

Модернизация спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое»

© В. Б. Бурмистров¹, Е. В. Бурмистров¹, И. С. Гаязов², Д. В. Иванов², Г. Н. Ильин², А. В. Ипатов², Ю. В. Кацев³, В. В. Коваль⁴, А. Ф. Корнев³, В. А. Митряев², И. А. Рахимов², С. Г. Смоленцев²

¹АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В 2011 г. в обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО» для лазерной локации спутников была установлена изготовленная АО «НПК «СПП» квантово-оптическая система (КОС) «Сажень-ТМ», которая с 2012 г. задействована в регулярных наблюдениях по программам международной службы IIRS. В первые же годы был выполнен ряд работ по улучшению эксплуатационных характеристик КОС с учетом специфических метеорологических условий местности, что позволило значительно повысить интенсивность сеансов наблюдений. Однако точность единичных измерений оставалась на прежнем уровне (3–4 см), характерном для всех КОС «Сажень-ТМ», установленных на станциях российской сети лазерной дальнометрии. Такие погрешности измерений уже перестали отвечать современным требованиям, и модернизация КОС этого типа для улучшения ее точностных характеристик стала крайне актуальной.

В 2021 г. в обсерватории «Светлое» были спланированы и проведены работы по модернизации КОС «Сажень-ТМ» на основе анализа источников случайной погрешности измерений. С учетом того, что наибольшее влияние на точность измерений оказывает длительность импульса лазера, было принято решение начать модернизацию КОС с замены излучателя. В ходе модернизации выполнены монтаж и сопряжение нового короткоимпульсного лазера со штатной аппаратурой измерения дальности и доработана система измерения дальности КОС путем установки новых блоков высокоточной временной привязки стартового и стопового сигналов. В качестве источника излучения используется пикосекундный Nd:YAG лазер, разработанный в ООО «ЛОС» (г. Санкт-Петербург) совместно с Университетом ИТМО (г. Санкт-Петербург) и отличающийся от старого лазера существенно более коротким импульсом: 35 пс вместо 300 пс. Для обеспечения рабочего температурного диапазона лазера разработана специальная система термостабилизации.

Экспериментальные наблюдения, начатые после проведения юстировки нового излучателя и настройки КОС для работы с короткими импульсами, показали существенное улучшение точности измерений. Сравнение с данными наблюдений, выполненных до модернизации КОС, показывает, что для спутников Лагос-1 и Лагос-2 произошло повышение точности единичных измерений дальности более чем в 2 раза. На более значительную величину точность улучшилась для низкоорбитальных КА: с 30–35 мм до 8–13 мм. В целом выполненная модернизация привела к улучшению точности измерений лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в 2–2.5 раза в зависимости от типа КА.

В ходе выполнения данного этапа модернизации также намечены возможные шаги дальнейшей модернизации КОС, при реализации которых может быть достигнута точность измерений дальности на уровне единиц мм. Опыт модернизации КОС «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» может быть распространен также на все станции российского сегмента IIRS, оснащенные КОС данного типа.

Ключевые слова: лазерная локация спутников, квантово-оптическая система, лазерный излучатель, длительность импульса, измерения дальности.

Контакты для связи: Гаязов Искандар Сафаевич (gayazov@iaaras.ru).

Для цитирования: Бурмистров В. Б., Бурмистров Е. В., Гаязов И. С., Иванов Д. В., Ильин Г. Н., Ипатов А. В., Кацев Ю. В., Коваль В. В., Корнев А. Ф., Митряев В. А., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г. Модернизация спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 3–10

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.66.3-10>

Modernization of «Sazhen-TM» Satellite Laser Ranging System at the «Svetloe» Observatory

V. B. Burmistrov¹, E. V. Burmistrov¹, I. S. Gayazov², D. V. Ivanov², G. N. Il'in², A. V. Ipatov², Yu. V. Katsev³, V. V. Koval'⁴, A. F. Kornev³, V. A. Mitryaev², I. A. Rahimov², S. G. Smolentsev²

¹JSC «Research and Production Corporation «Precision Systems and Instruments», Moscow, Russia

²Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

³Lasers and Optical Systems Co. Ltd., Saint-Petersburg, Russia

⁴ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The «Sazhen-TM» satellite laser ranging system, manufactured by JSC «RPC PSI», was installed at the Svetloe observatory of the Quasar-KVO complex in 2011 and since 2012 the station has been conducting regular observations according to the ILRS programs. Taking into account the specific meteorological conditions of the area, a number of works were carried out earlier to improve the operational characteristics of the system. They led to significantly increasing the intensity of observation sessions. However, the accuracy of single measurements of the system remained at the same level (3–4 cm), which is characteristic for all «Sazhen-TM» systems installed at the majority of the Russian SLR network stations. Such measurement errors have already ceased to meet modern requirements and the modernization of this type SLR system to improve its accuracy has become extremely relevant.

In 2021, based on the analysis of sources of random measurement errors, the work was planned and carried out to modernize the «Sazhen-TM» system at the Svetloe observatory. Taking into account the fact that the laser pulse duration has the greatest influence on the measurement accuracy, it was decided to begin the modernization of the system with the replacement of the emitter. During the modernization, the installation and pairing of a new short-pulse laser with standard range measuring equipment was carried out and the system for measuring the time interval was improved by installing new units for high-precision time referencing of the starting and stop signals. As a emitter a picosecond Nd:YAG laser is used, which was developed at LOS LLC (St. Petersburg) together with ITMO University (St. Petersburg). It differs from the old laser in a significantly shorter pulse: 35 ps instead of 300 ps. To ensure the operating temperature range of the laser, a special thermal stabilization system has been developed.

Experimental observations started after the adjustment of the new emitter and the adjustment of the all system for working with short pulses showed a significant improvement in measurement accuracy. Comparison with the data of observations made before the modernization of the laser system shows that for Lageos-1 and Lageos-2 satellites there was an increase in the accuracy of unit range measurements by more than 2 times. By a larger amount accuracy improved for low-orbital spacecrafts: from 30–35 mm to 8–13 mm. In general, the carried out modernization led to an improvement in the accuracy of measurements of the «Sazhen-TM» laser system by 2–2.5 times, depending on the spacecraft type.

In the course of this stage of modernization, possible steps of further modernization of this type laser system are also outlined, during the implementation of which the accuracy of range measurements at the level of units of mm can be achieved. The experience of upgrading the «Sazhen-TM» system at Svetloe observatory can also be extended to all stations of the Russian ILRS segment equipped with this type of systems.

Keywords: satellite laser ranging, quantum-optical system, laser emitter, pulse duration, range measurements.

Contacts: Iskandar Gayazov (gayazov@iaaras.ru).

For citation: Burmistrov V. B. et al. Modernization of «Sazhen-TM» satellite laser ranging system at the Svetloe Observatory // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 66. P. 3–10.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.3-10>

Введение

В настоящее время измерения дальности до специализированных спутников методом лазерной локации используются для решения ряда задач фундаментального координатно-временного обеспечения, к которым относятся: определение ПВЗ (координат земного полюса и длительности суток), поддержание земной опорной системы координат на основе мониторинга координат наблюдательных станций и уточнение коэффициентов гармоник низших степеней гравитационного поля Земли, в частности параметров, характеризующих положение геоцентра и изменение коэффициента ди-

намического сжатия Земли. Важными приложениями метода лазерной локации спутников также являются определение орбит низкоорбитальных КА, используемых для дистанционного зондирования Земли, и калибровочных поправок для бортовой аппаратуры, установленной на таких КА для выполнения других типов измерений, в том числе альтиметрических и градиентометрических.

Главными особенностями метода лазерной локации спутников (ЛЛС) являются: зависимость от погодных условий, невозможность одновременного наблюдения нескольких объектов (в отличие от метода ГНСС), ограниченное число станций лазерных наблюдений, разнородность и дороговизна

спутниковых лазерных дальномеров. Из-за этих особенностей даже международная глобальная сеть станций не может обеспечить все запросы на лазерные наблюдения в интересах различных геодинамических и геофизических программ.

В то же время ценность ЛЛС-наблюдений при решении координатных задач заключается в том, что они обеспечивают возможность привязки земной системы координат к геоцентру (центру масс Земли), определения масштаба системы (совместно с методом РСДБ), а также мониторинга вариаций положения геоцентра и коэффициентов гармоник низших степеней геопотенциала. Значение лазерных наблюдений сохраняется так же, как одного из трех основных методов (наряду с методами РСДБ и ГНСС) определения ПВЗ.

На точность результатов, получаемых по ЛЛС-наблюдениям, влияет целый ряд факторов, наиболее существенными из которых являются следующие два: 1) точность измерений дальности до спутников с помощью квантово-оптических систем и 2) распределение наблюдений по орбите рассматриваемого спутника, определяемое в зависимости от интенсивности наблюдений этого спутника на станциях глобальной сети. Именно с учетом этих факторов Международная служба лазерной локации спутников (ILRS) разрабатывает планы по развитию глобальной сети станций. Основные направления развития в этих планах определены следующим образом:

1. Совершенствование лазерного оборудования с переходом от устаревших систем к короткоимпульсным системам.
2. Максимальная автоматизация работы станций.
3. Совершенствование формата данных, позволяющих хранение расширенной информации об условиях проведения наблюдений и о состоянии аппаратуры.

Станции ЛЛС нового поколения предлагается проектировать таким образом, чтобы они могли работать полностью в автоматизированном режиме, а также при дневном свете, что должно привести к значительному увеличению производительности сети.

В настоящее время в мировую сеть лазерных станций, работающих под эгидой ILRS, входят около 40 постоянно работающих станций. Значительные различия в качестве используемой аппаратуры приводят к тому, что точность измерения дальности до спутников и интенсивность проведения наблюдений на этих станциях сильно различаются.

На территории РФ расположены 10 станций ЛЛС (KOML, SIML, MDVS, ALTL, ARKL, SVEL, ZELL, BADL, IRKL, KTZL), на которых проводят регулярные наблюдения по программам между-

народной службы ILRS. КОС российского производства установлены также на трех зарубежных пунктах: BAIL (Байконур, Казахстан), BRAL (Бразилия), HARL (ЮАР). Большинство из этих станций (8 из 13) оснащены КОС «Сажень-ТМ» производства АО «НПК «СПП», которая имеет следующие основные характеристики: апертура оптической системы — 25 см, длительность импульса лазера — 300 пс при энергии 2.5 мДж, частота импульсов — 300 Гц. Система может проводить лазерную локацию спутников в диапазоне высот от 400 до 23000 км. Наблюдения спутников с высотой до 6000 км могут быть проведены и в дневное время суток.

Исходные измерения дальности, полученные с помощью КОС «Сажень-ТМ», имеют СКО около 35 мм. Точность нормальных точек, формируемых путем статистической обработки исходных измерений и фильтрации ошибок, составляет 5–8 мм, и эти данные подтверждаются результатами различных центров анализа ILRS. Указанные погрешности измерений на станциях, оснащенных КОС «Сажень-ТМ», не удовлетворяют современным требованиям и являются наиболее сильным сдерживающим фактором в достижении требуемых точностей результатов, получаемых из обработки лазерных наблюдений.

Таким образом, стала очевидной необходимость модернизации этих станций путем усовершенствования основных элементов, используемых в КОС.

Исходя из анализа основных источников случайной погрешности измерений, были определены основные направления модернизации КОС «Сажень-ТМ» и с их учетом спланированы и проведены в 2021 г. работы по модернизации КОС «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

КОС «Сажень-ТМ» обсерватории «Светлое»

КОС «Сажень-ТМ» была введена в эксплуатацию в обсерватории «Светлое» (станция SVEL в сети ILRS) в мае 2011 г. (Финкельштейн и др., 2012). Эксплуатация КОС в течение первых лет выявила слабые места станции в связи со специфическими метеорологическими условиями местности, главным из которых является наличие избыточной влаги. В дополнение к этому обсерватория находится вблизи долины, из которой уже в конце августа могут подниматься туманы, продолжающиеся до глубокой осени. Неоднократные покрытия росой объективов КОС в весеннее и осеннее время, обмерзание объективов в начальный зимний период, а также обмерзание зеркала внутри оптической трубы и постоянное наличие конденсата на поверхностях купола приводили к сокращению времени наблюдений.

Таблица 1

Год	КА					Число рабочих дней
	Lageos-1, Lageos-2	Высокоорбитальные		Низкоорбитальные	Всего	
		Всего	в т. ч. ГЛОНАСС			
2012	88	19	12	200	307	91
2013	103	31	18	352	486	100
2014	553	440	380	1570	2563	229
2015	572	630	460	1563	2765	232
2016	294	118	101	1505	1917	197
2017	24	37	35	553	614	104
2018	343	312	246	1738	2393	208
2019	450	533	397	2071	3054	228
2020	402	454	368	2055	2911	226

С учетом этих особенностей был выполнен ряд работ по улучшению эксплуатационных характеристик КОС. Были разработаны и внедрены следующие системы: система удаления влаги с объективов путем обдува тёплым воздухом, система подачи осушенного воздуха внутрь оптических труб и система осушения воздуха в подкупольном пространстве при закрытом куполе. Также было организовано дистанционное управление приводом створок купола КОС и реализованы блокировка открытия и автоматическое закрытие купола при дожде по данным датчика дождя.

Таким образом, в автоматическом режиме под куполом поддерживается оптимальная влажность (45–60 %) при закрытых створках путем автоза-

пуска адсорбционного осушителя, а также включается система осушения объективов КОС при влажности 75 %.

С 2014 г. все эти работы позволили значительно повысить интенсивность сеансов наблюдений в обсерватории, статистика которых за период 2012–2020 гг. представлена в табл. 1.

Однако работы по улучшению эксплуатационных характеристик КОС не отразились на точности лазерных наблюдений станции. Точность единичных измерений КОС оставалась на уровне 3–4 см, что характерно и для двух других КОС «Сажень-ТМ», установленных на обсерваториях «Бадарь» и «Зеленчукская» комплекса «Квazar-КВО». При этом следует признать, что по данным ILRS

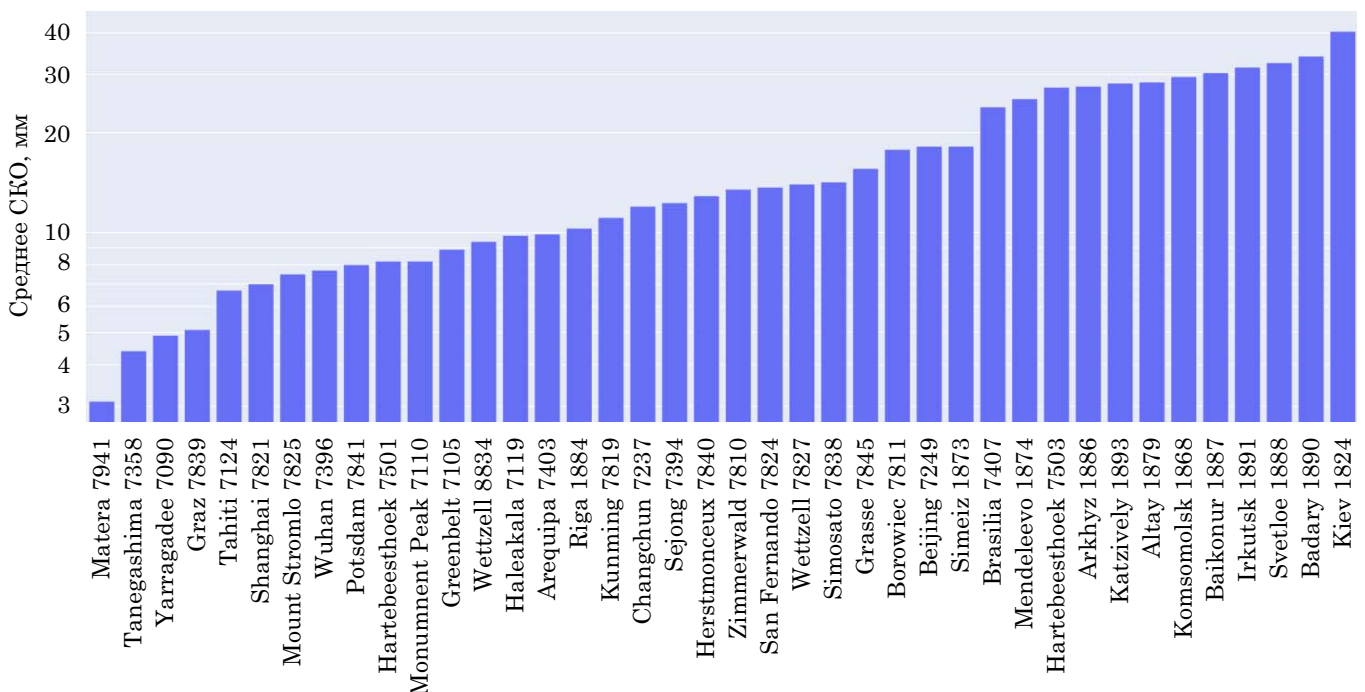


Рис. 1. Характеристики точности лазерных систем в сети ILRS по данным наблюдений спутников Lageos-1 и Lageos-2 в 2020 г.

все станции, оснащенные КОС «Сажень-ТМ», по точности единичных измерений занимают места в конце списка станций международной сети (рис. 1). Таким образом, модернизация КОС этого типа с целью улучшения точности измерений является давно назревшей и актуальной задачей.

Определение основных этапов модернизации

Основными источниками случайной погрешности разовых измерений дальности в квантово-оптических системах являются:

- длительность импульса лазера;
- нестабильность (джиттер) задержки сигнала в фотоприемнике отраженного сигнала;
- погрешность в устройстве временной привязки, связанная с большим диапазоном амплитуд выходного сигнала фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) при одноэлектронных импульсах;
- погрешность измерения временных интервалов.

На основе плотного ряда единичных измерений формируются «нормальные» точки, являющиеся выходным продуктом КОС. Погрешность «нормальных» точек зависит как от погрешностей единичных измерений, так и от равномерности и плотности набора измерений на интервале осреднения при формировании «нормальных» точек. Равномерность и плотность набора измерений определяется качеством сопровождения КА по угловым координатам и работой системы измерения дальности в целом, в том числе чувствительностью приемной аппаратуры. Одним из путей повышения плотности набора измерений является использование фотоприемника отраженного лазерного излучения с повышенной квантовой эффективностью.

Исходя из анализа приведенных факторов, при модернизации КОС могут быть использованы следующие пути для уменьшения погрешностей измерений:

- применение лазера с укороченной длительностью импульсов излучения;
- применение устройств временной привязки с более широкой линейной областью регистрируемой амплитуды входного сигнала;
- применение фотоприемника с пониженным уровнем джиттера и высокой квантовой эффективностью;
- применение измерителя временных интервалов с повышенной точностью измерений.

Поскольку наибольшее влияние на точность измерений оказывает длительность импульса лазера, было принято решение начать модернизацию КОС с замены излучателя. Немаловажным фактором является также относительная простота этого шага модернизации — замена лазерного излучателя не требует модернизации всей остальной аппаратуры КОС.

Описание работ

В начале 2021 г. в обсерватории «Светлое» были проведены следующие работы по модернизации КОС «Сажень-ТМ»:

1. Монтаж и сопряжение нового короткоимпульсного лазера со штатной аппаратурой измерения дальности. Новый лазер отличается от старого более коротким импульсом: 35 пс вместо 300 пс.

2. Доработка и наладка системы измерения дальности КОС «Сажень-ТМ» путем установки новых блоков высокоточной временной привязки стартового и стопового сигналов.

В качестве источника излучения используется пикосекундный Nd:YAG лазер, разработанный в ООО «Лазеры и оптические системы» (г. Санкт-Петербург) совместно со специалистами Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург). Лазер построен по схеме «задающий генератор» — «регенеративный усилитель» — «генератор второй гармоники». Задающий генератор представляет собой DFB-лазерный диод (от англ. distributed feedback laser), работающий в режиме модуляции усиления и генерирующий лазерные импульсы с энергией ~1 пДж и длительностью 35 пс на длине волны 1064 нм. Для усиления импульса задающего генератора до энергии ~5 мДж используется Nd:YAG регенеративный усилитель, представляющий собой многопроходовой усилитель с управляемым количеством обходов. Для преобразования длины волны излучения из основной гармоники (1064 нм) во вторую (532 нм) используется генератор второй гармоники на основе кристалла LBO. Основные особенности схемы и применяемые технические решения описаны в работах ([Корнев и др., 2018](#); [Davtian et al., 2020](#); [Kornev et al., 2018](#)).

Таблица 2

Сравнение характеристик старого и нового лазерных излучателей

Характеристика	Штатный лазер («ЭЛС-94»)	Новый лазер (ООО «ЛОС»)
Длина волны, нм	532	532
Энергия единичного импульса, мДж	2.5	2.5
Номинальная частота следования импульсов, Гц	300	300
Длительность одиночного импульса, пс	300	35
Диаметр пучка выходного излучения, мм	3.4	3.4
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+40	-40...+40

Сравнительные характеристики старого и нового излучателей приведены в табл. 2. Новый лазерный излучатель имеет практически такие же характеристики, как и старый, за исключением длительности импульса.

Рабочий температурный диапазон (от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$) обеспечивается за счет поддержания температуры корпуса излучателя лазера не ниже $+20^{\circ}\text{C}$. При температурах окружающей среды ниже $+20^{\circ}\text{C}$ производится подогрев внешней поверхности корпуса излучателя системой распределенных по поверхности корпуса плоских гибких нагревателей и термодатчиков. Охлаждение лазера при температурах выше $+20^{\circ}\text{C}$ и отвод выделившегося при его работе тепла осуществляется с помощью чиллера, хладагент от которого проходит через систему медных трубок, впрессованных в корпус излучателя. В качестве хладагента используется 42 % раствор пропиленгликоля. Для снижения теплообмена с окружающим воздухом используется термоизоляция толщиной 23 мм, которая представляет собой многослойный тепловой экран. Чиллер располагается в отдельном термостабилизированном шкафу. Термостабилизация шкафа осуществляется керамическими нагревателями и системой вентиляторов.

Лазерный излучатель конструктивно состоит из собственно лазерного излучателя, термошкафа и шлангов и кабелей, соединяющих их. Габаритные размеры лазерного излучателя, который располагается на опорно-поворотном устройстве КОС

«Сажень-ТМ», составляют $700 \times 245 \times 160$ мм, а габариты термоизолированного шкафа — $600 \times 860 \times 875$ мм. Расположение составных частей лазера показано на рис. 2 и 3.

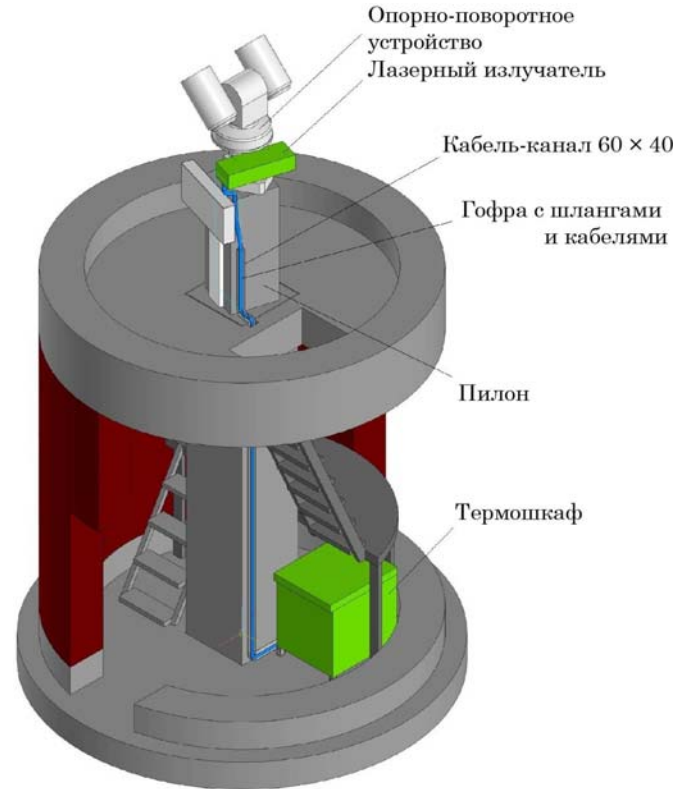


Рис. 2. Схема расположения частей лазера в укрытии



a)



b)

Рис. 3. Расположение частей лазера в башне: a) лазерный излучатель и b) термошкаф

Лазерный излучатель монтируется на опорно-поворотном устройстве, термошкаф устанавливается на первом этаже укрытия. Лазерный излучатель и термошкаф соединены жгутом из шлангов и кабелей, который уложен в кабель-канал сечением 60×40 мм и длиной 6 м. В жгуте проходят два шланга системы охлаждения, коммуникационный кабель и 14-жильный кабель. Из термошкафа выходят 3 кабеля связи с пультовой: коаксиальный кабель синхронизации, витая пара и 15-жильный кабель управления. Кабели связи с пультовой проложены по существующей трассе и имеют длину 50 м.

Одновременно с заменой лазера были установлены новые блоки временной привязки стартового и стопового сигналов. Обновленные блоки разработаны и изготовлены АО «НПК «СПП», (г. Москва) на основе компенсированных устройств обработки электронных сигналов, известных в зарубежной литературе под названием *constant fraction discriminator*. Их применение значительно снижает время отклика электронной аппаратуры

и обеспечивает высокую точность привязки одноэлектронных импульсов при регистрации откликов в однофотонном режиме.

Результаты наблюдений

После проведения юстировки нового лазерного излучателя и настройки КОС для работы с короткими импульсами были начаты экспериментальные наблюдения спутников в обсерватории. На рис. 4 представлены характеристики сеансов наблюдений спутников Лагеос-1 и Лагеос-2, полученных в обсерватории «Светлое» на интервале с 11.02.2021 г. по 31.08.2021 г. Эти спутники являются эталонными в том смысле, что они используются IIRS для оценки точности наблюдений станций в международной сети. На графиках представлены: число нормальных точек, сформированных на каждом из прохождений по рекомендованной IIRS методике (левая ордината), и средние значения СКО «сырых» измерений, полученные при формировании нормальных точек на данном прохождении (правая ордината).

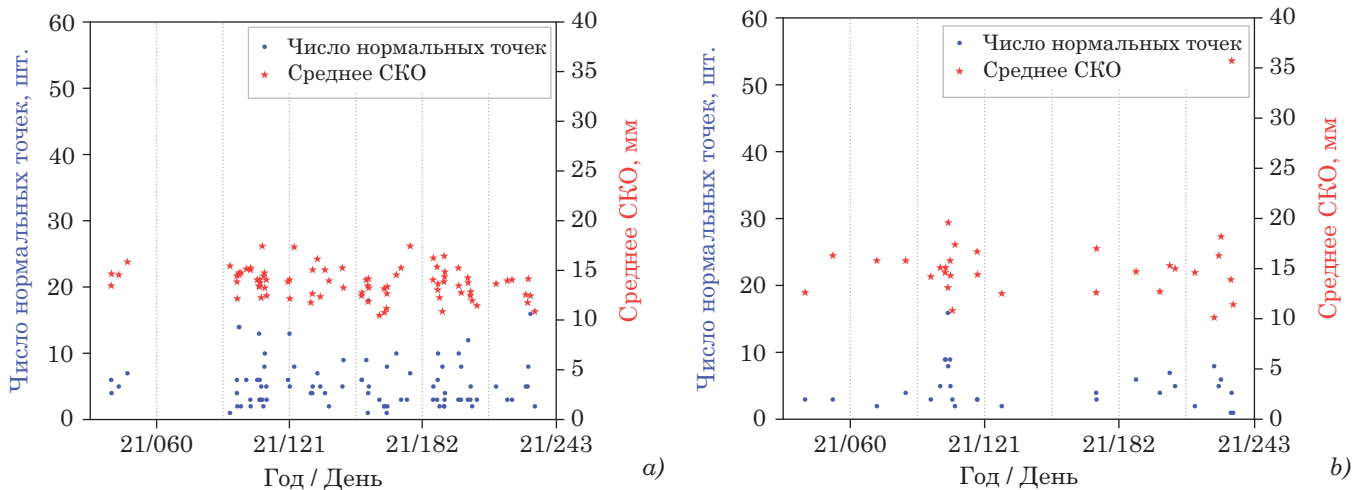


Рис. 4. Характеристики сеансов наблюдений спутников а) Лагеос-1 и б) Лагеос-2

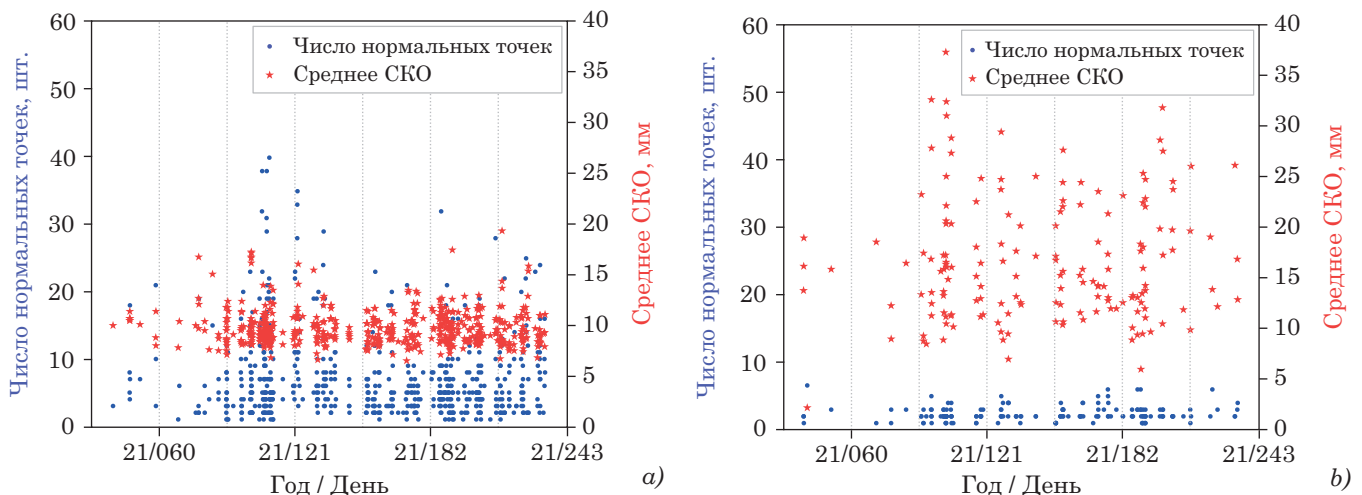


Рис. 5. Характеристики сеансов наблюдений а) низкоорбитальных спутников (высота менее 1000 км) и б) высокоорбитальных спутников (высота от 19000 км)

Сравнение приведенных характеристик с данными наблюдений, выполненных до модернизации КОС, показывает, что для спутников Лагеос-1 и Лагеос-2 произошло уменьшение ошибок единичных измерений дальности более чем в 2 раза (с 35 мм до 15 мм). На более значительную величину точность улучшилась для низкоорбитальных КА: с 30–35 мм до 8–13 мм (рис. 5a). Значительный разброс оценок (от 10 мм до 30 мм) имеет место только для высокоорбитальных спутников систем ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (рис. 5b), что в большей степени связано с конструктивными особенностями установленных на этих аппаратах лазерных отражателей.

Анализ проведенных сеансов наблюдений показал, что выполненная модернизация лазерного дальномера «Сажень-ТМ» позволила существенно повысить точность наблюдений на станции. Осредненные на вышеуказанном интервале наблюдений значения СКО «сырых» измерений дальности уменьшились в 2–2.5 раза, в зависимости от типа КА.

Возможные шаги дальнейшей модернизации

Выполненная работа показала, что КОС «Сажень-ТМ» обладает большим модернизационным потенциалом, который можно реализовать поэтапно.

В дальнейшем при наличии соответствующего ресурсного обеспечения модернизацию КОС «Сажень-ТМ» можно будет проводить в следующих направлениях.

1. Модернизация приёмной части КОС. Замена морально устаревшего фотоэлектронного умножителя в КОС «Сажень-ТМ» новым ФЭУ, имеющим лучший квантовый выход, позволит увеличить количество регистрируемых откликов и уменьшить количество шумовых сигналов.

2. Модернизация частотно-временной системы с использованием аппаратуры нового поколения и установка измерителя временных интервалов с повышенной точностью измерений (не хуже, чем единицы пикосекунд).

3. Замена ночной камеры на современные аналоги с цифровым каналом, что позволяет увеличить количество измерений, так как при увеличении чувствительности камеры поиск КА при

ночных наблюдениях будет занимать меньше времени.

4. Модернизация имеющегося программного обеспечения КОС «Сажень-ТМ», работающего под операционной системой Windows, путем перевода на современную операционную систему и сведения всех его частей в единый комплекс.

Реализация указанных мер обеспечит не только дальнейшее повышение точности измерений, но и значительно улучшит эксплуатационные характеристики станции в целом.

Выводы

Полученные в ходе выполнения работы результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Модернизация КОС «Сажень-ТМ» в обсерватории «Светлое» существенно повысила качество получаемых лазерных наблюдений: точность измерений наклонной дальности до спутников повысилась в 2–2.5 раза в зависимости от типа КА.

2. Потенциал модернизации КОС «Сажень-ТМ» не исчерпан, и следующие этапы модернизации, которые запланированы выполнить в будущем, позволят вплотную приблизиться к лучшим мировым образцам КОС с выходом на уровень точности единиц мм.

3. Опыт модернизации КОС «Сажень-ТМ» в обсерватории Светлое целесообразно распространить на все станции российского сегмента ILRS, оснащенные КОС данного типа.

Литература

1. Корнев А. Ф., Давтян А. С., Балмашинов Р. В и др. Лазерный источник пикосекундных импульсов для прецизионной дальнометрии, локации и геопозиционирования // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 83–89.
2. Финкельштейн А. М., Гаязов И. С., Ипатов А. В. и др. Оснащение обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» квантово-оптическими системами «Сажень-ТМ» // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 78–83.
3. Davtian A., Koval V., Viktorov E., Kornev A. 5 mJ-level Nd: YAG regenerative amplifier // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE. 2020.
4. Kornev A., Balmashnov R., Kuchma I., et al. 0.43 J/100 ps Nd: YAG laser with adaptive compensation of thermally induced lens // Optics letters. 2018. Vol. 43(18). P. 4394–4397.