

О возможных направлениях использования квантово-оптических станций в программе ГЛОНАСС

© В. Д. Глозов¹, С. Н. Карутин², А. Л. Кожин¹,
В. В. Митрикас¹, А. А. Пафнутьев¹

¹ФГУП ЦНИИмаш, г. Королев, Россия

²АО «НИИМП-К», г. Москва, Россия

Результаты лазерной локации космических аппаратов могут использоваться при решении задач по следующим основным направлениям: задачи космической геодезии; определение орбит космических аппаратов (КА), контроль их точности; синхронизация бортовых и наземных шкал времени; калибровка наземных и бортовых радиотехнических средств; использование в качестве резервного средства траекторных измерений для определения орбит в случае нештатных ситуаций.

Лазерные уголкового отражатели установлены на все КА ГЛОНАСС, запланирована их установка на все КА ГНСС Galileo, Beidou и КА серии GPS III, начиная с GPS-III-SV9. В статье рассмотрены возможные направления использования КОС в программе ГЛОНАСС.

Ключевые слова: квантово-оптическая станция, КОС, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, эфемеридно-временная информация, ЭВИ, лазерная спутниковая дальнометрия, космический аппарат.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.50.23-30>

Введение

Лазерная спутниковая дальнометрия используется более 50 лет и основана на том, что с наземной станции посылаются ультракороткие импульсы в направлении КА, оснащенного специальными оптическими отражателями, затем на этой же станции принимается отраженный сигнал, при этом для лучших мировых станций погрешности определения дальности от станции до КА и в обратном направлении в настоящее время составляют порядка 1–3 мм при осреднении «сырых» данных на интервале от 5–15 с — для низколетящих КА — и до 5 мин — для КА ГЛОНАСС.

К достоинствам спутниковой лазерной дальнометрии относятся:

- высокая точность измерения расстояний между станцией и КА;
- оптический диапазон измерений, в котором ошибки распространения сигналов в атмосфере могут быть учтены с субмиллиметровой точностью;
- наличие результатов высокоточных измерений в банках данных начиная с 1976 г., что позволяет изучать изменение некоторых геодезических параметров на продолжительном временном интервале;
- различная физическая природа измерений по сравнению с радиоизме-

рениями, что дает возможность проводить независимый контроль точности орбит искусственных спутников Земли, полученных с использованием радиотехнических измерений, а также реализовать так называемую космическую колокацию на КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

К недостаткам технологии лазерной дальнометрии относятся:

- невозможность выполнения измерений в оптическом диапазоне при облачности в направлении квантово-оптическая станция (КОС) — КА;
- усложнение процедуры проведения лазерных измерений в дневных условиях, а также при засветках приемной оптики от Солнца и Луны;
- высокая стоимость изготовления и эксплуатации КОС.

Специальная компьютерная обработка результатов лазерной локации КА позволяет использовать их при решении задач по следующим основным направлениям применения данной технологии:

- задачи космической геодезии;
- определение орбит КА, контроль точности определения орбит КА;
- синхронизация бортовых и наземных шкал времени, а также согласование разнесенных наземных шкал;
- калибровка наземных и бортовых радиотехнических средств;
- использование в качестве резервного средства траекторных измерений для определения орбит в случае нештатных ситуаций.

В настоящее время российская сеть КОС состоит из 13 введенных в эксплуатацию открытых станций, пять из которых (Алтай, Байконур, Архыз, Бразилия, ЮАР) принадлежат «Роскосмосу», пять — Российской академии наук (Светлое, Зеленчукская, Бадары, Кацивели, Симеиз), две станции — Росстандарту (Менделеево, Иркутск) и одна — Министерству обороны РФ (Комсомольск на Амуре). Все эти станции имеют технические возможности для лоцирования КА ГЛОНАСС.

Две новые лазерные станции типа «Точка» (Менделеево, Иркутск) находятся на этапе ввода в эксплуатацию, являются станциями нового поколения, построены на принципах однофотонного лоцирования КА и по предварительным оценкам могут обеспечить при построении «нормальных точек» миллиметровую точность двухпутевых измерений.

Задачи космической геодезии

Лазерная спутниковая дальнометрия относится к спутниковым методам космической геодезии, основанных в том числе на работе ГНСС и доплеровских наблюдениях DORIS. В настоящее время наиболее широкое распространение в космической геодезии получил метод ГНСС благодаря следующим достоинствам:

- всепогодность;
- равномерное покрытие измерениями орбит КА ГНСС [сеть Международной службы ГНСС (International GNSS Service, IGS) включает около 500 станций геодезического класса, около 200 станций принимают сигналы ГЛОНАСС; сеть Международной службы лазерной дальнометрии (International Laser Ranging Service, ILRS) включает порядка 40 станций, в южном полушарии находится всего 9 КОС];

- высокая точность фазовых измерений;
- низкая стоимость наземной аппаратуры (необходимы только приемник, компьютер и антенна) и ее круглосуточной эксплуатации в автоматизированном режиме.

В частности, параметры вращения Земли (ПВЗ) определяют в рамках работ Международной службы вращения Земли: 10 центров — по технологии ГНСС и 3 центра — по технологии КОС, при этом точность определения ПВЗ по измерениям КОС в 3–5 и более раз ниже точности определения ПВЗ по данным ГНСС.

Перспективный мировой уровень требований в области космической геодезии сформулирован в проекте GGOS (Global Geodetic Observing System, Глобальной геодезической системы наблюдений), основной целью которого является построение земной опорной системы координат с точностью 1 мм по координатам и 0.1 мм/год по скорости их изменения. Основное требование международного проекта GGOS к наземной системе измерительных мониторинговых станций — это совершенная технология и полная автоматизация при непрерывном режиме работы аппаратуры 24 часа в сутки и 365 дней в году. При этом в качестве предполагаемых в проекте GGOS 40 опорных станций рассматриваются станции колокации, содержащие станции 3–4 технологий измерений (ГНСС, КОС, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой, DORIS).

Определение орбит КА ГЛОНАСС, контроль их точности

Лазерная локация двух КА GPS ИА-35 и ИА-36, оснащенных ретро-рефлекторными отражателями, проводилась КОС мировой сети в период 1994–2014 гг. КА системы ГЛОНАСС лоцировались лазерными станциями сети ILRS с 1995 г., при этом наиболее интенсивные работы проводились в рамках реализации специальных проектов IGEX98 (1998–1999 гг.) [1] и LARGE (2013–2015 гг.) [2, 3–5]. На основе измерительных данных, полученных специалистами Швейцарии, США, Германии, Японии, Англии, России и других стран, проводился анализ возможностей использования КОС для определения и контроля эфемеридной информации ГНСС, в том числе КА системы ГЛОНАСС, некоторые полученные результаты опубликованы в работах [1–13]. В настоящее время только Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш является единственным в мире центром, который уточняет орбиты 2–3 КА ГЛОНАСС по измерениям КОС сети ILRS и передает полученные данные в IGS в режиме регулярной службы.

Могут быть рассмотрены следующие возможные варианты использования измерений КОС при определении и контроле эфемерид КА ГЛОНАСС:

- определение эталонных орбит КА ГЛОНАСС по измерениям КОС;
- добавление измерений КОС к радиотехническим измерениям в целях повышения точности определения эфемерид ГЛОНАСС;
- анализ отклонений лазерных измерений от орбит, полученных на основе радиоизмерений.

В период проведения кампании LARGE с участием 30 станций ILRS определение орбит на основе измерений КОС было затруднено вследствие недостаточного количества измерений и их неравномерного распределения (день/

ночь, южное/северное полушарие). При этом немоделируемые ускорения, связанные со световым давлением, не позволили определить орбиты на уровне точности измерений КОС даже при большом числе измерений. Результаты показали, что определение орбит всех КА ГЛОНАСС по измерениям КОС с требуемой точностью является практически нереализуемым в финансовом и организационном плане и не гарантирует получение требуемой точности эфемеридных данных.

Добавление измерений КОС в штатную схему расчета эфемерид к радиотехническим измерениям требует знания точного (на миллиметровом уровне) взаимного положения ретрорефлекторной системы и фазового центра навигационной антенны для всех КА ГЛОНАСС. Как показано в работах [11, 12–13], КА «Глонасс-М» не являются идентичными в части коррекции на положение ретрорефлекторной системы относительно центра масс, при этом максимальное различие между КА достигает от 52 мм [11] до 67 мм [13].

Кроме того, опыт определения эфемерид КА GPS с добавлением лазерных измерений показал [10], что для КА GPS это не дало существенного улучшения точности орбит. Учитывая, что орбиты КА ГЛОНАСС по беззапросным измерениям глобальной сети можно определять с погрешностью 20–30 мм (уровень согласования независимых решений нескольких мировых центров), потенциал улучшения точности определения орбит КА ГЛОНАСС путем добавления в обработку измерений КОС практически отсутствует и имеет наибольший интерес прежде всего для фундаментальной и прикладной геодезии.

Широко применяемый на практике способ использования измерений КОС для оценки эфемеридной информации ГЛОНАСС — это анализ отклонений измерений КОС от орбит КА ГЛОНАСС, построенных по радиоизмерениям. Статистическая обработка отклонений (невязок) измерений КОС от контролируемых орбит дает возможность провести контроль и верификацию качества различных моделей и программного обеспечения для расчета эфемеридно-временной информации (ЭВИ) на различных участках полета КА, включая теневые участки, уточнить эксплуатационные характеристики для каждого КА ГЛОНАСС и выбрать оптимальные модели.

В частности, в рамках эксперимента LARGE, по результатам анализа отклонений измерений КОС сети ILRS от орбит КА ГЛОНАСС, вычисляемых в ИАЦ КВНО по радиоизмерениям российских станций сети Системы дифференциальной коррекции и мониторинга и глобальной сети IGS, было подтверждено, что согласованность лазерных измерений и финальных орбит КА ГЛОНАСС находится на среднем уровне 25–35 мм по радиальной составляющей. Таким образом, с помощью лазерных измерений мировой сети станций подтверждена высокая точность орбит, вычисляемых в режиме регулярной службы в ИАЦ КВНО.

Синхронизация бортовых и наземных шкал времени

Повышение требований потребителей к уровню точности навигационного обеспечения приводит к необходимости использования все более точных бортовых и наземных стандартов частоты и времени и, соответственно, более точных систем сличения и контроля бортовых и наземных шкал време-

ни, реализуемых в рамках системы ГЛОНАСС. Использование для этих целей оптического канала сверки имеет в потенциале серьезное преимущество по точности, но для ее достижения необходима соответствующая техническая реализация данной технологии на практике. В этом смысле разрабатываемая беззапросная квантово-оптическая система (БКОС), состоящая из наземного и бортового (ББКОС) сегментов, имеет своей потенциальной целью обеспечение метрологической точности синхронизации бортовых и наземных шкал времени, а также согласование разнесенных наземных шкал.

Технология на основе БКОС представляется перспективной, может обеспечить существенный прорыв в точности синхронизации удаленных стандартов частоты и при проведении высокоточных экспериментов, в частности, при отработке новых типов бортовой системы управления. Но для практического использования данной технологии прежде всего необходимо решить вопрос передачи измерительной информации аппаратуры ББКОС в заданный интервал времени в центры анализа данных для последующей обработки и эффективного использования полученных результатов. Кроме того, необходимо подтвердить, насколько стабильными являются результаты по точности синхронизации шкал времени на базе технологии БКОС, для чего целесообразно ее экспериментальную отработку проводить силами специалистов нескольких организаций.

Калибровка наземных и бортовых радиотехнических средств

Калибровка наземных и бортовых радиотехнических средств с использованием измерений КОС самым тесным образом связана с проблемой высокоточного определения ЭВИ КА ГЛОНАСС. При этом необходимо отметить, что возможность калибровки радиоканала между КА ГЛОНАСС и наземной беззапросной измерительной станцией (БИС) измерениями КОС на требуемом уровне точности и стабильности экспериментально не доказана.

Принципиальные проблемы возникают в связи с тем, что калибровка может быть выполнена только для безионосферной комбинации радиоизмерений, которая включает межчастотные задержки как «внизу» в приемном тракте, так и «наверху» — в передающем. В зависимости от разных условий стабильность этих задержек во времени является предметом дальнейшего изучения: как разделить задержки в приемном и передающем тракте.

Кроме того, есть еще вопрос точной привязки к единой шкале времени БИС — КОС и наземная беззапросная квантово-оптическая система. Необходимо в ходе экспериментальной отработки определить, с какой точностью реализуется привязка к шкале на одной станции, какое отличие в привязке для других станций системы, какая стабильность такой привязки и т. д. Иными словами, необходимо экспериментальное подтверждение, что ББКОС с несколькими или хотя бы с двумя БИС — КОС может прокалибровать каналы с требуемой точностью и стабильностью.

Измерения БКОС позволяют с точностью до усредненных погрешностей кодовых измерений и погрешностей моделей ионосферы получить абсолютные задержки одного из навигационных сигналов и пересчитать к ним задержки остальных сигналов, имея взаимные задержки навигационных сигнала-

лов от БИС. С точки зрения навигационного обслуживания это никак не влияет на точность позиционирования, т. к. за нулевую может быть принята задержка любого навигационного сигнала. Именно это сейчас реализовано в GPS и GALILEO, где потребителю передаются только относительные задержки, а задержка одного из сигналов в диапазоне 1575.42 МГц принята нулевой.

Использование КОС в качестве резервного средства измерений

Примерами использования КОС в случае нештатных ситуаций в качестве резервного средства траекторных измерений для определения орбит (при отказе штатных радиотехнических средств траекторного контроля) могут служить несколько проектов, когда лазерная локация КА обеспечила выход из нештатных ситуаций на борту КА: ERS-1 (1991–2000 гг.), Метеор-3М-SAGE-III (2001–2006 гг.), Jason-2 (2008–2019 гг.).

Целевое использование КА ГЛОНАСС основано на том, что бортовой источник навигационных сигналов излучает навигационные радиосигналы, в которых передается ЭВИ, используемая потребителями для определения своего местоположения и времени. Если аппаратура бортового источника навигационных сигналов работает корректно, то этого достаточно для того, чтобы ЭВИ для данного КА по измерениям сети БИС была вычислена в полном объеме и с требуемой точностью. Если в случае нештатной ситуации на борту КА аппаратура бортового источника навигационных сигналов не работает корректно, то вычисление ЭВИ для данного КА путем использования КОС в качестве резервного средства практически не имеет смысла, т. к. доставить ЭВИ потребителям по штатному каналу в соответствии с положениями Интерфейсного контрольного документа не удастся.

Таким образом, применение КОС в качестве резервного средства траекторных измерений для определения орбит и частотно-временных параметров в случае отказа штатной системы расчета ЭВИ не может обеспечить использование КА ГЛОНАСС по основному целевому назначению, но может быть использовано для определения и прогнозирования орбит КА, если будет необходимо проводить какие-либо операции по управлению КА и приему телеметрии.

Заключение

Основные выводы:

— организация постоянного контроля эфемерид всех КА ГЛОНАСС на основе орбит, построенных только по измерениям КОС, является практически нереализуемым вариантом в финансовом и организационном плане;

— оценку точности эфемеридных данных КА ГЛОНАСС, контроль качества моделей и программного обеспечения для расчета эфемерид КА целесообразно проводить на основе оценки отклонений лазерных измерений от орбит, полученных на основе радиоизмерений;

— контроль частотно-временных характеристик с использованием КОС требует наличия на борту КА аппаратуры ББКООС, канала доставки информации с борта КА в центры обработки данных и отсутствия облачности на линии

КА — КОС, поэтому на практике технология на основе КОС может использоваться только как метрологическое и неоперативное средство;

— для совместной обработки измерений, полученных для КА ГЛОНАСС с помощью технологий КОС и БИС, особую важность приобретает вопрос о точном (на миллиметровом уровне) определении взаимного положения ретро-рефлекторной системы КА, фазового центра радиоматрицы КА и его центра масс в связанной с КА системе координат. Поэтому наряду с созданием высокоточных (на миллиметровом уровне) КОС необходимо обеспечить соответствующую точность методик, алгоритмов и программно-математического обеспечения обработки лазерных измерений.

Л и т е р а т у р а

1. International GLONASS Experiment IGEX-98 / Workshop Proceedings, September 13–14, 1999, Nashville, Tennessee, USA. / ed. by J. A. Slater, C. E. Noll, K. T. Gowey. — 1999. — 383 p.

2. Sośnica K., Thaller D., Dach R., Steigenberger P., Beutler G., Arnold D., Jäggi A. Satellite laser ranging to GPS and GLONASS // Journal of Geodesy. — Vol. 89, no. 7. — Berlin: Heidelberg, 2015. — P. 725–743. — URL: <https://dx.doi.org/10.1007/s00190-015-0810>.

3. Глотов В. Д., Митрикас В. В., Зинковский М. В. Первые результаты обработки ILRS-данных лазерной локации космических аппаратов ГЛОНАСС в 2014–2015 годах / Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО–2015): тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — С. 47.

4. Glotov V., Pafnutyev A., Zynkovsky M., Mitrikas V. SLR data usage in the verification of GLONASS data processing methods. IAC PNT analysis of GLONASS SLR data in LARGE experiment // Proceedings of 2015 ILRS Technical Workshop Network Performance and Future Expectations for ILRS Support of GNSS, Time Transfer and Space Debris Tracking, October 26–30, 2015, Matera, Italy. — 2015.

5. Ипатов А. В., Гаязов И. С., Пасынков В. В. Российская сеть станций. Результаты Российской сети лазерных станций в эксперименте LARGE, доклад на заседании бюро GGOS по сетям станций и измерениям, Технический Университет, Вена, апрель 2015. — 2015.

6. Rothacher M. The Special Role of SLR for Inter-Technique Combinations // ILRS Workshop 2003. — Bad Koetzing, Germany, 2003.

7. Pavlis E. C. Comparison of GPS S/C orbits determined from GPS and SLR tracking data // Adv. Space Res. — 1995. — Vol. 16, no. 12. — P. 55–58.

8. Osubo T., Appleby G., Gibbs P. Glonass laser ranging accuracy with satellite signature effect // SGEO. — 2001. — Vol. 22, no. 5–6. — P. 509–516.

9. Hackel S., Steigenberger P., Hugentobler U., Uhlemann M., Montenbruck O. Galileo orbit determination using combined GNSS and SLR observations // GPS Solutions. — Springer, 2015. — Vol. 19, no. 1. — P. 15–25.

10. Urschl C., Beutler G., Gurtner W., Hugentobler U., Schaer S. Contribution of SLR tracking data to GNSS orbit determination // Advances in Space Research. — Vol. 39, no. 10. — P. 1515–1523. — URL: [doi: 10.1016/j.asr.2007.01.038](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.038).

11. Thaller D., Sosnica K., Jäggi A. The space tie between GNSS and SLR // American Geophysical Union 2012 Fall Meeting 3–7 December 2012, San Francisco, CA, USA. — 2012.

12. Glotov V., Mitrikas V., Pafnutyev A. Estimation of the laser retro-reflector array center location for GLONASS-M // Proceedings of 21th ILRS Workshop on laser ranging, Canberra, 2018. — 2018.

13. Глотов В. Д., Митрикас В. В., Пафнутьев А. А., Янишевский В. В. Оценка положения центра панели лазерных отражателей КА ГЛОНАСС-М // Космонавтика и ракетостроение. — 2018. — Вып. 6, № 105. — С. 36–47.

Satellite Laser Ranging for the GLONASS: possible applications

**V. D. Glotov, S. N. Karutin, A. L. Kozhinov,
V. V. Mitrikas, A. A. Pafnutyev**

Satellite laser ranging (SLR) can be used in space geodesy as follows: to determine satellite orbits and to control their accuracy; to synchronise the onboard and ground-based time scales; to calibrate the ground-based and onboard radio equipment; as a backup tool for trajectory measurements to determine orbits in an emergency situation.

Nowadays laser corner reflectors are installed on all GLONASS satellites, their installation is planned for all Galileo, Beidou and those GPS III satellites which have appeared since the GPS-III-SV9. The article describes possible ways to use SLR for the GLONASS.

Keywords: laser ranging station (LRS), global navigation satellite systems (GNSS), ephemeris and time information (ETI), satellite laser ranging (SLR), space vehicle.