



О создании радиолазерных комплексов «Точка» для решения задач космической геодезии и навигации

Б.А. Борисов¹, С.И. Донченко², А.С. Жабин¹, В.В. Мурашкин¹, Н.Н. Пархоменко¹, Ю.А. Рой¹, [М.А. Садовников¹], А.Л. Соколов¹, Е.В. Титов¹, В.Д. Шаргородский¹

¹ АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, (ФГУП «ВНИИФТРИ»), Моск. обл., Россия

Измерительные системы лазерной дальнометрии, входящие в систему определения координатно-временных данных, предназначены для решения множества прикладных и фундаментальных задач. Для достижения высоких точностных характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС разработаны радио-лазерные станции нового поколения «Точка» и их модификации. В статье описаны методы достижения субмиллиметровой точности лазерных измерений дальности до КА с лазерными ретрорефлекторами и обеспечения субнаносекундной точности верификации бортовых шкал времени с наземными эталонами и шкалами удаленных центров времени.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, бортовые и наземные радиолазерные системы, ретрорефлекторные системы, лазерная дальнометрия, космические аппараты (КА), орбиты геодезических и навигационных КА, геоцентрические координаты наземных пунктов

Статья получена: 05.06.2022

Статья принята: 04.08.2022

Development of “Tochka” Radio-Laser Stations for the Purposes of Space Geodesy and Navigation Issues

B. A. Borisov¹, S. I. Donchenko², A. S. Zhabin¹, V. V. Murashkin¹, N. N. Parkhomenko¹, Yu. A. Roy¹, [M. A. Sadovnikov¹], A. L. Sokolov¹, E. V. Titov¹, V. D. Shargorodsky¹

¹ Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments” JC, (JC “RPC “PSI”), Moscow, Russia

² The Federal State Unitary Enterprise “Russian metrological institute of technical physics and radioengineering” (FSUE “VNIIFTRI”), Moscow region, Russia

The laser ranging measurement systems that are included in the coordinate-time data determination system, are designed to solve many application and fundamental problems. To achieve the high accuracy specifications of the GLONASS global navigation satellite system, new generation radio-laser stations “Tochka” and their modifications have been developed. This article describes the methods for achieving submillimeter accuracy of laser range measurements to the satellite vehicles with the laser retroreflectors and for ensuring subnanosecond verification accuracy of onboard time scales with the ground-based standards and remote time center scales.

Keywords: GLONASS, onboard and ground-based radio laser systems, retroreflector systems, laser ranging, satellite vehicles (SV), geodetic and navigation SV orbits, geocentric coordinates of ground points

Received on: June 05, 2022
Accepted on: August 04, 2022



ВВЕДЕНИЕ

Радио-лазерные станции нового поколения «Точка» и их модификации созданы для получения следующих координатно-временных данных:

- прецизионных (миллиметровой точности) лазерных измерений двухсторонней наклонной дальности до геодезических КА: Лагеос, Эталон, ГеоИК, Ларес, Блиц и др., оснащенных лазерными ретрорефлекторными системами (PPC) с целью решения задач космической геодезии, в том числе привязки с сантиметровой точностью начала систем координат к центру масс Земли и определения масштаба систем координат в рамках международной программы GGOS.
- прецизионных (миллиметровой точности) двухсторонних дальномерных лазерных измерений до PPC навигационных КА: ГЛОНАСС, Галилео, Бейдоу, GPS и др. с целью расчета высокоточных эфемерид навигационных КА.
- прецизионных определений моментов посылок лазерных импульсов («старт») в шкале времени станции (в шкале подключенного или внешнего эталона частоты и времени) на навигационные КА, оснащенные бортовыми модулями измерений моментов прихода лазерных импульсов (ББКOC) с целью получения нового параметра – «лазерной псевдодальности до КА», для определения расхождений с субнаносекундной точностью бортовых и наземных шкал времени, а также для прецизионной лазерной передачи времени через борт при больших расстояниях между удаленными центрами хранения времени.
- всепогодных псевдодальномерных (беззапросных) измерений радиочастотной системы (БИСКОС), входящей в состав радио-лазерной станции, по кодам и фазе несущей частоты с уменьшенными систематическими погрешностями за счет ее периодической калибровки по одновременным лазерным измерениям псевдодальности ББКOC в периоды достаточной прозрачности атмосферы в направлении на КА.

Создание радио-лазерных станций нового поколения «Точка» и ее последующих аналогов позволило не только достигнуть субмиллиметровой точности измерений дальности до НКА (20 000 км), но и обеспечить субнаносекундную точность верификаций бортовых шкал времени и шкал удаленных центров времени.

INTRODUCTION

The new generation radio-laser stations “Tochka” and their modifications are designed to obtain the following coordinate-time data:

- high-precision (millimeter accuracy) laser measurements of two-way range to the geodetic SVs: Lageos, Etalon, GeoIK, Lares, Blitz, etc., equipped with the laser retroreflector systems (RRS) in order to solve the space geodesy issues, including referencing the geodetic datum with the centimeter accuracy to the geocenter and determining the coordinate system scale as a part of the international GGOS program;
- high-precision (millimeter accuracy) two-way range laser measurements to the RRS of navigation SVs: GLONASS, Galileo, Beidou, GPS, etc. in order to calculate the high-precision ephemerides of navigation SVs;
- high-precision determination of the laser pulse sendings (“start”) based on the station’s time scale (the scale of a connected or external frequency and time standard) to the navigation SVs equipped with the on-board modules for laser pulse arrival measurement (BBQOS) in order to obtain a new parameter, namely the laser pseudo-range to the SV, to determine difference between the onboard and ground-based time scales with the subnanosecond accuracy, as well as for precision laser time transmission overboard at the large distances between the remote time storage centers;
- all-weather pseudo-range (microwave) measurements of the radio frequency system (BISQOS) being a part of the radio laser station, by the codes and carrier frequency phase with the reduced systematic errors due to its periodic calibration based on the simultaneous laser measurements of the BBQOS pseudo-range during the periods of sufficient atmospheric transmittance in the direction of the SV.

Development of the new generation radio-laser stations “Tochka” and its subsequent analogues has made it possible not only to obtain submillimeter accuracy of the range measurements to the navigation spacecrafts (20,000 km), but also to ensure subnanosecond verification accuracy of the onboard time scales and remote time center scales.

INITIAL STAGE OF “LASER GLONASS”

To achieve the high accuracy specifications of the GLONASS global navigation satellite system, provided for by the main indicators of the Federal Special-Purpose Program “GLONASS System Maintenance,

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП «ЛАЗЕРНОГО ГЛОНАССА»

Для достижения высоких точностных характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, предусмотренных основными показателями Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на период от 2012 до 2020 года было намечено создание лазерных средств нового поколения, реализующих прорывные информационно-измерительные технологии, совокупность которых получила в среде специалистов название «Лазерный ГЛОНАСС».

На более раннем этапе (в 1967 году) был создан экспериментальный задел для отработки слежения за КА в оптическом диапазоне в виде сети из трех пунктов: Евпатория, Алма-Ата и Китаб с телескопами диаметром 0,7; 0,5 и 0,5 м, оснащенными высокочувствительными ТВ системами. В период 1980–1985 годов в рамках ОКР были разработаны и проведены испытания 2-х очередей КОС «Сириус» (рис. 1) с двумя телескопами, изготовленными ЛОМО (АЗТ-24 «Э» и «А»), диаметром 1,1 м, предназначенными для траекторного контроля КА по измерениям угловых координат по отраженному солнечному блеску (1 очередь) и по лазерным измерениям дальности до бортовых ретрорефлекторов (2 очередь).

Квантово-оптическая система (КОС) «Сириус» была установлена на высокогорном пункте Космических войск на горе Майданак, высотой 2700 м, входящей в часть горной области Памиро-Алай на западе Узбекистана и имеющей один из лучших на Евразийском континенте астроклимат. В октябре 1982 года на телескопе АЗТ-24 «А» КОС «Сириус» была впервые в мире проведена лазерная локация КА высокоорбитальной навигационной системы «ГЛОНАСС», на бортах которых, начиная с № 1, были установлены панели лазерных ретро-

Development and Usage” in 2012–2020, it was planned to develop the new generation laser systems implementing the advanced information and measurement technologies that which received the name “Laser GLONASS” among specialists.

At an earlier stage (in 1967), an experimental groundwork was provided for spacecraft tracking in the optical range as a network consisting of three points: Evpatoria, Alma-Ata and Kitab with the telescopes with a diameter of 0.7, 0.5 and 0.5 m equipped with the highly sensitive TV systems. In 1980–1985, as a part of research and development activities, 2 stages of the Sirius Quantum Optical System were developed and tested (fig. 1) with two telescopes manufactured by LOMO (AZT-24 “E” and “A”), with a diameter of 1.1 m, designed for trajectory SV control by mea-



Рис. 1. Квантово-оптическая система «Сириус» (1-я очередь в интересах ГНС «ГЛОНАСС» введена в эксплуатацию в 1980 году; 2-я очередь – в 1985 году): а) телескоп на экваториальной монтировке; б) телескоп на азимутальной монтировке; в) космонавт Герман Титов, генеральный заказчик КОС «Сириус» и В. Д. Шаргородский, генеральный конструктор; д) КОС «Сириус» на горе Майданак, Памиро-Алай, Узбекистан, Н=2700 м

Fig. 1. Quantum-optical system “Sirius” (for the benefit of GLONASS GNS, the 1st stage was commissioned in 1980; the 2nd stage was commissioned in 1985): a) a telescope with an equatorial mounting; b) a telescope with an azimuth mounting; c) cosmonaut German Titov, general customer of the Sirius QOS and V. D. Shargorodsky, general designer; d) Sirius QOS on Maidanak Mountain, Pamir-Alai, Uzbekistan, H=2700 m

рефлекторов нашей разработки, включенные в состав штатной бортовой аппаратуры всех последующих навигационных (и геодезических) отечественных КА.

В КОС «Сириус» использовался рубиновый лазер с энергией 0,5 дж, частотой 10 гц и длительностью импульса 30 нс. Погрешность измерений дальности (с осреднением за 60 сек) составила $s \leq 20$ см. Этот результат 40 лет назад был уникален по точности, сейчас – это точка начала отсчета в борьбе за точность! Гранатовые лазеры с более коротким импульсом $t \leq 50\text{--}300$ пс появились значительно позже.

С 1992 года лазерный пункт на горе Майданак с КОС «Сириус» перешел под юрисдикцию республики Узбекистан и на основании межправительственного соглашения с Россией успешно совместно эксплуатировался еще 10 лет, при этом точность измерений дальности была доведена (благодаря переходу на гранатовые (Nd:YAG) лазеры) до 2 см.

В 2001 году соглашение не было пролонгировано, в связи с чем после более чем 20-летней эксплуатации КОС «Сириус» был переведен в режим хранения с возможностью проведения астрофизических наблюдений.

В связи с необходимостью продолжения работ по лазерной локации КА в условиях хорошего астроклимата уже в 2006 году в Змеиногорском районе Алтайского края (Россия) была введена первая очередь АОЛЦ ($h=300$ м) с телескопом траекторных измерений (ТТИ) 60 см (рис. 3). Одновременно были начаты проектные и строительные работы на верхней площадке ($h=380$ м) по строительству башни и монтажу многоцелевого телескопа диаметром 3,1 м, которые планируется завершить в 2024 году (рис. 2)

На дальнейшем этапе (до 2012 года) для отработки аппаратуры (в первую очередь лазерных передатчиков на гранате), технологий наведения, слежения, получения прецизионных оптических измерений угловых координат и лазерной дальности до геодезических и навигационных КА АО «НПК «СПП» – головной организацией Роскосмоса по созданию квантово-оптических систем (КОС) были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию опытные образцы КОС в Щелково и Менделеево (Подмосковье), в Комсомольске-на-Амуре, на Алтае и в ряде других пунктов как в стационарном (Сажень-С, Сажень-Т), передислоцируемом (Сажень-ТОС), так и в малогабаритном (серийном) (Сажень-ТМ) вариантах исполнения (рис. 3).



Рис. 2. Алтайский оптико-лазерный центр (2-я очередь), справа башня телескопа ТИ, диаметр 3,1 метра

Fig. 2. Altai Optical Laser Center (2nd stage), right: a tower of the trajectory measurement telescope with the diameter of 3.1 meters

sureing the angular coordinates by reflected sunlight (stage 1) and by laser range measurements to the onboard retroreflectors (stage 2).

The Sirius Quantum Optical System (QOS) was installed at the high-mountain point of the Space Forces on Maidanak Mountain with the height of 2700 m being a part of the Pamir-Alay mountain region in western Uzbekistan and having one of the best astronomical climates on the Eurasian continent. In October 1982, the SV laser ranging was performed by the GLONASS high-orbiting navigation system for the first time in the world using the AZT-24 “A” telescope of the Sirius QOS. The array of laser retroreflectors designed by PSI were installed onboard (starting from No.1) and integrated in the host onboard instrumentation of all subsequent navigational (and geodetic) domestic SVs.

The Sirius QOS used a ruby crystal laser with an energy of 0.5 J, a frequency of 10 Hz, and a pulse duration of 30 ns. The range measurement error (averaging over 60 seconds) was $s \leq 20$ cm. This result was unique in terms of accuracy 40 years ago, and now it is the starting point in the struggle for accuracy! The garnet lasers with the shorter pulses $t \leq 50\text{--}300$ ps appeared much later.

Since 1992, the laser station with the Sirius QOS on Maidanak Mountain came under the jurisdiction of the Republic of Uzbekistan. On the basis of an intergovernmental agreement with Russia, it was successfully and jointly operated for another 10 years, while the range measurement accuracy was improved



Рис. 3. Лазерный ГЛОНАСС (2012 г.), квантово-оптические системы АО «НПК «СПП» (варианты исполнения): а) Сажень-Т в Щелково, Моск. обл. (2000 г.), телескоп и башня; б) Сажень-ТМ в Светлое (2005 г.), телескоп, башня и комплект электронной аппаратуры «Сажень-ТМ»; в) Сажень-С в Комсомольске-на-Амуре (1988 г.), телескоп и техническое здание с башней телескопа; д) Сажень-ТОС на Байконуре, 2006 г.; е) Сажень-Т (ТТИ) в Алтайском оптико-лазерном центре (1-я очередь, 2006 г.)

Fig. 3. Laser GLONASS (2012), quantum-optical systems by Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" JC (versions): a) Sazhen-T in Shchelkovo, Moscow region (2000), a telescope and a tower; b) Sazhen-TM in Svetloe (2005), a telescope, a tower and a set of electronic equipment "Sazhen-TM"; c) Sazhen-S in Komsomolsk-on-Amur (1988), a telescope and a technical building with a telescope tower; d) Sazhen-TOS at Baikonur, 2006; e) Sazhen-T (TMT) in the Altai Optical Laser Center (1st stage, 2006)

Всего к 2015 году было введено более 30 КОС различной конструкции, в том числе на зарубежных пунктах: «Байконур, Бразилия, ЮАР, из которых в настоящее время задействовано не менее 20 станций (рис. 4).

Серийная малогабаритная квантово-оптическая станция «Сажень-ТМ» – разработка 2005 года (рис. 3б). Частота повторений импульсов 300 Гц, энергия в импульсе 2,5 мДж, длительность лазерного импульса 200 пс. Станция, кроме измерения лазерной дальности до КА, может измерять угловые координаты КА и его фотометрические харак-

(due to transition to the garnet (Nd:YAG) lasers) up to 2 cm.

In 2001, the agreement was not extended, due to which, after more than 20 years of the Sirius QOS operation, it was put to the storage mode with the possible conduction of astrophysical observations.

Due to the need to continue the SV laser ranging works in a good astronomical climate, in 2006 the first stage of the Altai Optical and Laser Center ($h=300$ m) with a trajectory measurement telescope (TMT) $\varnothing 60$ cm was commissioned in the Zmeinogorsk district of the Altai region (Russia) (fig. 3). The design and construction works were simultaneously



теристики. Ниже в табл. 1 приведены основные характеристики «Сажень-ТМ».

Одновременно с расширением сети станций шла отработка новых технологий измерений на серийной КОС типа «Сажень-ТМ». В их числе был метод одноэлектронной высокоточной лазерной дальнометрии – на пункте Института прикладной астрономии РАН в п. Светлое (под Санкт-Петербургом (рис. 4b), технология колокации на 3-х пунктах РСДБ ИПА РАН: Светлое, Зеленчукская (Северный Кавказ) и Бадары (восточная Сибирь) (рис. 5), метод обеспечения проведения измерений дальности до КА в дневное время суток

commenced on the upper platform ($h=380$ m) for the tower construction and installation of a multi-purpose telescope with a diameter of 3.1 m to be completed in 2024 (fig. 2)

At a further stage (until 2012), in order to test the equipment (primarily, the garnet laser transmitters), guidance and tracking technologies, to obtain the high-precision optical measurements of angular coordinates and “laser range to the geodetic and navigation SVs, Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments “ JC (an umbrella organization of the Federal Space Agency of the Russian Federation for development of quantum optical

Таблица 1. Характеристики квантово-оптической станции «Сажень-ТМ»

Table 1. Specifications of the Sazhen-TM quantum optical station

Дальность	Угловые координаты	Фотометрия
Высота орбит КА до 23 000 км СКО Нормальных точек* 3–8 мм	Видимая звездная величина не слабее 12 ^m СКО измерений 1–2 угл. с. Угловые скорости до 40 угл. с	Видимая звездная величина не слабее 11 ^m СКО фотометрии не более 0,2 ^m

* Нормальной точкой в Международной службе лазерной дальнометрии (ILRS) принято называть усредненное значение дальности по измерениям, полученным на определенном временном интервале, принятом для данного типа КА.



Рис. 5. Узел колокации «Бадары» (Сибирь)
Fig. 5. Badary collocation unit (Siberia)

на наших зарубежных КОС «Сажень-ТМ» в университете г. Бразилиа (рис. 6) и в Хартебестхук, ЮАР (рис. 7).

Измерения КОС используются в Системе высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) ГЛОНАСС, предназначенной для обеспечения достижения заданных технических характеристик при решении навигационных задач в оперативном и апо-



Рис. 6. Методы обеспечения работы в дневное время суток впервые реализованы на КОС «САЖЕНЬ-ТМ» в г. Бразилиа (Бразилия). Введена в эксплуатацию в июне 2014 года

Fig. 6. The daytime work support methods were first implemented at the SAZHEN-TM QOS in Brasilia (Brazil). It was commissioned in June 2014

systems (QOS) developed, manufactured and commissioned the QOS prototypes in Shchelkovo and Mendeleevo (Moscow region), in Komsomolsk-on-Amur, in the Altai region and in a number of other places, both in the stationary (Sazhen-S, Sazhen-T), movable. (Sazhen-TOS), and in the small-sized (serial) (Sazhen-TM) versions (fig. 3).

In total, by 2015, more than 30 QOSs with various designs were commissioned, including at the foreign points: Baikonur, Brazil, South Africa, of which at least 20 stations are currently in operation (fig. 4).

The serial small-sized quantum-optical station “Sazhen-TM” was developed in 2005 (fig. 3b). Its pulse repetition rate is 300 Hz, the pulse energy is 2.5 mJ, the laser pulse duration is 200 ps. In addition to the laser range measurement to the SV, the station can also measure the SV angu-



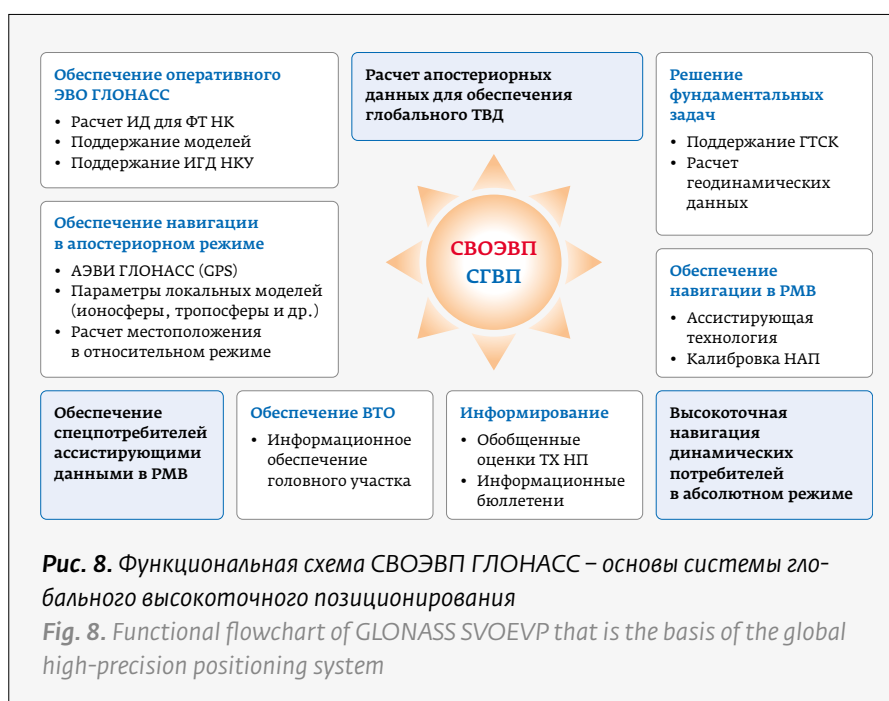
Рис. 7. КОС «Сажень-ТМ», установленная в 2016 году в ЮАР на территории Радиоастрономической обсерватории Хартебестхук (ХартРАО), примерно в 50 км к западу от Йоханнесбурга

Fig. 7. Sazhen-TM QOS, installed in 2016 in South Africa on the territory of the Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory (HartRAO), about 50 km west of Johannesburg

стериорном режимах за счет использования данных СВОЭВП в ЭВО ГЛОНАСС, специальными и гражданскими потребителями.

Измерения КОС используются в СВОЭВП ГЛОНАСС при решении следующих задач (рис. 8):

- контроль передачи параметров государственной геоцентрической системы координат (ГГСК) потребителям навигационных сигналов ГЛОНАСС;
- расчет параметров связи и контроль соответствия параметров ГГСК международной системе координат (ITRF);
- контроль выходной информации СВОЭВП (апостериорной эфемеридной информации) – по запросным лазерным измерениям дальностей, апостериорной частотно-временной информации по совмещенным измерениям запросных лазерных дальностей КОС и беззапросных дальностей БИС, установленных на КОС, а также по результатам беззапросных измерений БКОС;
- использование лазерных измерений дальности для расчета скоростей движения пунктов в целях уточнения и поддержания исходных геодезических данных средств НКУ ГЛОНАСС;
- уточнение выносов фазовых центров антенных систем КА и анализ качества работы системы ориентации КА;
- расчет калибровочных поправок навигационной аппаратуры ГЛОНАСС, оценка точностных характеристик НАП;
- расчет калибровочных поправок и контроль точностных характеристик запросных и беззапросных радиотехнических измерительных систем;
- сопровождение аварийных КА «Глонасс» в случае частичного и полного отказа бортовых радиотехнических комплексов, в том числе с обеспечением наблюдения в дневное время суток;
- верификация и уточнение параметров моделей, используемых в СВОЭВП (модели геопотенциала, модели приливов и т. д.).



lar coordinates and its photometric specifications. Table 1 below shows the main specifications of Sazhen-TM.

Simultaneously with the station network expansion, new measurement technologies were being tested using the serial QOSs “Sazhen-TM”, including the single-electron high-precision laser ranging method at station of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences in Svetloe (near Saint-Petersburg (fig. 4b), colocation technology at 3 sites for very-long-base-line radiointerferometry of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences in Svetloe, Zelenchukskaya (Northern Caucasus) and Badary (eastern Siberia) (fig. 5), the SV range measurement method in the daytime using our foreign Sazhen-TM QOSs at the university of Brasilia (fig. 6) and in Hartebeesthoek, South Africa (fig. 7).

The QOS measurements are used in the GLONASS High-precision Ephemeris and Time Correction System (SVOEVP), designed to ensure the specified technical specifications, when solving the navigation problems in operational and a posteriori modes by using the SVOEVP data in the GLONASS EVO by the special and commercial consumers.

The QOS measurements are used in GLONASS SVOEVP for completing the following tasks (fig. 8):

- control over the transfer of parameters of the state geocentric coordinate system (SGCS) to the consumers of GLONASS navigation signals;

СОЗДАНИЕ НОВЫХ РАДИОЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ «ТОЧКА»

В связи с дальнейшим повышением требований к точности и надежности лазерных систем эфемеридно-временного обеспечения космических систем геодезии и навигации впервые в мировой практике АО «НПК «СПП» в рамках ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» (ред. 2017 года) создан для «Комплекса средств фундаментального обеспечения» (КСФО) ГЛОНАСС радиолазерный всепогодный круглосуточный автоматизированный измерительный комплекс «Точка» миллиметровой точности (рис. 9). Основные тактико-технические характеристики комплекса «Точка» даны в табл. 2, состав аппаратуры – в табл. 3.

Радиолазерным назван интегрированный измерительный комплекс, выполняющий с помощью квантово-оптической системы (КОС) лазерные измерения дальности и псевдодальности по навигационным и/или геодезическим космическим аппаратам, оснащенным лазерными ретрорефлекторами (ЛРР) и фотоприемными



Рис. 9. Радиолазерный, всепогодный, круглосуточный комплекс «Точка» миллиметровой точности

Fig. 9. Radio laser, all-weather, 24 h "Tochka" system with millimeter accuracy

- calculation of communication parameters and control of the SGCS parameter compliance with the international coordinate system (ITRF);

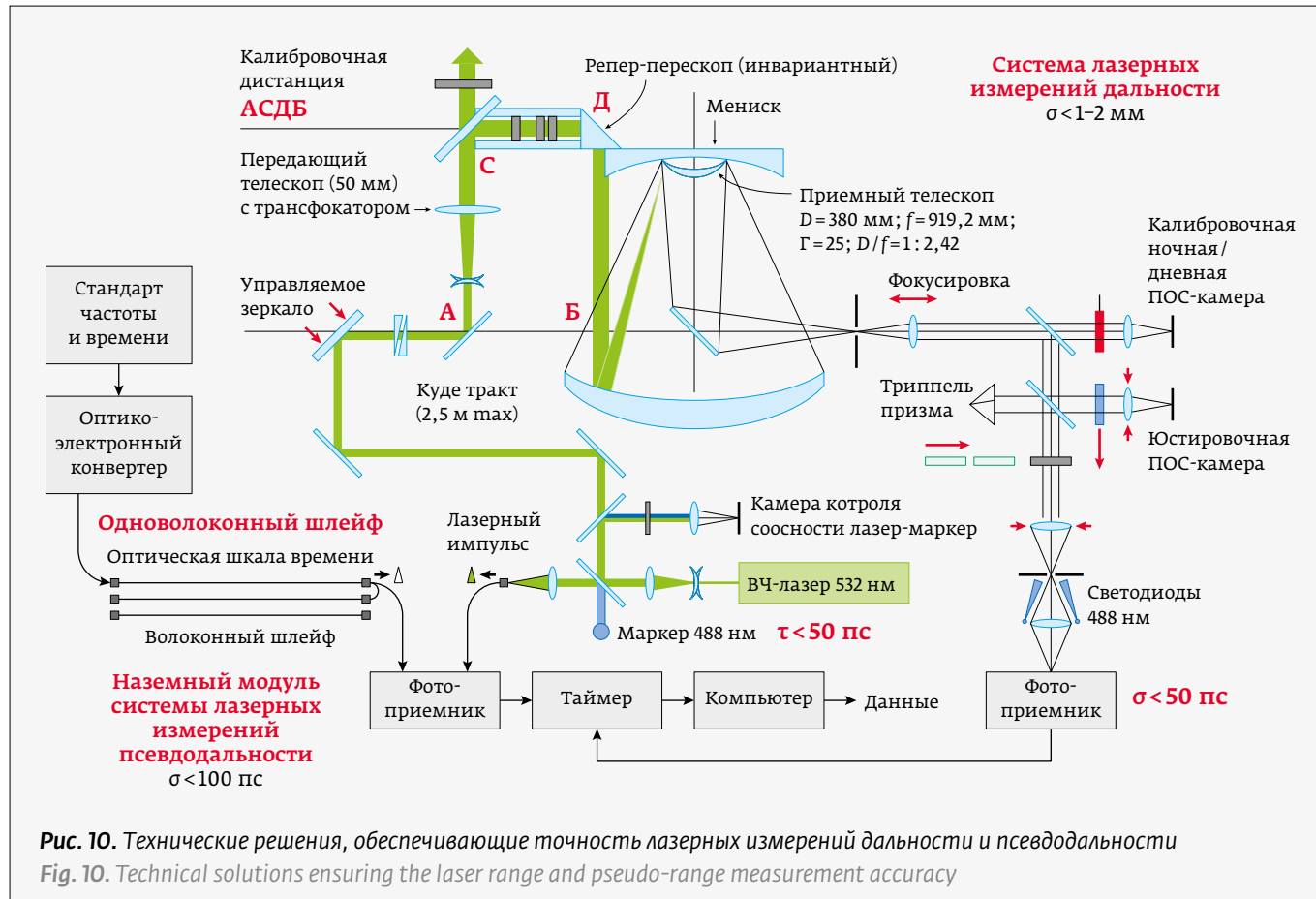




Таблица 2. Основные тактико-технические характеристики комплекса «Точка»

Table 2. Main performance characteristics of the Tochka system

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых дальностей	250–25 000 км
Погрешность лазерных измерений (σ):	
двухпутевой дальности (NP)	1 мм
псевдодальности (NP)	6 мм (20 пс)
Систематическая ошибка	
двухпутевой дальности	1 мм
псевдодальности	9 мм (30 пс)
Погрешность радиотехнической псевдодальности БИС GTR-51(σ)	
по фазе	9 мм (30 пс)
по коду	120 мм (400 пс)
Погрешность передачи времени	<1 нс

устройствами (ББКOC), совместно со специализированными радиочастотными беззапросными системами (БИС), выполняющими навигационные измерения радиотехнической псевдодальности по навигационным радио-сигналам КА, при этом радио и лазерные измерения привязываются к единой шкале времени станции и приведены к общей опорной геодезической точке. На рис. 10

- control of the SVOEVP output information (a posteriori ephemeris information) according to the two-way laser range measurements, a posteriori time-frequency information relating to the combined measurements of the QOS two-way laser ranges and the one way ranges of the microwave measurement station (BIS) installed on the QOS, as well as according to the results of the “one way” measurements of the QOS;
- use of laser range measurements for calculating the site movement speed in order to clarify and maintain the initial geodetic data of the GLONASS ground control complexes;
- clarification of the phase center offsets of the SV antenna arrays and quality analysis of the SV attitude control system;
- calculation of calibration corrections for the GLONASS navigation equipment, evaluation of the accuracy specifications of the users’ navigation equipment;
- calculation of calibration corrections and control of accuracy specifications of the interrogative and microwave radio engineering measurement systems;
- support of GLONASS emergency SVs in the case of partial and complete failure of on-board radio engineering complexes, including the daytime surveillance;
- verification and adjustment of the model parameters used in SVOEVP (geopotential models, tide models, etc.).

Таблица 3. Состав радио-лазерного измерительного комплекса «Точка» (с комплектом ЗИП, эксплуатационной и программной документацией)

Table 3. Configuration of the Tochka radio-laser measurement system (with a set of spare parts, operating and software documentation)

Квантово-оптический модуль (размещаемый в куполе-укрытии), в составе:	Оборудование (для размещения и монтажа), в составе:	Оборудование (для размещения и монтажа), в составе:
<ul style="list-style-type: none"> • опорно-поворотное устройство с цифровым электроприводом; • приемный и передающий оптические телескопы; • оптико-механический блок с лазерным передатчиком и ПЗС камерой контроля наведения; • оптико-механический блок с фотоприемником и ПЗС камерой контроля соосности; аппаратура облучения летальных аппаратов. 	<ul style="list-style-type: none"> • вычислительно-управляющий комплекс с комплектом общего и специального ПМО; • система синхронизации и опорных частот; • система измерения дальности; • система измерения времен посылки лазерных импульсов; • навигационный приемник[*]; • аппаратура приема и передачи данных; • автоматический измеритель метеопараметров. 	<ul style="list-style-type: none"> • быстровозводимый модуль технического здания; • автоматизированный купол-укрытие; • система осушения воздуха и предотвращения запотевания оптики в подкупольном пространстве; • система электропитания; • комплект кабельных соединений; • комплект транспортировочной тары

* Антенна навигационного приемника и сенсоры измерителя метеопараметров размещаются вне здания на отдельных пилонах



показана схема, иллюстрирующая технические решения, обеспечивающие точность лазерных измерений дальности и псевдодальности.

КАЛИБРОВКА ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В лазерной станции «Точка» для обеспечения миллиметровой точности собственных лазерных измерений дальности выполняются калибровки дальномерного канала путем использования встроенной эталонной дистанции, обозначенной на рис. 10 буквами АСДБ, в которую переотражается малая часть излучаемого лазерного импульса. Эта дистанция (около одного метра) предварительно измеряется и паспортизируется с погрешностью менее 1 мм, а калибровочные измерения выполняются одновременно с каждым измерением дальности до КА.

Отсчет калибровочной дистанции и расстояний до КА по замыслу должен начинаться общим «стартом» и заканчиваться двумя «стопами» в моменты пересечения лазерными импульсами горизонтальной оси вращения телескопа. Поскольку лазерные приемники «старт» и «стоп» находятся на разных удалениях от этой оси вращения, то и калибровочная и космическая дистанции должны быть скорректированы.

В связи с тем, что калибровочная дистанция измеряется 1-м «стопом», то аппаратурная (инструментальная) поправка лазерного дальномера (ЛД) точно определяется вычитанием значения задержки времени в эталонной дистанции из калибровочного измерения ЛД с прибавлением вычисленной дополнительной временной задержки света в оптических элементах передающего тракта (выше горизонтальной оси) и в мениске приемного телескопа. Далее аппаратурная поправка вычитается из каждого измерения дальности до КА. При этом остаточная систематическая погрешность калибровки измерений дальности не превышает 1 мм.

Величина и стабильность привязки моментов измерений дальности к шкале местного эталона времени контролируется с помощью измерений задержки лазерной метки в волоконном двукратном шлейфе линии передачи сигналов времени и частоты от центрального синхронизатора (ЦС) длиной до 2 км.

РАДИОЛАЗЕРНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ НКУ КК СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

На основе конструктивных решений радиолазерного комплекса «Точка», успешно прошедшего государственные испытания в 2021 году, разработаны

DEVELOPMENT OF NEW RADIO-LASER STATIONS "ТОЧКА"

Due to the further tightening of requirements for the accuracy and reliability of laser systems for ephemeris-time support of space geodesy and navigation systems, as a part of the Federal Special-Purpose Program "GLONASS System Maintenance, Development and Usage" (revised in 2017), Research and Production Corporation "High-Precision Instrumentation Systems" JSC for the first time in the world practice developed the radio-laser all-weather 24h automated measurement complex "Tochka" with millimeter accuracy for the GLONASS Fundamental Support System (fig. 9). The main performance characteristics of the Tochka system are given in table. 2, the equipment configuration is given in table 3.

The integrated measurement complex is called radio-laser, since it uses a quantum optical system (QOS) for the laser range and pseudo-range measurements based on the navigation and/or geodetic spacecrafts equipped with the laser retroreflectors (LRR) and photodetectors (BBQOS), together with the specialized microwave systems (BIS) that perform navigation measurements of radio engineering pseudo-range using the SV navigation radio signals, while the radio and laser measurements are related to a single station time scale and are brought to a common reference geodetic point. Figure 10 shows a diagram with the technical solutions that ensure the laser two way range and pseudo-range measurement accuracy.



Рис. 11. «Сажень-Л» (п. Алтай)

Fig. 11. Sazhen-L (Altai settlement)



опытные образцы для сети станций «Сажень-К» (п. Щелково) и «Сажень-Л» (п. Алтай) (рис. 11) для НКУ КК системы ГЛОНАСС, которые должны обеспечивать следующие виды измерений:

- а) лазерные измерения дальности до навигационных и геодезических КА, включая стеклянный спутник нового поколения;
- б) лазерные измерения псевдодальности до КА, серии «Глонасс-К» и «Глонасс-К2», оснащенных модулями ББКОВ;
- в) радиочастотные измерения псевдодальности по навигационным сигналам всех КА орбитальной группировки ГЛОНАСС, согласованные по шкалам времени и опорным точкам с лазерными измерениями;
- г) измерения угловых координат навигационных КА и КО по отраженному солнечному излучению при естественном блеске не слабее 15^m ;
- д) встречные лазерные псевдодальномерные измерения с модулями МЛНСС (МЛНСС – бортовая межспутниковая лазерная навигационная система связи), установленными на КА серии «Глонасс-К2»;
- е) прием от МЛНСС межспутниковых лазерных измерений и других данных, а также передачу информации на КА, оснащенные МЛНСС.

Станции типа «Сажень-К» обеспечивают четыре первых вида измерений, станции типа «Сажень-Л» – все шесть.

ЦЕЛЬ СОЗДАНИЯ СЕТИ ЛАЗЕРНЫХ СТАНЦИЙ «САЖЕНЬ-К» И «САЖЕНЬ-Л»

Данные измерений сети лазерных станций типа «Сажень-К» и «Сажень-Л» необходимы для повышения точности:

- привязки ГГСК к центру масс Земли и параметров связи с Международной ГСК до 0,01 м;
- контроля навигационного поля по эфемеридам до 0,01 м и по XDC до 0,03 м (0,1 нс);
- контроля БСУ до 0,1 нс и точности синхронизации ЦС ГЛОНАСС с ГЭВЧ до 0,15 нс;
- определения задержек в бортовой и наземной навигационной аппаратуре до 0,02 м (калибровка).

РЕТРОРЕФЛЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ (РРС) АО «НПК «СПП»

Оптический диапазон открывает исключительные возможности для повышения дальности и точности лазерной локации при установке на бортах космических аппаратов различных ретро-

CALIBRATION OF LASER MEASUREMENTS

To ensure the millimeter accuracy of own laser range measurements, the Tochka laser station calibrates the range channel by using the built-in reference distance, indicated in fig. 10 by the letters “ASDB”, to which a small part of the emitted laser pulse is re-reflected. This distance (about one meter) is preliminarily measured and certified with an error of less than 1 mm, and the calibration measurements are performed simultaneously with each range measurement to the SV.

As envisioned, measurement of the calibration distance and distances to the SVs should begin with a common “start” and end with two “stops” when the laser pulses cross the horizontal rotation axis of the telescope. Since the “start” and “stop” laser receivers are located at various distances from this rotation axis, both the calibration and space distances must be corrected.

Due to the fact that the calibration distance is measured by the 1st “stop”, the instrumental correction of the laser rangefinder (LR) is precisely determined by subtracting the time delay value in the reference distance from the LR calibration measurement with addition of the calculated additional light time delay in the optical elements of transmission path (above the horizontal axis) and in the concave-convex lens of the receiving telescope. Further, the instrumental correction is subtracted from each range measurement to the SV. In this case, the residual systematic error of the range measurement calibration does not exceed 1 mm.

The magnitude and stability of matching the range measurement points to the local time standard scale is controlled by measuring the laser mark delay in the dual fiber loop of the time and frequency signal transmission line from the central synchronizer (CS) with the length of up to 2 km.

RADIOLASER STATIONS FOR THE GROUND CONTROL COMPLEXES OF THE GLONASS SYSTEM

Based on the design solutions of the Tochka radiolaser complex that successfully passed the official tests in 2021, the prototypes were developed for the network of Sazhen-K stations (Shchelkovo settlement) and Sazhen-L stations (Altai settlement) (fig. 11) for the ground control complexes of the GLONASS system that should provide the following types of measurements:

- a) laser range measurements to the navigational and geodetic SVs, including a new generation glass satellite;



лекторных систем. Это позволило оснастить ими большое число отечественных КА (табл. 4), что обеспечило возможность значительного повышения (на порядок и более) точности определения их орбит за счет применения средств лазерной дальнометрии и получения глобальной измерительной информации путем обмена данными с Международной службой лазерной дальнометрии (ILRS), которая, в свою очередь, поддержала установку на многих зарубежных ка наших РРС, в том числе на таких, как GPS и Galileo (табл. 5). Ниже рассмотрены наиболее эффективные из них, разработанные в АО «НПК «СПП» применительно к решению задач космической навигации, космической геодезии и испытаний космической техники.

Для КА «ГЛОНАСС-К2» создана кольцевая ретрорефлекторная система (КРС), состоящая из 36 уголкового отражателей (УО) увеличенного размера (рис. 12 а). Для компенсации углового смещения лазерного луча, вызванного скоростью абберацией света, диаграмма направленности каждого уголкового отражателя КРС состоит из двух высокоэнергетических световых пятен (вместо семи световых пятен с меньшей энергией у изделий-аналогов), одно из которых возвращает излучение на лазерную станцию. Фотоприемник КОС будет регистрировать сигналы от УО, которые расположены на противоположных сторонах КРС и имеют мгновенную ориентацию вдоль вектора скорости КА. Наличие двух неискаженных сигналов вместо одного, растянутого, как в более ранних изделиях-аналогах, позволит для КА «Глонасс-К2» уменьшить погрешность измерения дальности до центра панели в несколько раз, до величины примерно 1мм. Тем самым погрешность, вносимая бортовым сегментом (КРС), будет соответствовать погрешности наземного сегмента (КОС типа «Точка»).

- b) laser pseudo-range measurements to the SVs (Glonass-K and Glonass-K2 series equipped with the BBOOS modules);
- c) radio-frequency pseudo-range measurements based on the navigation signals from all SVs of the GLONASS orbit group, coordinated by the time scales and reference points with the laser measurements;
- d) measurements of the angular coordinates of navigation SVs and spacecrafts by the reflected solar radiation with the natural brightness not weaker than 15^m ;

Таблица 4. Лазерные панели ретрорефлекторов АО «НПК «СПП» для российских космических аппаратов

Table 4. Laser array of retroreflectors by Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" JC for the Russian spacecrafts

Наименование космического аппарата	Высота орбиты, км	Год запуска	Количество космических аппаратов
Салют-4	350	1975	1
Цикада-11,-13	1000	1976	2
Метеор-1	950	1976	2
Молния -1С	36000	1974	1
Радуга	–	1976	2
ГЕОИК	–	с 1981 по 1990	11
ГЛОНАСС	19100	с 1982 по 2005	85
Эталон-1,-2	19100	1989	2
Ресурс-0	620	1992	1
Метеор-2	950	1993	1
Метеор-3	1200	1994	1
Зая	–	1997	1
Метеор-3М1	1020	2002	1
ЛАРЕЦ	690	2003	1
Можаяц	–	2003	1
ГЛОНАСС-М	19100	с 2002 по 2020	50
БЛИЦ 2009	832	2009	1
Спектр-Р	Эллиптическая	2011	1
ГЛОНАСС-К	19100	с 2011 по 2014	2
		с 2020 по 2022	2
Ломоносов	550	2016	1
Гео-ИК-2	–	с 2016 по 2019	2

* Около 170 космических аппаратов оборудованы панелями с ретрорефлекторами

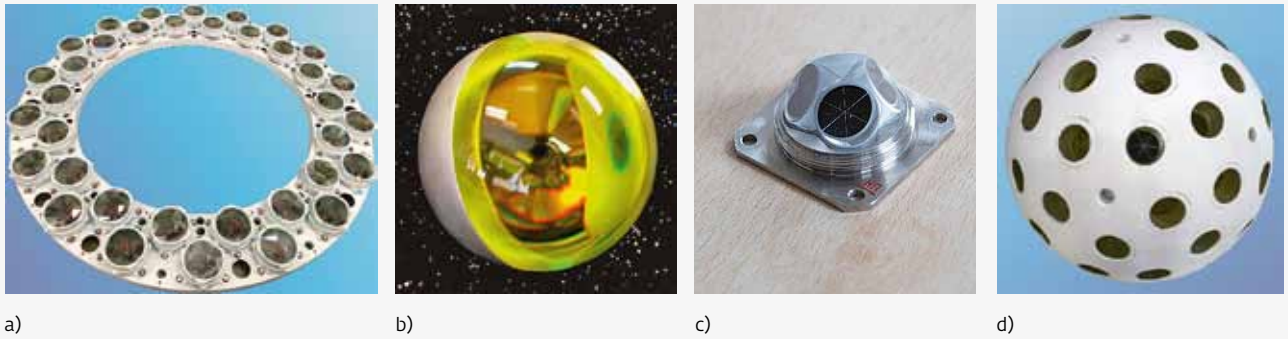


Рис. 12. Ретрорефлекторные системы АО «НПК «СПП»: а) Кольцевая ретрорефлекторная система (КРС) для КА «ГЛОНАСС-К» (19100 км); б) спутник БЛИЦ (был запущен, как попутная нагрузка при запуске КА «Метеор», H = 832 км, 2009 год); в) ретрорефлекторная система «Пирамида» (была установлена на КА «Ломоносов», 2016 г., H = 550 км); д) спутник «ГЛАСС» (макет)

Fig. 12. Retroreflector systems by Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" JC: a) Ring retroreflector system (RRS) for GLONASS-K SV (19100 km); b) BLITS satellite (it was launched as a hitchhiker payload during the Meteor SV launch, H = 832 km, 2009); c) Pyramid retroreflector system (installed on the Lomonosov SV, 2016, H = 550 km); d) GLASS satellite (model)

21 сентября 2009 года произведен запуск космического аппарата «Метеор-М», от которого отделен сферический стеклянный наноспутник «Блиц» (рис. 14). Глобальную поддержку орбиты «Блиц» обеспечили Российские КОС и станции Международной службы лазерной дальнометрии по соглашению между Роскосмосом и ILRS. Основные параметры спутников «Блиц» и «Блиц-М» приведены в табл. 4.

Спутники типа «Блиц» и «ГЛАСС» (рис. 12b, d; рис. 14) – ретрорефлекторные сферические системы нового поколения, выполнены полностью из стекла. В отличие от металлических предшественников, такое исполнение исключает торможение магнитным полем Земли вращения спутника вокруг собственной оси, которое необходимо для усреднения измерительных данных.

Спутники «Блиц» являются отдельным видом ретрорефлекторных сферических систем с проектной «ошибкой цели»

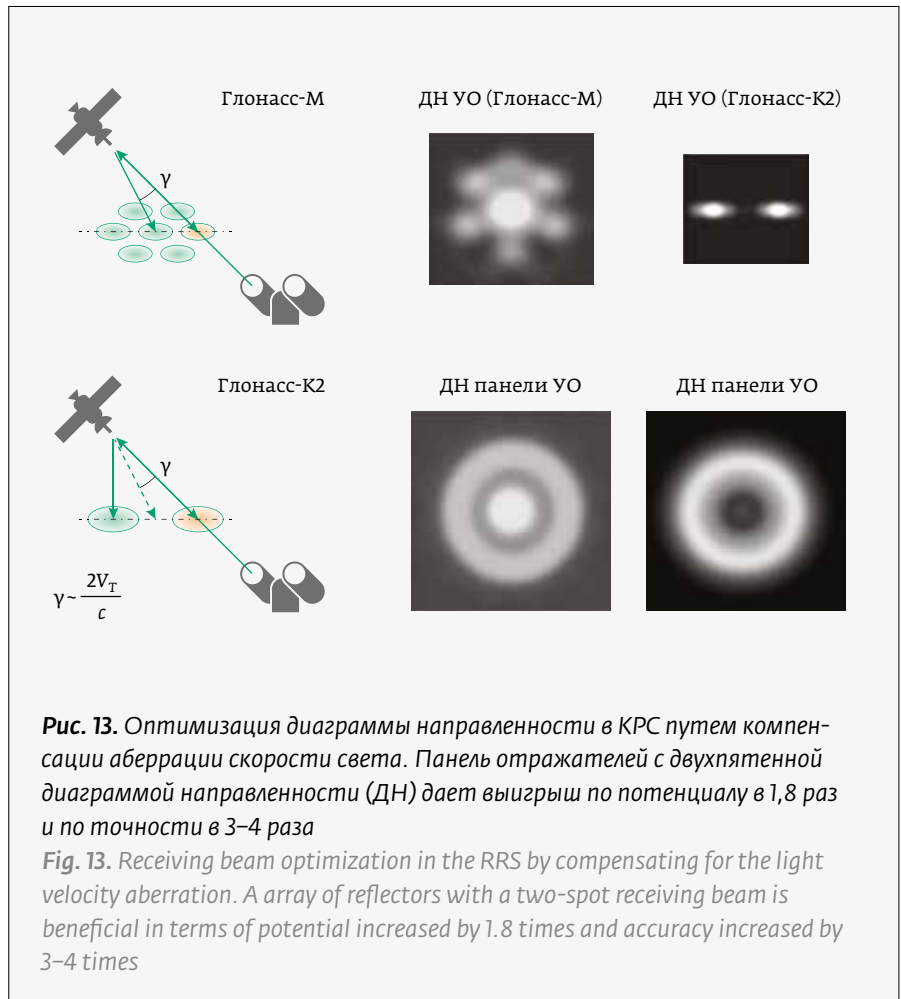


Рис. 13. Оптимизация диаграммы направленности в КРС путем компенсации абберации скорости света. Панель отражателей с двухпятенной диаграммой направленности (ДН) дает выигрыш по потенциалу в 1,8 раз и по точности в 3–4 раза

Fig. 13. Receiving beam optimization in the RRS by compensating for the light velocity aberration. A array of reflectors with a two-spot receiving beam is beneficial in terms of potential increased by 1.8 times and accuracy increased by 3–4 times



0,1-0,3 мм, которые выполнены из центральной шаровой линзы и сферических стеклянных менисков. Центральная сфера и мениски в таких системах позволяют получить узкую обратную диаграмму отражения микроспутником лазерного излучения.

В настоящее время в АО «НПК «СПП» ведется разработка космического комплекса «Блиц-Гео», которая предполагает запуск в 2025 году «созвездия» из 2-х КА «Блиц-М2» и 2-х КА «ГЛАСС» на такие орбиты, на которых практически отсутствует влияние остаточной атмосферы на параметры орбит КА. При этом радиационный пояс Ван-Аллена, опасный для стекла, расположен выше или ниже этих орбит.

Для низкоорбитальных спутников с высотой орбиты до 1500 км разработана малогабаритная ретрорефлекторная система (РС) «Пирамида» (рис. 12 с), которая прошла успешные испытания в составе КА «Ломоносов», запущенного на орбиту в апреле 2016 года с космодрома «Восточный». Масса РС «Пирамида» составляет всего 40 г, а размер 41×41×21 мм. Малая масса позволяет без осо-

- e) oncoming laser pseudo-range measurements with the MLNSS modules (MLNSS is an onboard inter-satellite laser navigation communication system) installed on the GLONASS-K2 series SVs;
- f) receipt of inter-satellite laser measurements and other data from the MLNSS, as well as data transmission to the SVs equipped with MLNSS.

The Sazhen-K stations provide the first four types of measurements, the Sazhen-L stations provide all six types of measurement.

PURPOSE OF DEVELOPMENT OF A NETWORK OF SAZHEN-K AND SAZHEN-L LASER STATIONS

The measurement data of the network of Sazhen-K and Sazhen-L laser stations are required to improve the accuracy:

- SGCS matching to the geocenter and communication parameters with the international ITRF up to 0.01 m;
- navigation field control by ephemerides up to 0.01 m and by XDG up to 0.03 m (0.1 ns);
- onboard control up to 0.1 ns and synchronization accuracy of GLONASS CS with the master time and frequency reference up to 0.15 ns;
- determination of delays of the onboard and ground-based navigation equipment up to 0.02 m (calibration).

Таблица 5. Лазерные панели ретрорефлекторов АО «НПК «СПП» для зарубежных космических аппаратов

Table 5. Laser array of retroreflectors by Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" JC for the foreign spacecrafts

Наименование космического аппарата	Высота орбиты, км	Год запуска	Количество космических аппаратов
GPS – 35, – 36 (США)	20150	1993, 1994	2
GFZ-1 (Германия)	400	1995	1
WESTPAC (Австралия)	835	1998	1
REFLECTOR (Россия – США)	1020	2002	1
GIOVE-A (ЕКА)	23916	2006	1
GIOVE-B (ЕКА)	23916	2008	1
GOCE (ЕКА)	295	2009	1
Proba-2 (ЕКА)	757	2009	1
CrioSat (ЕКА)	720	2005	1
CrioSat (ЕКА)	720	2010	1
Proba-V (ЕКА)	820	2011	1
Sentinel-3A (ЕКА)	718,5	2016	1
Sentinel-3B (ЕКА)	718,5	2018	1
Galileo	23222	2014 по 2018	34

* Оборудовано панелями с ретрорефлекторами 48 зарубежных космических аппаратов.

RETROREFLECTOR SYSTEMS (RRS) BY RESEARCH AND PRODUCTION CORPORATION "PRECISION SYSTEMS AND INSTRUMENTS" JC

The optical range offers exceptional opportunities for increasing the range and accuracy of laser location when various retroreflector systems are installed on the SV board. This made it possible to equip a large number of domestic SVs with such devices (table 4), while giving a chance to significantly increase (by an order of magnitude or more) accuracy of their orbit determination by using the laser ranging systems and obtaining global measurement information by exchanging data with the International Laser Rang-

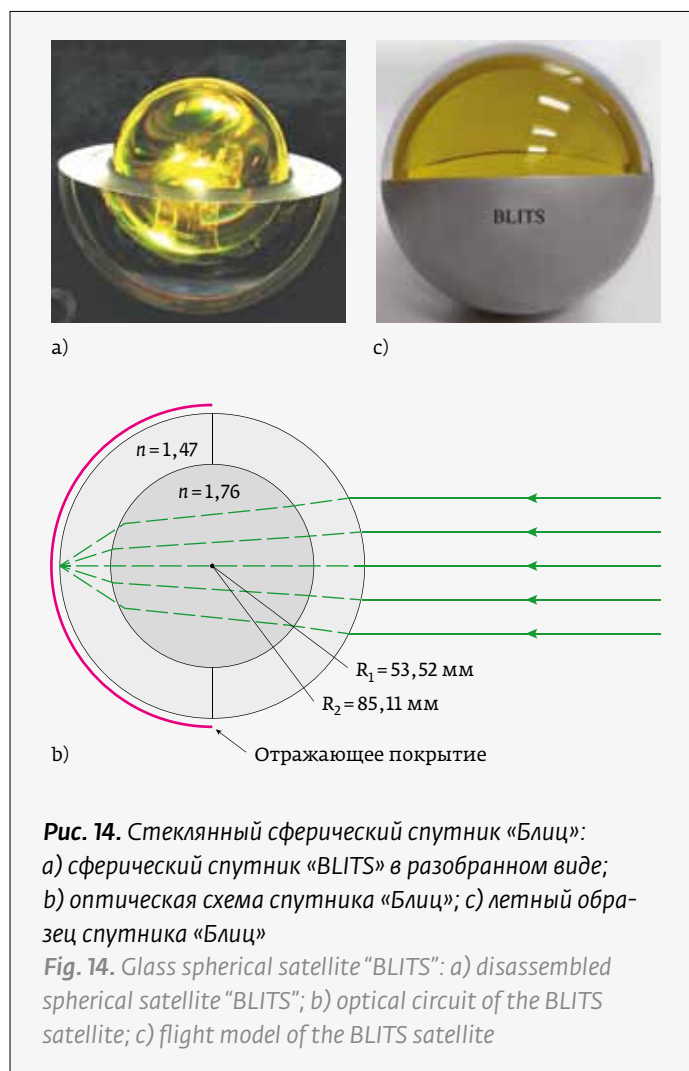


Рис. 14. Стекланный сферический спутник «Блиц»: а) сферический спутник «BLITS» в разобранном виде; б) оптическая схема спутника «Блиц»; в) летный образец спутника «Блиц»

Fig. 14. Glass spherical satellite "BLITS": a) disassembled spherical satellite "BLITS"; b) optical circuit of the BLITS satellite; c) flight model of the BLITS satellite

бых проблем планировать установку РС на любые разгонные блоки, РН и крупные части КА, чтобы на завершающей стадии полета, при входе в плотные слои атмосферы, точнее прогнозировать место и время их падения на Землю.

МОДУЛЬНЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР

Модульный пикосекундный лазер предназначен для генерации мощных лазерных импульсов с частотой 300–1000 Гц на длине волны 0,532 мкм. Изделие отличается короткой длительностью импульса (менее $5 \cdot 10^{-11}$ секунд) и высокой энергетикой (не менее 2,5 мДж, что соответствует мощности в импульсе $5 \cdot 10^7$ Вт), а также низкой расходимостью излучения (менее 0,5 мрад).

ing Service (ILRS). In turn, it supported installation of our RRS on many foreign SVs, such as GPS and Galileo (table 5). The most efficient devices, developed by Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments" JC for solving the issues of space navigation, space geodesy and space engineering tests are given below.

The ring retroreflector system (RRS) was developed for the GLONASS-K2 SV, while consisting of 36 oversized cube corner reflectors (CCR) (fig. 12 a). To compensate for the angular displacement of the laser beam caused by the light speed aberration, the directional pattern of each RRS cube corner reflector consists of two high-energy light spots (instead of seven light spots with lower energy used by the analogues), one of which returns radiation to the laser station. The QOS photodetector will register signals from the CCR located on the opposite sides of the RRS with an instantaneous orientation along the SV velocity vector. Availability of two undistorted signals instead of one extended signal, as in the earlier analogues, will allow for the Glonass-K2 SV to reduce the measurement error in relation to the distance to the panel center by several times, to about 1 mm. Thus, the error induced by the onboard segment (RRS) will correspond to the error of the ground-based segment (Tochka QOS).

On September 21, 2009, the Meteor-M spacecraft was launched, from which the BLITS spherical glass nanosatellite was separated (fig. 14). The global support for the BLITS orbit was provided by the Russian QOSs and stations of the International Laser Ranging Service under an agreement between the Federal Space Agency and ILRS. The main parameters of the BLITS and BLITS -M satellites are given in Table 4.

The BLITS and GLASS satellites (fig. 12b, d; fig. 14) are the new generation retroreflective spherical systems, made entirely of glass. By contrast to the metal "predecessors", they prevent the satellite axis-spin slowing down by the Earth's magnetic field that is necessary for averaging the measured data.

Таблица 6. Основные параметры спутников «Блиц» и «Блиц-М»

Table 6. Main parameters of the BLITS and BLITS -M satellites

Основные параметры КА	«Блиц»	«Блиц-М»
Диаметр, мм	170	220
Масса, кг	7,5	17
Высота орбиты, км	835	1500
Эффективная поверхность отражения, м ²	0,1 млн	1 млн
Ошибка цели, мкм	100	100

При измерениях оптической псевдодальности лазер работает в режиме относительной временной импульсной модуляции путем периодических смещений частоты излучения от центральной, что обеспечивает защиту ЗУ ББКос от записи моментов прихода лазерных сигналов посторонних станций.

Модульное конструктивное исполнение лазерного передатчика (рис. 15) реализовано по принципу разделения ключевых функциональных узлов, что позволяет провести замену выработавшего ресурс модуля в условиях штатной эксплуатации за время не более получаса.

БОРТОВАЯ БЕЗАПРОСНАЯ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (ББКос)

ББКос состоит из фотоприемного устройства (ФПУ) и блока регистрации импульсов (БРИ). Внешний вид аппаратуры показан на рис. 16, основные параметры в табл. 7. Основными задачами, решаемыми с помощью ББКос, являются калибровка задержек при распространении сигналов в радиотехнических трактах КА



Рис. 15. Модульный пикосекундный лазер
Fig. 15. Modular picosecond laser

The BLITS satellites represent a separate type of retroreflector spherical systems with a design “target error” of 0.1–0.3 mm. They are made of a central globular lens and spherical glass concave-convex lenses. The central sphere and concave-convex lenses in such systems make it possible to obtain a narrow echo pattern of the laser radiation by a microsatellite.

At present, Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments” JC is developing the BLITS -Geo space complex including launch of a “constellation” consisting of 2 Blits-M2 and 2 GLASS SVs into the orbits in 2025. There will be almost no effect of the residual atmosphere on the SV orbit parameters. In this case, the Van Allen radiation belt that is dangerous for glass, is located above or below these orbits.

For the low-orbit satellites with an orbital altitude of up to 1500 km, a Pyramid small-sized retroreflector system (RS) (fig. 12 c) was developed. It was successfully tested as a part of the Lomonosov SV, launched into orbit in April, 2016 from the Vostochny cosmodrome. The weight of Pyramid RS is only 40 g, with the dimensions of 41 × 41 × 21 mm. The low weight makes it possible to install the RS on any TOSs, carrier rockets and large SV parts with no particular issues, so that at the final stage of the flight, upon atmospheric entry, the forecast of place and time of their fall to Earth will be more perfect.

MODULAR PICOSECOND LASER

The modular picosecond laser is designed to generate powerful laser pulses with a frequency of 300–1000 Hz at a wavelength of 0.532 μm. The device is distinguished by a short pulse duration (less than 5·10⁻¹¹ seconds) and high energy (at least 2.5 mJ that corresponds to a pulse power of 5·10⁷ W), as well as the low radiation divergence (less than 0.5 mrad).

When measuring the optical pseudo-range, the laser is operated in the relative time-pulse modulation mode by periodically shifting the radiation frequency from the central one. It protects the BBQOS memory from recording the laser signal arrivals from the third-party stations. The modular design of the laser transmitter (fig. 15) is developed according to the separation principle of key functional units that makes it possible to replace an obsolete module under normal operation conditions in no more than half an hour.

ONBOARD ONE WAY QUANTUM OPTICAL SYSTEM (BBQOS)

BBQOS consists of a photodetector (PD) and a pulse registration unit (PRU). The equipment appearance is

«ГЛОНАСС», контроль за изменением во времени и параметров бортового синхронизирующего устройства, измерение мгновенного значения расхождения шкал времени КА «ГЛОНАСС» и наземной станции (центрального синхронизатора), формирование исходных данных для уточнения частотно-временных поправок.

Космический аппарат Глонасс М № 747 с первым комплектом аппаратуры ББКос был выведен на целевую орбиту 26 апреля 2013 года. После перевода бортовой аппаратуры из режима орбитального хранения в дежурный режим был успешно выполнен 12 июля 2013 года первый успешный сеанс сличения бортовой и наземной шкал времени, подтвердивший достижение субнаносекундной точности.

КОНЦЕПЦИЯ РАДИО-ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ БИС НКУ И ВСЕПОГОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ

Радио-лазерный комплекс выполняет одновременные измерения дальности и псевдодальности в лазерном канале (рис. 17), а также измерения псевдодальности по коду и фазе навигационных сигналов ГЛОНАСС с различными номиналами несущих частот в радиоканале.

Согласованность измерений обеспечивается:

- использованием общей бортовой шкалы времени (БСУ) и общей наземной шкалы времени (ШВ РЛК или ШВ внешнего СЧВ);
- сопряжением оптического центра бортового модуля приема и измерения времени прихода лазерных импульсов (ББКос) с центром отражения ретрорефлекторной системы (РРС);
- сопряжением опорных точек навигационных антенн с опорными точками лазерного канала (центром отражения РРС и центром пересечения осей опорноповоротного устройства РЛК).

Согласованность измерений позволяет использовать лазерные измерения дальности и псевдодальности в качестве эталонных для калибровки радиоизмерений псевдодальности. Калибровка радиоизмерений позволяет получить сантиметровый уровень точности при решении различных задач эфемеридного, частотно-

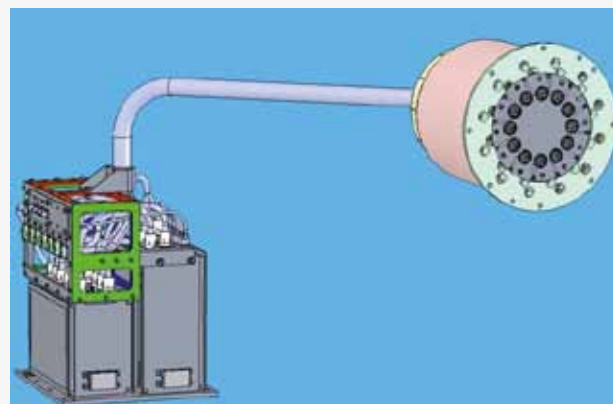


Рис. 16. Бортовая беззапронная квантово-оптическая система (ББКос)

Fig. 16. Onboard one way quantum optical system (BBQOS)

shown in Figure 16, the main parameters are given in Table 7.

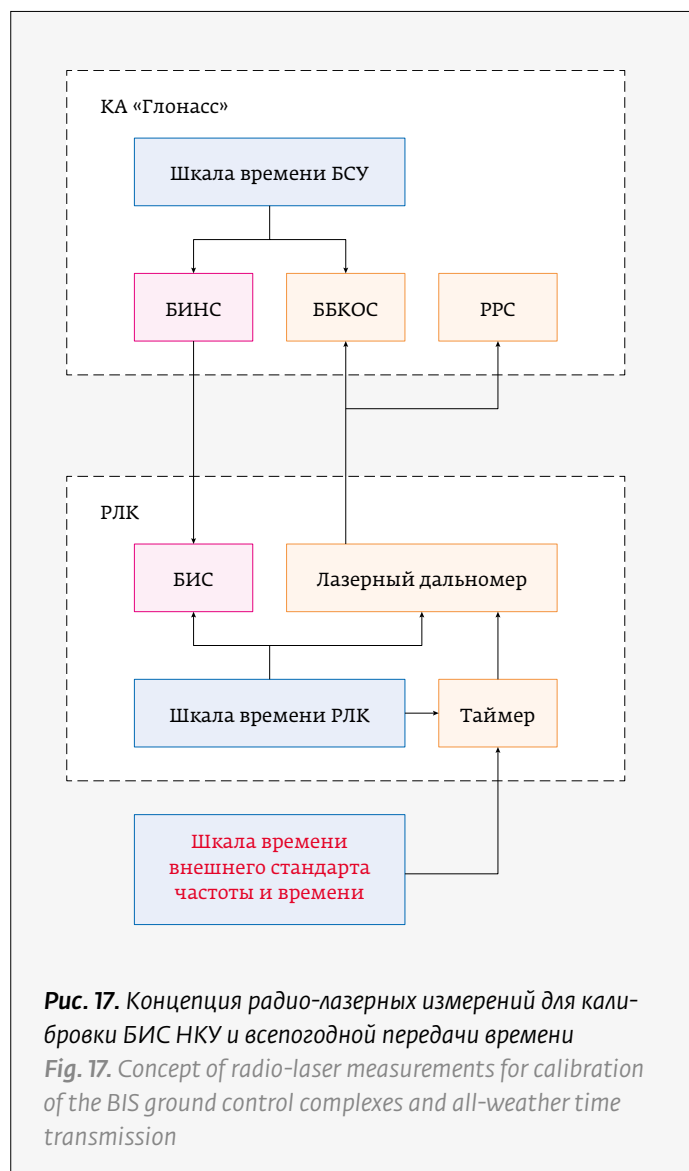
The main issues solved by BBQOS are the delay calibration during the signal propagation in the radio engineering paths of the GLONASS SV, control over the changes in time and parameters of the onboard synchronizer, measurement of the instantaneous divergence value between the time scales of the GLONASS SV and the ground-based station (central synchronizer), initial data generation to refine the time-frequency corrections.

The Glonass-M SV No.747 with the first set of BBQOS equipment was launched into the target orbit on April 26, 2013. On July 12, 2013, after the onboard equipment placement from the orbital storage mode to the standby mode, the first successful session of comparing the onboard and ground-based time scales was

Таблица 7. Основные технические характеристики ББКос

Table 7. Main technical specifications of BBQOS

Параметры	Величина
Точность привязки к шкале времени КА, пс	≤50
Остаточная систематическая погрешность привязки измерений, пс	≤100
Максимальная частота регистрации лазерных импульсов, Гц	4 000
Длина волны излучения, нм	532
Рабочая длительность импульсов лазера, пс	50–300
Максимальное количество измерений, хранящихся в памяти, шт.	262 144
Энергопотребление, Вт	25
Масса, кг	16,8



временного и геодезического обеспечения ГЛОНАСС.

КАЛИБРОВКА БИС СРЕДСТВАМИ КОС

Точность определения систематических погрешностей радионавигационных беззапросных измерений зависит от периодичности калибровки измерительных трактов БИС средствами беззапросной лазерной локации НКА ГЛОНАСС. Номинальная точность калибровки БИС средствами КОС составляет величину порядка 0,05 нс (сигма). При отсутствии возможности проведения регулярных калибровок БИС систематические погрешности радиотехнических измерений возрастают за счет нестабильности задержек в трактах формирования шкалы времени в аппаратуре БИС. На интервале

performed while confirming the subnanosecond accuracy achievement.

CONCEPT OF RADIO-LASER MEASUREMENTS FOR CALIBRATION OF THE BIS GROUND-CONTROL COMPLEXES AND ALL-WEATHER TIME TRANSMISSION

The radio-laser complex performs simultaneous range and pseudo-range measurements in the laser channel (fig. 17), as well as the pseudo-range measurements by code and phase of the GLONASS navigation signals with various carrier frequencies in the radio channel.

Consistency of measurements is ensured by the following:

- use of a common onboard time scale (BSU) and a common ground-based time scale (time scale of the radar facility or time scale of the external rotating speed stabilizer);
- pairing the optical center of the onboard module for receiving and measuring the laser pulse arrival (BBQOS) with the reflection center of the retroreflector system (RRS);
- pairing the reference points of the navigation antennas with the reference points of the laser channel (the RRS reflection center and the axial intersection center of the radar facility turntable).

The measurement consistency allows to use the laser range and pseudo-range measurements as a reference for calibrating the radio pseudo-range measurements. The radio measurement calibration makes it possible to obtain a centimeter level of accuracy when solving various issues of ephemeris, time-frequency and geodetic GLONASS support.

BIS CALIBRATION BY THE QOS

The determination accuracy for systematic errors of radio navigation non-interrogation measurements depends on the calibration frequency of the NMS measurement paths by the non-interrogation laser ranging devices of the GLONASS unmanned spacecrafts. The rated accuracy of NMS calibration by QOS is about 0.05 ns (sigma). If it is impossible to perform regular NMS calibrations, the systematic errors of radio engineering measurements are increased due to the instability of delays in the time scale generation paths of the NMS equipment. During the time period of 15 days, the delay variations can reach the values up to 0.15 ns (sigma).

Therefore, the opportunity to obtain the additional sessions of non-interrogation laser measurements in the conditions of cloudy weather with single-tier fron-



15 суток вариации задержек могут достигать значений до 0,15 нс (сигма).

Поэтому экспериментально подтвержденная при подготовке и проведении госиспытаний РЛС «Точка» в сеансах с ББКос возможность получения дополнительных сеансов беззапросных лазерных измерений при наличии облачной погоды с одноярусной фронтальной облачностью с периодичностью <5-7 суток позволит удерживать точность значений калибровок БИС на уровне 0,05 нс (сигма), что соответствует уровню точности взаимной калибровки БИС и КОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, решаемые радио-лазерными станциями в комплексе с РРС, ББКос и БИСКос.

Радио-лазерные станции нового поколения «Точка» и их модификации предназначены для получения следующих координатно-временных данных:

1. Прецизионных (миллиметровой точности) лазерных измерений двухсторонней наклонной дальности до геодезических КА: Лагос, Эталон, ГеоИК, Ларес, Блиц и др., оснащенных лазерными ретрорефлекторными системами с передачей результатов этих измерений в баллистические центры с целью определения:
 - орбит геодезических КА;
 - геоцентрических координат наземных пунктов и их текущих изменений;
 - параметров вращения Земли;
 - установления и поддержания глобальных геоцентрических систем координат, в том числе в части привязки с сантиметровой точностью начала систем координат к центру масс Земли и определения масштаба систем координат в рамках международной программы GGOS.
2. Прецизионных (миллиметровой точности) лазерных измерений двухсторонней наклонной дальности до навигационных КА: ГЛОНАСС, Галилео, Бейдоу, GPS и др. (при условии, что они оснащены РРС) с передачей результатов измерений в баллистические центры с целью расчета высокоточных эфемерид навигационных КА, формируемых российской системой СВО ЭВИ и международной навигационной службой IGS.
3. Прецизионных определений моментов посылок лазерных импульсов («старт») в шкале времени станции (или в шкале подключенного внешнего эталона частоты и времени)

tal clouds with a frequency of <5-7 days experimentally confirmed during preparation and conduction of official tests of the Tochka radio-laser station in sessions with the BBQOS, will make it possible to maintain the accuracy of BIS calibration values at the level of 0.05 ns (sigma) that corresponds to the accuracy level of the mutual BIS and QOS calibration.

CONCLUSION. TASKS SOLVED BY THE RADIO-LASER STATIONS IN COMBINATION WITH THE RRS, BBQOS AND BISQOS

The new generation radio-laser stations “Tochka” and their modifications are designed to obtain the following coordinate-time data:

1. High-precision (millimeter accuracy) laser measurements of bidirectional slant range to the geodetic SVs: Lageos, Etalon, GeoIK, Lares, Blitz, etc., equipped with the laser retroreflector systems (RRS) with transfer of the measurement results to the ballistic analysis centers in order to determine the following:
 - orbits of geodetic SVs;
 - geocentric coordinates of ground points and their current changes;
 - parameters of the Earth’s rotation;
 - establishment and maintenance of global geocentric coordinate systems, including in terms of matching the geodetic datum to the geocenter with centimeter accuracy and determining the coordinate system scale as a part of an international GGOS program.
2. High-precision (millimeter accuracy) two way range laser measurements to the navigation SVs: GLONASS, Galileo, Beidou, GPS, etc. (provided that they are equipped with the RRS) with transfer of the measurement results to the ballistic analysis centers in order to calculate the high-precision ephemerides of navigation SVs generated by the Russian high-precision determination system for navigation, ephemeris-time information and international navigation service IGS;
3. High-precision determination of the laser pulse sendings (“start”) based on the station’s time scale (or the scale of a connected external frequency and time reference) to the navigation SVs equipped with the on-board modules for laser pulse arrival measurement (BBQOS) and telemetric systems for transfer of the measurement results to the ballistic analysis centers (in addition to the RRS) in order to obtain a new parameter, namely the laser pseudo-range to the SV, to determine discrep-



на навигационные КА, оснащенные помимо РРС еще и бортовыми модулями приема и измерений моментов прихода лазерных импульсов (ББКос) и телеметрическими системами передачи результатов этих измерений в баллистические центры с целью получения нового параметра – «лазерной псевдодальности до КА», для определения расхождений бортовых и наземных шкал времени с субнаносекундной точностью верификации поправок к бортовым шкалам времени, а также для прецизионной лазерной передачи времени через борт при больших расстояниях между удаленными центрами хранения времени с такой же точностью.

4. Всепогодных псевдодальномерных (беззапросных) измерений радиочастотной системы (БИСКОС), входящей в состав радио-лазерной станции, по кодам и фазе несущей частоты навигационных радиосигналов КА с уменьшенными систематическими погрешностями за счет ее периодической (не реже 1 раз в 15 суток) калибровки по одновременным лазерным измерениям псевдодальности ББКос в периоды достаточной прозрачности атмосферы в направлении на КА. После проведения дополнительных исследований по уменьшению влияния облачности на возможность проведения калибровок и уточнения интервалов актуальности калибровок БИСКОС по статистке пропускания кристаллическими облаками лазерного излучения можно будет перейти к внедрению:
 - всепогодной верификации поправок к бортовым шкалам времени;
 - всепогодной высокоточной передачи времени на большие расстояния.

Как следует из изложенного, создание радио-лазерных станций нового поколения «Точка» и ее последующих аналогов позволило не только достигнуть субмиллиметровой точности измерений дальности до НКА (20 000 км), но и обеспечить субнаносекундную точность верификаций бортовых шкал времени и шкал удаленных центров времени.

Этот результат достижения высокого уровня точности состоялся прежде всего потому, что удалось создать по сути прецизионный измерительный космический комплекс, состоящий из КОС, БИС-КОС, ББКос и РРС, не имеющий прецедентов в мире, в разработке и 3-летних государственных испытаниях, которого приняли участие предприятия АО «НПК «СПП», АО ИСС, АО ЦНИИмаш (Роскосмоса) и ВНИИФТРИ (Ростандарта). Испытания в 2021 году пока-

ancies between the onboard and ground-based time scales with the subnanosecond accuracy, as well as for the high-precision laser time transmission overboard at the large distances between the remote time storage centers with the same accuracy;

4. All-weather pseudo-range (non-interrogation) measurements of the radio frequency system (BISQOS) being a part of the radio laser station, by the codes and carrier frequency phase of the SV navigation radio signals with the reduced systematic errors due to its periodic (at least once every 15 days) calibration based on the simultaneous laser measurements of the BBQOS pseudo-range during the periods of sufficient atmospheric transmittance in the direction of the SV. Upon completion of the additional studies to reduce the cloudiness effect on the possible calibrations and clarification of the BISQOS calibration relevance intervals according to the statistics of laser radiation transmission by the ice-crystal clouds, it will be possible to implement the following:

- all-weather verification of corrections to the onboard time scales;
- all-weather high-precision time transmission over long distances.

As seen above, development of a new generation radio-laser stations “Tochka” and its subsequent analogues has made it possible not only to obtain submillimeter accuracy of the range measurement to the SVs (20,000 km), but also to ensure subnanosecond verification accuracy of the onboard time scales and remote time center scales.

Such high level of accuracy was obtained primarily due to the development of a historically unprecedented high-precision measurement space complex, consisting of the QOS, BISQOS, BBQOS and RRS. Its development and 3-year official tests were performed by Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments” JC, Information Satellite Systems JSC, Central Research Institute of Mechanical Engineering JSC (Federal Space Agency) and Russian metrological institute of technical physics and radioengineering (Federal Agency on Technical Regulation and Metrology). The tests performed in 2021 showed the range measurement accuracy (1 mm) that was 200 times (!) better than the accuracy (20 cm) of the world’s first laser location of the Glonass navigation SV obtained in 1982 at the separate command and measurement complex No.1 (Maidanak, Sirius QOS).

зали точность измерений дальности (1 мм), что в 200 раз (!) лучше точности (20 см) первой в мире лазерной локации НКА «Глонасс», проведенной в 1982 году на ОКИК-21 (г. Майданак, КОС «Сириус»).

От коллектива разработчиков авторы выражают нашу общую благодарность руководству Роскосмоса, Росстандарта и Космических войск за внимание и поддержку этой уникальной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисов Ю. И.** Оборонная наука – экономике России. – М. Издательский дом «Оружие и технологии». 2021; 342–359
2. **Васильев В. П., Шаргородский В. Д.** Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии в России. *ФОТОНИКА*. 2017; 6(66):74–85. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.74.85.
3. **Sadovnikov M.** SLR Station of the new generation for time transfer with subnanosecond accuracy and ranging with submillimeter accuracy in night and daytime. – *Proc. of the 19th International Workshop on Laser Ranging*. Annapolis, MD, USA, 2014.
4. **Садовников М. А.** Необходимые условия достижения субмиллиметровой точности измерений в спутниковой лазерной дальнометрии. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009;12.
5. **Акентьев А. С., Ненадович В. Д., Соколов А. Л., Садовников М. А., Шаргородский В. Д.** Анализ точностных и энергетических характеристик кольцевой ретрофлекторной системы. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2018;16(2):36–43.
6. **Акентьев А. С., Васильев В. П., Садовников М. А., Соколов А. Л., Шаргородский В. Д.** Ретрофлекторный сферический спутник. *Оптика и спектроскопия*. 2015;119(4):588 – 593.
7. **Жабин А. С., Набокин П. И.** Методы достижения субнаносекундной точности измерений интервалов времени в бортовом терминале односторонней лазерной дальномерной системы. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013;1.
8. **Михайлова О. К., Корогодин И. В.** Обработка сигналов с цифровой поднесущей двумя традиционными каналами коррелятора. *Радиотехника*. 2021;9.
9. **Глотов В. Д., Карутин С. Н., Кожин А. Л., Митрикас В. В., Пафнурьев А. А.** О возможных направлениях использования квантово-оптических станций в программе ГЛОНАСС. *Труды Института прикладной астрономии РАН*. 2019;50:23.

АВТОРЫ

Борисов Б. А., к. т. н.; Жабин А. С., к. т. н.; Мурашкин В. В., к. т. н.; Пархоменко Н. Н., к. т. н.; Рой Ю. А., к. т. н.; [Садовников М. А.], д. т. н.; Соколов А. Л., д. т. н.; Титов Е. В., к. т. н.; Шаргородский В. Д., д. т. н.; АО «НПК «СПП», Москва, Россия.
Донченко С. И., д. т. н., Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, (ФГУП «ВНИИФТРИ»), Моск. обл., Россия.

ACKNOWLEDGEMENTS

On behalf of the development team, the authors express their gratitude to the administration of the Federal Space Agency, the Federal Agency on Technical Regulation and Metrology and the Space Forces of the Russian Federation for their help and support of this unique development.

REFERENCES

1. **Borisova YU. I.** *Oboronnaya nauka-ekonomike Rossii*. – M. Izdatel'skiy dom «Oruzhie i tekhnologii». 2021; 342–359
2. **Vasil'ev V. P., SHargorodskij V. D.** Sovremennoe sostoyanie vysokotochnoj sputnikovoj lazernoj dal'nometrii v Rossii. *Photonics Russia*. 2017;6(66):74–85. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.74.85.
3. **Sadovnikov M.** SLR Station of the new generation for time transfer with subnanosecond accuracy and ranging with submillimeter accuracy in night and daytime. – *Proc. of the 19th International Workshop on Laser Ranging*. Annapolis, MD, USA, 2014.
4. **Sadovnikov M. A.** Neobhodimye usloviya dostizheniya submillimetrovoj tochnosti izmerenij v sputnikovoj lazernoj dal'nometrii. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2009;12.
5. **Akent'ev A. S., Nenadovich V. D., Sokolov A. L., Sadovnikov M. A., SHargorodskij V. D.** Analiz tochnostnyh i energeticheskikh harakteristik kol'cevoj retroreflektornoj sistemy. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2018;16(2):36–43.
6. **Akent'ev A. S., Vasil'ev V. P., Sadovnikov M. A., Sokolov A. L., SHargorodskij V. D.** Retroreflektornyj sfericheskij sputnik. *Optika i spektroskopiya*. 2015;119(4):588–593.
7. **ZHabin A. S., Nabokin P. I.** Metody dostizheniya subnanosekundnoj tochnosti izmerenij intervalov vremeni v bortovom terminale odносторонней lazernoj dal'nomernoj sistemy. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2013;1.
8. **Mihajlova O. K., Korogodin I. V.** Obrabotka signalov s cifrovoj podnesushchej dvumya tradicionnymi kanalami korrelyatora. *Radiotekhnika*. 2021;9.
9. **Glotov V. D., Karutin S. N., Kozhinov A. L., Mitrikas V. V., Pafnurt'ev A. A.** O vozmozhnyh napravleniyah ispol'zovaniya kvantovo-opticheskikh stancij v programme GLONASS. *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN*. 2019;50:23.

AUTHORS

Borisov B. A., Cand. of Sc. (Tech.); ZHabin A. S., Cand. of Sc. (Tech.); Murashkin V. V., Cand. of Sc. (Tech.); Parkhomenko N. N., Cand. of Sc. (Tech.); Roy Yu. A., Cand. of Sc. (Tech.); [Sadovnikov M. A.], Dr. of Sc. (Tech.); Sokolov A. L., Dr. of Sc. (Tech.); Titov E. V., Cand. of Sc. (Tech.); Shargorodskij V. D., Dr. of Sc. (Tech.); JSC «NPK «SPP», Moscow, Russia.
Donchenko S. I., Dr. of Sc. (Tech.), Russian metrological institute of technical physics and radioengineering (FSUE «VNIIFTRI»), Moscow region, Russia.

Опико-голографические приборы



- проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ в области голографических технологий
- изготовление голограммных и дифракционных оптических элементов
- разработка и создание опико-голографических устройств дополненной реальности (AR-технологии), устройств контроля подлинности защитных голограмм
- организация и проведение тематических конференций, школ, семинаров и выставок в области голографических технологий



ООО «ОГП» РФ, 107076, г. Москва, ул. Матросская тишина, д. 23, стр. 2, под. 1а, эт. 5, п. XXV, к. 18,
тел.: +7(499)263-63-44, e-mail: kus_a_s@mail.ru