменение задержки в зависимости от амплитуды сигнала, пропорционального энергии принятого лазерного сигнала;  $\Delta T_{\text{ббкос}}(V_5)$  – изменение задержки в зависимости от амплитуды синусоидального сигнала 5 МГц (выделение компаратором ТСМ из синуса).

Соотношение (3) является базовым для определения момента времени регистрации лазерного импульса, пришедшего в центр РРС в шкале времени БСУ КА, и оценки погрешности определения этого момента времени.

**Случайная погрешность измерения** времени прихода импульса определяется следующими составляющими:

- а) погрешностью регистрации светового импульса ФПУ –  $\sigma_{T_{\text{фпу}}}$  (джиттер ФПУ);
- б) погрешностью измерителя временных интервалов –  $\sigma_{T_{\text{иви}}}$  (джиттер ИВИ);
- в) нестабильностью сетки 5 МГц на нашем интервале измерений –  $\sigma(T_5)$  (джиттер сформированной стабильной сетки 5 МГц СВУ);
- г) погрешностью определения момента перехода нуля синусоидальным сигналом 5 МГц –  $\sigma_{T_{\text{пер5}}}$  (джиттер выделения точной секундной метки).

Составляющие в) и г) определяют случайную ошибку слагаемого  $T_{\text{1c1c}}$ .

Слагаемые  $L^k/c$  и  $T_{\text{каб}}$  соответствуют пассивным трактам и имеют только систематическую погрешность.

Джиттер ФПУ обусловлен шумом в измерительном тракте ФПУ (от фотодиода до компаратора, пре-

валирующим является шум тока фоновой засветки), конечным временем нарастания сигнала ( $T_{нар}$ ) на входе компаратора и конечным значением отношения «сигнал/шум»:  $\sigma T_{фпу} = T_{нар} / (с/ш) < 70$  пс для  $T_{нар} < 0,7$  нс,  $с/ш > 10$ .

Джиттер ИВИ определяется выбранной микросхемой – измерителем. Лучшая на сегодня для нашей задачи – TDC-GPX, обеспечивает (по паспортным данным) СКО единичного измерения от 30 до 60 пс. Дискрет (шаг) времени этой микросхемы 27 пс, в варианте рекомендованного паспортом подключения. Меньший шаг может быть достигнут иными подключениями, но для нашей задачи этот риск не оправдан, так как СКО, обусловленное шумом сигнала, почти на порядок больше дискрета 27 пс.

Джиттер сформированной сетки 5 МГц определяется фазовым шумом кварцевого генератора кольца ФАПЧ, в нашем случае VDLGLA – 40M000000 (фирмы Vectron – лидера в области малошумящих подстраиваемых генераторов). Для выбранного интервала измерений, на основании паспортных данных генератора,  $\sigma(T_0) \leq 40$  пс. В опытных образцах ИВИ случайная погрешность измерений (за счет джиттера ИВИ и джиттера сетки 5 МГц) не превышала 50 пс.

Джиттер выделения точной секундной метки определяется помехами на входе соответствующего компаратора и искажениями синусоиды 5 МГц (превалирует первая составляющая). Оценка, с учетом экспериментальных данных, дает  $\sigma T_{пер0} \leq 25$  пс.

Суммарная оценка случайной погрешности времени регистрации принятого ББКос лазерного импульса (в единичном измерении) дает  $\sigma T_{изм} \leq 90$  пс, для отношения  $с/ш = 10$ .

Проверки СКО единичных измерений ББКос времени получения лазерных импульсов в стыковочных испытаниях с наземной беззапросной квантово-оптической системой, работающей в шкале времени центрального синхронизатора, дали результаты  $\sigma T_{изм} \leq 85$  пс.

**Систематическая погрешность** измерения времени регистрации ББКос лазерного импульса, относительно центра отражения РРС, определяется:

а) задержкой  $L^k/c$ , обусловленной геометрическими факторами: расположением ФПУ ББКос относительно центра РРС и направлением на источник зондирующих импульсов;

б) задержкой  $T_{каб}$  сигнала 5 МГц от БСУ до ББКос;

в) задержкой импульса  $T_{ббкос}^k$  в  $k$  канале ББКос и его регистрации СВУ ББКос;

г) изменением задержек б), в) по температуре;

д) изменением задержки  $\Delta T^k(V_{сигн})$  в зависимости от амплитуды сигнала, пропорционального энергии принятого оптического импульса;

е) изменением задержки  $\Delta T_{ббкос}(V_5)$  регистрации в зависимости от амплитуды синусоидального сигнала 5 МГц БСУ КА.

**Калибровка систематических погрешностей ББКос.** Геометрический фактор: зондирующий лазерный луч направлен под углом  $\beta_0 \leq 12^0$  к оси X;

ось X направлена на центр Земли с погрешностью  $\beta$  ( $\beta \ll 1$ ).

В этом случае погрешность  $\Delta T_{геом}$  равна

$$\Delta T_{геом} \approx (\Delta h / c) (1 - \beta^2/2) (1 - \beta_0^2/2) \times [1 + f_1(z/h, \beta_0) + f(z/h, \beta_0)], \quad (4)$$

где  $h$  – расстояние (по оси X) от центра отражения РРС до проекции ФПУ на ось X,  $z$  – расстояние от ФПУ до оси X КА;  $f_1$  и  $f$  – дополнительные поправки на взаимную ориентацию КА и источник лазерных импульсов; поправка на  $\beta_0 \neq 0$  и поправки  $f_1$  и  $f$  будут определяться для каждого сеанса на основе баллистических данных для конкретного времени сеанса.

Для ББКос-М, размещенной на технологической платформе КА Глонасс-М, ошибка  $\Delta h = \pm 2,5$  мм дает ошибку  $\pm 8$  пс; неопределенность  $\beta$  до  $0,5^0$  дает ошибку менее 1 пс. Без учета геометрии расположения «зондирующий источник – КА» неопределенность задержки может достигать 300 пс (для  $\beta_0 = 12^0$ , с учетом  $h = 3,6$  м).

Для ББКос на КА «Глонасс-К2», с ФПУ ББКос размещенном практически в центре отражения РРС,  $\Delta T_{геом}$  не превысит 10 пс для любого направления зондирующего луча.

Задержки ВЧ кабельной линией сигнала 5 МГц,  $T_{каб}$ , измерены на «расстыкованном» блоке КА «Глонасс-М», со смонтированными кабелями от БСУ до ББКос с суммарной задержкой 29,80 нс и 29,85 нс для основной и резервной линий. При этом вне гермоотсека использован фазовостабильный 50-Омный кабель SF301 фирмы HUBER+SUHNER: задержка 4,3 нс/м, изменение задержки фазы менее 1500ppm в диапазоне температур от минус 55 до 125 °С. В этой системе изменение задержки  $\Delta T_{каб}(t^{\circ}C)$  не превысит 20 пс, при условии изменения температуры внутри гермоотсека в диапазоне до  $\pm 2^{\circ}C$  и вне гермоотсека – от минус 55 до плюс 125 °С.

Задержка сигнала ББКос –  $T_{ббкос}^k$  и  $\Delta T_{ббкос}^k(t^{\circ}C)$ : каналы ББКос калибровались по абсолютной задержке, при температуре 25 °С и в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С. Изменение задержки с температурой  $\Delta T^k(t^{\circ}C)$  составляет (– 12) пс/°С в диапазоне от 0 до 50 °С (в диапазоне от 0 до минус 30 °С с увеличением от (–20) до (–70) пс/°С). Изменения с температурой одинаковы по всем каналам ФПУ.

Изменение задержки от амплитуды сигнала  $\Delta T^k(V_{сигн})$  обусловлено тем, что фронт нарастания аналогового сигнала на входе компаратора конечен (около 0,7 нс), а амплитуда сигнала меняется в зависимости от точности наведения абонента, пропускания атмосферной трассы, турбулентности атмосферы (порождающей спекловую структуру лазерного пучка). Таким образом, амплитуда сигнала на входе компаратора меняется от значения ниже порога до значений в 5–20 раз выше порога компаратора, что будет приводить к изменению задержки цифрового сигнала с выхода компаратора. Это влияние учитывается в ББКос-М тем, что амплитуда сигнала перед компаратором измеряется пиковым детектором; эти данные регистрируются для каждого импульса и передаются на Землю.

## Сводные данные погрешности измерений ББКос

Источник погрешности	Значение погрешности, пс, не более		
	Случайная $\sigma T$	Систематическая, $\Delta T$ (с калибровкой)	Примечание
Геометрия расположения	0	$\leq 10$	
Радиочастотные кабели 5 МГц (от БСУ до ББКос)	0	$\leq 50$	Измерения на объекте
Принятый ФПУ сигнал	$\leq \pm 70$	$\leq 40$	Для $c/\text{ш} \geq 10$
Сигнал 5 МГц от БСУ	$\leq \pm 25$	$\leq 10$	
Сетка 5 МГц + ИВИ ББКос	$\leq \pm 50$	0	
ББКос в целом (от объекта ФПУ до входа 5 МГц)	$\leq \pm 90$	$\leq 50$ (суммарно)	
Итого	до $\pm 90$	$\leq 110$	$c/\text{ш} \geq 10$
Суммарная погрешность ( $\sigma T + \Delta T$ )		$\leq \pm 200$	$c/\text{ш} \geq 10$

Такой вариант коррекции времени задержки от амплитуды на данном этапе работы представился более резонным, так как измерение амплитуды сигнала в данной работе необходимо еще по двум причинам: 1) для формирования укороченного массива данных (выбор импульсов с максимальной амплитудой); 2) надо знать уровень сигналов; это важнейший параметр, который надо получить в эксперименте, проводимом на КА ГЛОНАСС-М, для определения минимального диаметра приемной апертуры каналов ФПУ в будущих разработках.

Изменение задержки от амплитуды синусоидального сигнала 5 МГц  $\Delta T_{\text{бккос}}(V_5)$  обусловлено тем, что выделение момента времени перехода сигнала  $V_5 \sin \omega t$  через 0 дает неизбежную ошибку. В нашем случае, использования компаратора с порогом 0 мВ и гистерезисом 25 мВ, измеренный коэффициент изменения задержки с амплитудой составил ( $-1$  пс) / мВ.

Калибровка задержек ББКос проведена при работе с цезиевым генератором частоты (аналогичном штатному КА-М), имеющем амплитуду сигнала  $V_5 = 850$  мВ. Калибровка проводилась при комнатной температуре,  $(25 \pm 2)$  °С. Амплитуда сигнала указанного стандарта проверялась также в диапазоне температур от 17 до 30 °С: с точностью 10 мВ изменения амплитуды не замечено.

Амплитуда сигнала штатного БСУ КА измерена на согласованной нагрузке при  $T = 20$  °С:  $V_5^{\text{КА}} = 750$  мВ (размах 1500 мВ). Соответствующая поправка будет учтена. Дрейф задержки не превысит 10 пс, т.к. БСУ стабилизирован по температуре лучше 2 °С.

Сводные данные погрешности измерений ББКос приведены в таблице.

Погрешность (неопределенность калибровки систематической плюс одна сигма случайной ошибки) регистрации ББКос-М времени прихода лазерных импульсов на борту КА Глонасс-М в шкале времени БСУ КА не превышает 0,2 нс, при отношении сигнал/шум ФПУ более 10.

Отношение  $c/\text{ш} \geq 10$  обеспечено при получении ФПУ лазерного импульса длительностью менее 0,3 нс, с плотностью числа фотонов в плоскости приемной антенны ФПУ более 50 фотонов/мм<sup>2</sup>.

Для КА Глонасс-К2, с расположением ФПУ ББКос в центре отражения РРС и существенно

меньшей длиной кабелей БСУ-ББКос, погрешность оценивается в 0,15 нс.

Выводы.

Проведенные наземные испытания, измерения параметров, анализ погрешностей и калибровок опытного образца ББКос дали следующие результаты.

ББКос регистрирует лазерные импульсы в шкале времени опорного (бортового) синхронизирующего устройства.

Параметры принимаемых лазерных импульсов: длина волны 532 нм, плотность числа фотонов в импульсе на приемной апертуре от 50 до 5000 фот/мм<sup>2</sup>, длительность импульсов от 0 до 0,3 нс (с увеличением длительности линейно растет случайная ошибка измерения).

Погрешности регистрации указанных импульсов: СКО единичного измерения – не более 90 пс; систематическая ошибка калибруется до уровня 100 пс.

При размещении ББКос на технологической платформе КА Глонасс-М (на расстоянии 3,6 м от центра отражения РРС КА) необходимо знать взаимную ориентацию «зондирующий луч – ось X КА» (т. е. знать баллистические данные КА для конкретного времени сеанса и координаты абонента); неопределенность ориентации приводит к неопределенности соответствующего вклада систематической ошибки до 300 пс. Для КА Глонасс-К2, с расположением ФПУ ББКос в центре отражения РРС и существенно меньшей длиной кабелей БСУ-ББКос, систематическая погрешность калибровки может быть уменьшена до 50 пс (с неопределенностью от взаимной ориентации на порядок меньшей).

## Библиографические ссылки

1. Жабин А. С. Применение двухступенчатой системы фазовой синхронизации для обеспечения субнаносекундной точности измерений интервалов времени // Синхроинфо–2012 : материалы междунар. науч.-техн. семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» (25–27 июня 2012, Йошкар-Ола) ; под ред. профессора А. В. Пестрякова. М. : ООО «Брис-М», 2012. 164 с.
2. Artyukh Yu., Bepal'ko V., Boole E. Highresolution modular time interval counter // 12<sup>th</sup> Inter-

national Workshop on Laser Ranging. (13–17 Novem. 2000, Matera, Italy).

3. TDC-GPX. Ultra-high Performance 8 Channel Time-to-Digital Converter. Device data sheet [Электронный ресурс]. URL: www.acam.de.

#### References

1. Zhabin A. S. *Sinkhroinfo–2012 : materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar “Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov v infokommunikatsiyakh”* (Synchroinfo–2012. International scientific and technical seminar “Systems of

synchronizing, forming and processing signals in infocommunications”), 25–27 June 2012, Yoshkar-Ola. Edited by A. V. Pestryakov, DTPHil, professor. Moscow, Co Ltd “Bris-M”, 2012, 164 p.

2. Artyukh Yu., Bepal’ko V., Boole E. 12<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging “Highresolution modular time interval counter”. Matera, Italy, 13–17 November 2000.

3. TDC-GPX. Ultra-high Performance 8 Channel Time-to-Digital Converter. Device data sheet. Available at: www.acam.de.

© Жабин А. С., Набокин П. И., Батеев Д. С., Анжина В. А., 2013.

УДК 629.7.052

### СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ГЛОНАСС

Д. И. Марарескул

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52. E-mail: dimar@iss-reshetnev.ru

*Приводятся результаты исследования существующих условий навигационного обеспечения высокоорбитальных пользователей по сигналам ГНСС. Предложен способ модернизации системы ГЛОНАСС для повышения доступности и точности навигационного обеспечения высокоорбитальных потребителей. Показана возможность существенного повышения доступности и точности навигационного обеспечения высокоорбитальных пользователей вплоть до высот орбиты Луны и возможность автономной радионавигации космических аппаратов по сигналам ГЛОНАСС на трассе перелета к Луне и на окололунной орбите. Приводятся основные требования к диаграмме направленности, типу сигнала и мощности бортового источника навигационных сигналов для космических пользователей.*

*Ключевые слова:* ГЛОНАСС, высокоорбитальная, автономная навигация, ГСО, Луна.

### THE METHOD OF INCREASE OF AVAILABILITY OF HIGH ORBIT SPACECRAFT NAVIGATION SUPPORT BY GLONASS

D. I. Marareskul

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”  
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: dimar@iss-reshetnev.ru

*Results of research of the existing conditions of high-orbital users navigation support by GNSS signals are given in article. The way of modernization of GLONASS system for increase of availability and accuracy of high-orbital users navigation support is offered. The author shows the possibility of reasonable increase of availability and accuracy of high-orbital users navigation support in the area up to the heights of the Moon orbit, which opens the possibility of spacecraft autonomous navigation by GLONASS signals on the flight route from the Earth to the Moon and in the circumlunar orbit. The basic requirements to the directional diagram, the type of navigation signal and the power of onboard signal transmitting equipment for space users are presented.*

*Keywords:* GLONASS, high-orbital, autonomous navigation, GEO, Moon.

В просматриваемой перспективе развития космических полетов в ближнем космосе, а также полетов на Луну, является актуальным исследование возможности использования навигации по системе

ГЛОНАСС для космических аппаратов в рабочей зоне вплоть до высот орбиты Луны. Актуальность расширение зоны навигационного обслуживания системы ГЛОНАСС подкрепляется следующими факторами: