



Основные направления использования технологий спутниковой лазерной дальнометрии в системе ГЛОНАСС: опыт и перспективы

Глотов В.Д., Карутин С.Н., Кузенков А.Н.,
Митрикас В.В., Пафнутьев А.А.

*Международная конференция «Лазеры'2023»
Москва, ноябрь 2023*

Содержание

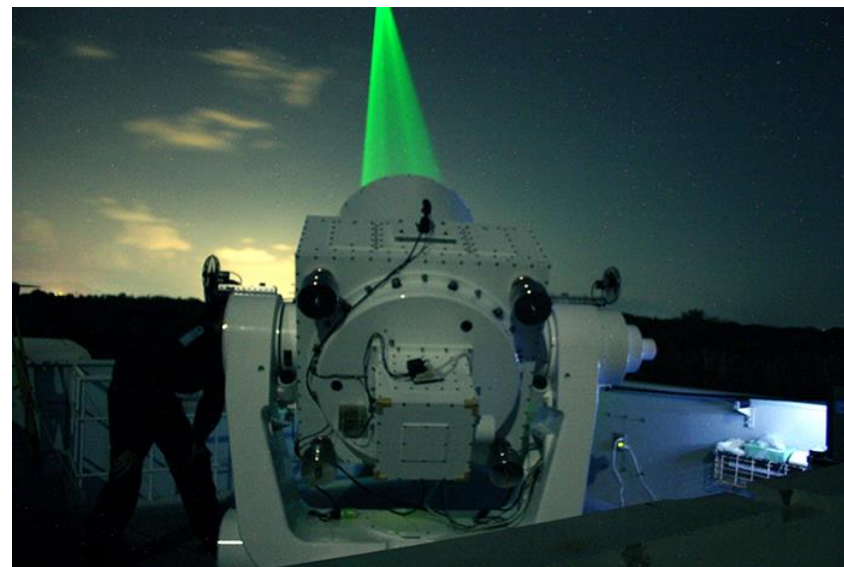
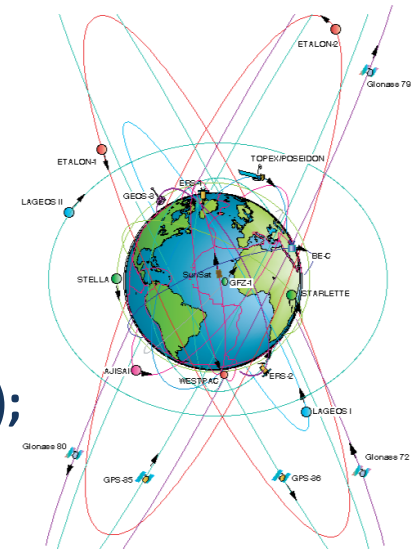
- 1. Основные направления использования измерений КОС**
- 2. Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS)**
- 3. История (участие ИАЦ ЦНИИмаш в проектах ILRS)**
- 4. Перспективы по использованию измерений КОС в системе ГЛОНАСС**

Направления использования измерений КОС (1/4)

Основные направления :

- определение орбит КА, контроль их точности;
- калибровка радиотехнических средств;
- синхронизация бортовых и наземных шкал времени;
- космическая геодезия (уточнение системы координат);
- резервирование в случае нештатных ситуаций.

Примечание: КОС – квантово-оптическая станция



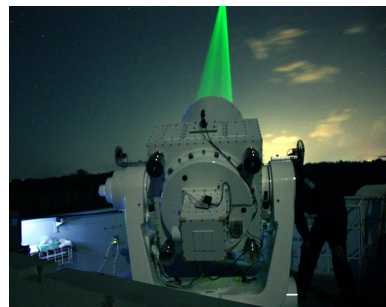
Направления использования измерений КОС (2/4)

Основные компоненты:

- наземные измерительные квантово-оптические станции (КОС);
- специальные оптические отражатели (ретрорефлекторы – РР), размещенные на КА;
- специальное высокоточное программное обеспечение для целевой обработки измерительных данных.

Принцип измерений:

- с наземной КОС посылаются ультракороткие импульсы длиной несколько десятков пикосекунд в направлении КА;
- на этой же станции принимается сигнал, отраженный от ретрорефлекторов КА;
- дальность между КА и КОС вычисляется на основе измеренного на станции интервала времени и скорости света.



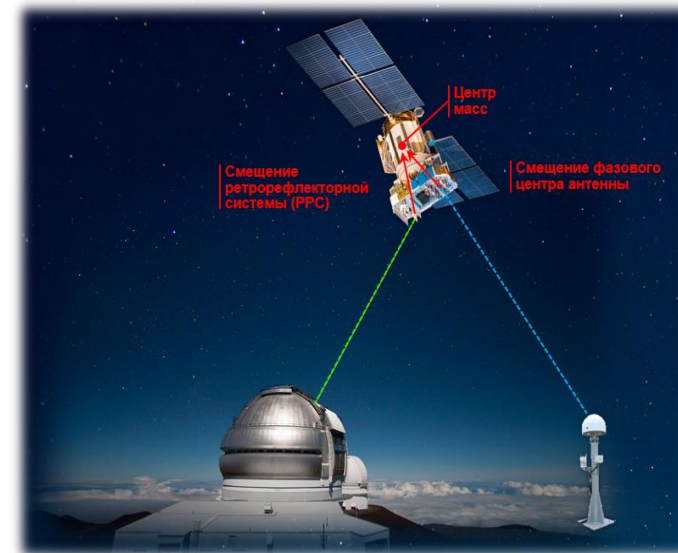
Направления использования измерений КОС (3/4)

Достоинства:

- Высокая точность измерений (ошибка 1-3 мм);
- Оптический диапазон измерений (простая модель тропосферы);
- Длительный интервал наблюдений (с 1976 года изучение движения литосферных плит, координат геоцентра и станций);
- Космическая колокация на КА ГНСС.

Недостатки:

- Невозможность работы при облачности;
- Усложнение измерений в дневных условиях и при засветках оптики от Солнца и Луны;
- Высокая стоимость разработки, изготовления и эксплуатации => мало станций.



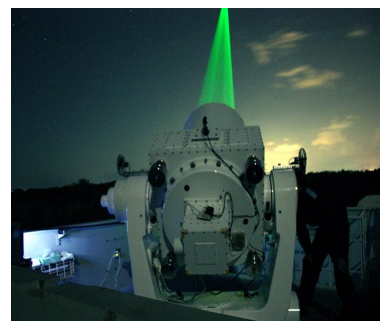
Направления использования измерений КОС (4/4)

Высокая точность лазерных измерений достигается за счет:

- уменьшения длины импульса лазера;
- увеличения числа измерений в единицу времени (до 1000 и более измерений в секунду);
- минимизации «ошибки цели» (совершенствования ретрорефлекторов на КА);
- постоянной калибровки дальномерного канала;
- использования для целевого анализа «нормальных точек», полученных путем осреднения первичных измерений на интервале времени от 5 до 300 секунд.



Ошибки измерения дальности от станции до КА в настоящее время для лучших КОС составляют порядка 1-3 мм при использовании «нормальных точек».



Содержание

1. Основные направления применения измерений КОС (SLR)
2. **Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS)**
3. История (участие ИАЦ ЦНИИмаш в проектах ILRS)
4. Перспективы по использованию измерений КОС в системе ГЛОНАСС

Международная служба ILRS (1/2)

Функции ILRS:

- Координация работ по лазерной локации КА, сбору, хранению и целевой обработке полученных лазерных спутниковых измерений
- Разработка стандартов, формирование состава и приоритетности международных проектов для лазерной локации КА
- Проведение ежегодных конференций в целях развития измерительных средств и методов анализа данных.

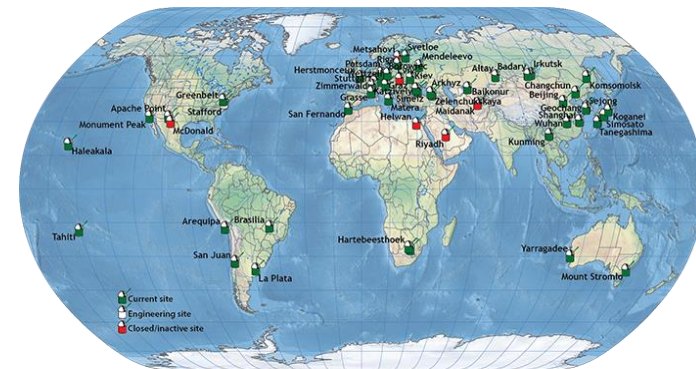
Количество станций ILRS – 36 (было 40)

Общее количество наблюдаемых КА – 54 :

- 23 КА по программам спутниковой навигации (4 КА ГЛОНАСС, 4 Galileo, 4 BeiDou, 6 IRNSS, 5 QZS)
- 9 геодезических КА (LAGEOS-1,2, Эталон 1,2, LARES , Stella, Starlette, Ajisai, Larets)
- 22 КА в рамках научных и технических экспериментов



LAGEOS-1: Диаметр – 60 см
Вес – 407 кг
Орбита – 5860 км



Сеть станций ILRS

Международная служба ILRS (2/2)

Пример ежемесячного отчета ILRS
(<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>) :

Table 1: Station performance parameters based on data volume, on-site processing statistics and operational compliance issues

Site Information		Data Volume									Data Quality		
Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Station Location	Station Number	LEO pass Tot	LAGEOS and LARES pass Tot	High pass Tot	Total passes	LEO NP Total	LAGEOS and LARES NP Total	High NP Total	Total NP	Minutes of Data	Cal RMS	Star RMS	LAG RMS
Baseline		2300	600	3000	3500								
Yarragadee	7090	18685	3032	4491	26208	295210	29229	17308	341747	213707	3.2	5.5	5.5
Changchun	7237	9321	1423	4570	15314	126468	10753	18200	155421	138926	6.6	9.8	10.6
Mount_Stromlo_2	7825	7771	1689	1812	11272	112885	14638	12159	139682	126291	2.7	11.4	7.9
Wetzell	8834	5368	1277	3132	9777	60742	9227	10811	80780	68493	2.9	8.0	9.0
Herstmonceux	7840	5847	1145	1345	8337	76711	12345	4410	93466	65820	3.2	8.7	12.1
Greenbelt	7105	6536	885	431	7852	118541	10070	1995	130606	56818	3.9	8.2	8.9
Monument_Peak	7110	6837	730	46	7613	104052	6999	146	111197	40533	2.6	6.3	7.9
Kunming	7819	2916	685	3070	6671	30392	3306	6534	40232	47258	3.8	12.2	11.6
Graz	7839	3765	767	1667	6199	61859	6169	5209	73237	56568	2.4	3.9	5.2
Shanghai_2	7821	2506	710	2828	6044	21453	6583	12448	40484	82802	7.0	9.2	5.2
Wuhan	7396	2067	611	2152	4830	21465	4656	8828	34949	59749	5.2	7.4	6.7
Matera_MLRO	7941	2736	978	506	4218	21974	6316	2639	30929	36777	1.3	5.8	6.5
Wetzell_SOSW	7827	1588	531	1678	3797	11901	2833	4579	19313	31494	9.1	12.1	12.2
Potsdam_3	7841	2656	579	559	3794	39002	5027	2042	49071	29378	2.6	6.3	9.3
Grasse_MEO	7845	798	721	1937	3456	9537	9017	7949	26503	67484	9.2	13.7	15.2
Beijing	7249	1351	301	1121	2773	13709	1817	2806	18332	21128	4.2	8.5	8.9
Katziwely	1893	2258	279	8	2545	27303	2015	44	29362	11773	23.3	39.4	26.9
Simeiz	1873	2027	283	24	2334	17681	1724	130	19535	8353	19.5	11.6	13.6
Zelenchukskaya	1889	1648	626	16	2290	17122	5580	64	22766	16564		31.1	36.2
Arequipa	7403	2171	59	0	2230	17360	288	0	17628	6409	4.3	7.4	6.6
Hartebeesthoek_HARL	7501	1690	288	184	2162	22162	2416	804	25382	15133	5.3	8.8	10.3
Tenerife	7701	483	293	901	1657	4946	2215	3512	10373	23581	5.5	10.9	5.9
Svetloe	1888	1162	464	20	1646	8663	3376	54	12093	7826		10.9	15.3
Haleakala	7119	1325	276	0	1601	21155	2821	0	23976	11105	2.3	5.4	5.6
Badary	1890	1117	287	11	1415	8132	1456	30	9618	4695		37.0	31.0
Simosato	7838	1015	237	0	1252	8905	1643	0	10548	6222	6.9	7.8	12.3
Borowiec	7811	686	204	14	904	11135	2159	67	13361	7005	14.3	19.0	18.5
Hartebeesthoek_HRTL	7503	548	272	0	820	4798	1796	0	6584	5023	26.4	17.4	21.5
San_Fernando	7824	797	13	0	810	4979	36	0	5015	1720	6.9	13.4	20.1
Tahiti	7124	582	84	35	701	7009	712	140	7881	4087	3.0	7.4	7.5
Irkutsk	1891	385	148	6	537	2007	711	19	2737	2033	39.1	24.3	32.2
Sejong	7394	166	35	0	201	2319	392	0	2711	1484	4.1	8.7	9.9
Arkhyz	1886	80	71	0	151	760	420	0	1180	1004		30.1	25.2
Mendeleev	1874	27	91	6	124	302	1225	21	1548	2576	31.7	20.8	26.7
Apache_Point	7045	0	0	0	0	0	0	0	0	224	0.4		

Основные направления дальнейшего развития технологии лазерной спутниковой локации:

- Снижение стоимости разработки и эксплуатации лазерных станций (стоимость ГНСС-станции = 1% стоимости КОС; мировая сеть – 40 станций КОС и 18000 ГНСС-станций);
- Автоматизация в целях повышения производительности и исключения операторских ошибок;
- Повышение точности измерений за счет модернизации действующих станций и разработки новых станций;
- Разработка новых моделей, методов, алгоритмов и программно-математических комплексов для высокоточного анализа лазерных измерений;
- Апостериорная обработка накопленных данных с учетом новых моделей и алгоритмов в целях построения высокоточной опорной координатной системы ITRF2020.

Содержание

1. Основные направления использования измерений КОС
2. Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS)
3. История (участие ИАЦ ЦНИИмаш в проектах ILRS)
4. Перспективы по использованию измерений КОС в системе ГЛОНАСС

История: эксперимент IGEX-98 (1/2)

Международный ГЛОНАСС Эксперимент IGEX-98 (The International GLONASS Experiment) проводился с 19 октября 1998 по 19 апреля 1999 года, а позже был продлен до 2003 года.

=====

Основные задачи IGEX-98:

- установка глобальной сети навигационных приемников для слежения за ГЛОНАСС;
- определение орбит ГЛОНАСС с точностью один метр или лучше;
- привлечение к совместной работе лазерной спутниковой подсистемы;
- определение параметров перехода между системой координат ГЛОНАСС ПЗ-90 и WGS-84 (системой координат GPS);
- проникновение в суть моделирования движения ГЛОНАСС (учет влияния солнечной радиации, режимов ориентации и т.д.).

История: эксперимент IGEX-98 (2/2)

Международный ГЛОНАСС Эксперимент IGEX-98 (The International GLONASS Experiment) проводился с 19 октября 1998 по 19 апреля 1999 года, а позже был продлен до 2003 года.

=====

Основные результаты :

- Вычислены эфемериды КА ГЛОНАСС с ошибкой 10-40 см (1 сигма) по результатам обработки 6500 сеансов лазерных измерений 30-ти станций мировой сети и 60-ти станций на базе навигационных приемников ГЛОНАСС/GPS;
- Построена матрица перехода между системами координат ПЗ-90-ГЛОНАСС и WGS-84 (GPS);
- Отработаны методика, алгоритмы и программно-математическое обеспечение (ПМО) высокоточного расчета эфемерид КА ГЛОНАСС;
- Отработано оперативное взаимодействие с международной системой Центров хранения и анализа данных с использованием Интернет;
- На рекордном уровне точности проведена синхронизация стандартов времени на межконтинентальном расстоянии.

История: эксперимент LARGE (1/2)

LARGE (Laser Ranging to GNSS) – эксперимент по расширенной лазерной локации ГНСС (на базе полностью развернутой системы ГЛОНАСС). Предложен на 18-м Международном семинаре в ноябре 2013 года в Фудзиэде, Япония.

=====

Обоснование необходимости эксперимента:

Лазерные уголкового отражатели установлены на всех КА ГЛОНАСС, Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай), запланирована их установка на КА серии GPS III (США), начиная с девятого GPS-III-SV9(всего более 100 КА).

Основные цели эксперимента:

- Определить стратегию измерений станций ILRS для эффективного анализа орбит ГНСС
- Анализ лазерных данных для повышения точности определения орбит и калибровки радиосистем ГНСС

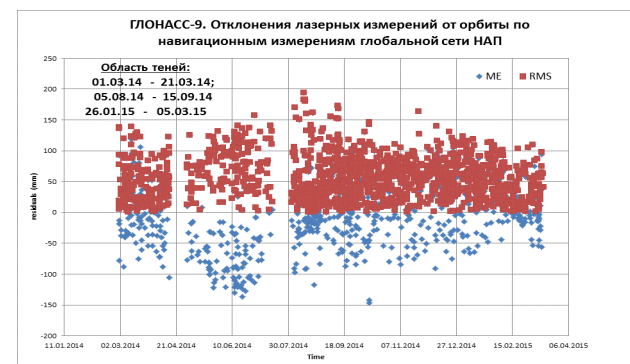
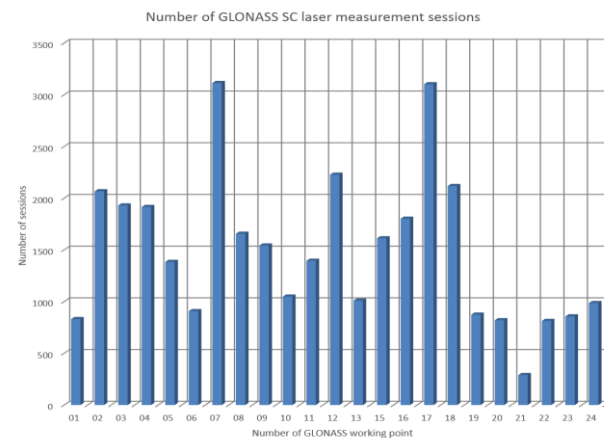
История: эксперимент LARGE (2/2)

LARGE (Laser Ranging to GNSS) – эксперимент по расширенной лазерной локации ГНСС (на базе полностью развернутой системы ГЛОНАСС). Предложен на 18-м Международном семинаре в ноябре 2013 года в Фудзиэде, Япония.

=====

Основные результаты:

- За 2014-15 годы проведено около 40 000 сеансов лазерных измерений для 24 КА ГЛОНАСС;
- Количество дневных измерений в 6-10 раз меньше, чем ночных;
- Отклонение лазерных измерений от финальных орбит КА ГЛОНАСС, рассчитанных в ИАЦ КВНО по данным сети IGS, составляет 25-35 мм;
- Точность определения орбиты КА ГЛОНАСС в теневых и свободных от теней областях примерно одинакова;
- Погрешность определения орбиты для КА во второй плоскости в 1,5 - 2 раза выше, что может быть объяснено различной ориентацией этой плоскости относительно эклиптики.



Содержание

1. Основные направления использования измерений КОС
2. Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS)
3. История (участие ИАЦ ЦНИИмаш в проектах ILRS)
4. Перспективы по использованию измерений КОС в системе ГЛОНАСС

Определение орбит КА, контроль точности орбит (1/2)

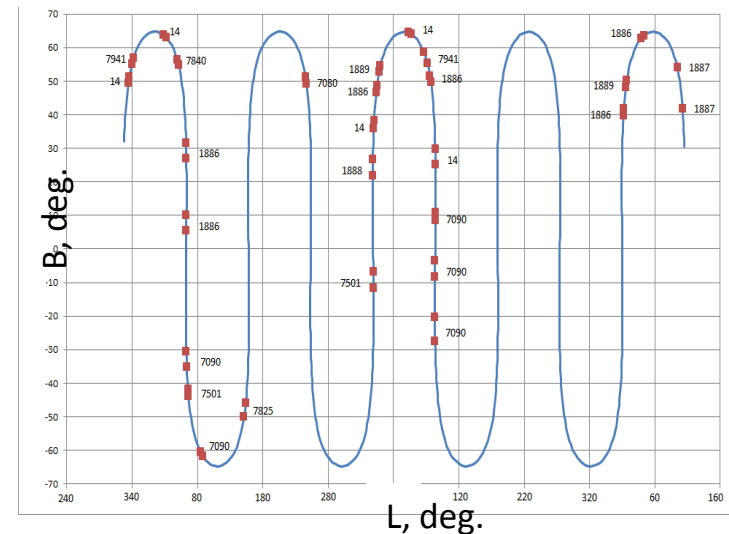
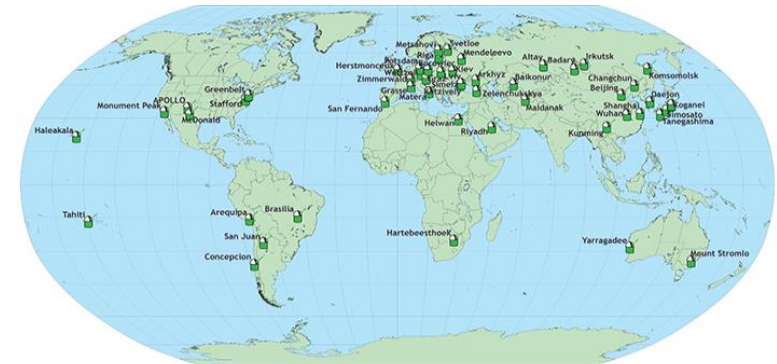
Варианты использования:

- 1) Определение эталонных орбит КА ГЛОНАСС только по измерениям КОС;
- 2) Добавление данных КОС к радиотехническим для повышения точности эфемерид ГЛОНАСС;
- 3) Анализ отклонений измерений КОС от орбит, полученных на основе радиоизмерений.

1)

- недостаточно измерений в южном и западном полушариях и на дневных интервалах (подтверждено в эксперименте LARGE);
- немоделируемые ускорения, связанные со световым давлением, не позволили построить траекторию на уровне точности измерений КОС на 8-ми суточных интервалах повторения трассы даже при большом числе измерений.

Сеть КОС ILRS



Определение орбит КА, контроль точности орбит (2/2)

2)

- Для совместной обработки радио- и КОС-измерений необходима точная (мм) привязка к центру масс КА ретрорефлекторной системы (PPC) и радиоантенны КА
- Различаются методы определения эфемерид по измерениям КОС и радиотехническим измерениям
- Достигнута высокая точность эфемерид на базе радиотехнических измерений

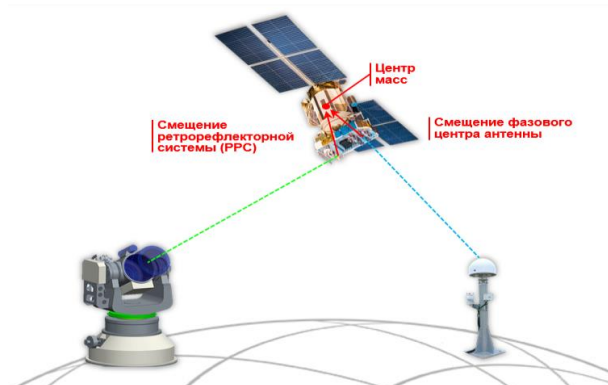
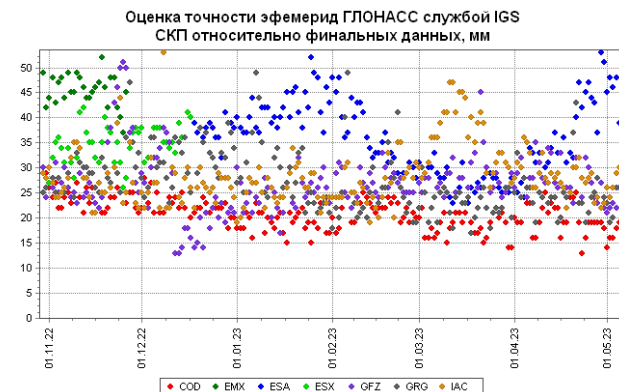
Результаты анализа вопроса по привязке к ЦМ:

- Взаимное положение PPC и радиоантенны уникально для каждого КА ГЛОНАСС-М
- Максимальное различие значений координаты центра PPC для разных КА достигает 6.7 см

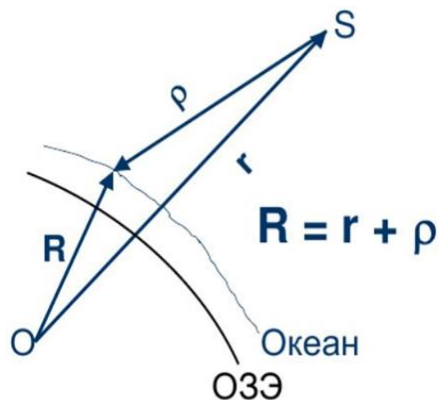
3)

Анализ отклонений дает возможность:

- Оценки точности разных моделей обработки данных и их оптимального выбора
- Детального анализа характеристик каждого КА ГЛОНАСС



Калибровка радиотехнических средств (1/2)



Калибровка альтиметра:

Вектор R – определяет поверхность геоида, вектор r – определяет местоположение КА на орбите, вектор ρ – представляет измерения с помощью альтиметра, ОЗЭ – общеземной эллипсоид, S – спутник.

В зависимости от того, какие параметры принимаются за известные исходные данные, а какие за уточняемые параметры, задачи, решаемые с помощью спутниковой альтиметрии, можно сформулировать следующим образом:

1. Если известны r и R , предвычислен $\rho' = R - r$, измерен ρ , то определяются отклонения $\rho' - \rho$, т.е. реализуется эталонирование радиовысотомера, определение его систематических погрешностей (специальные процедуры калибровки альтиметра на известных полигонах);

2. Если известна орбита ИСЗ (вектор r), с помощью альтиметра (радиовысотомера) измерен ρ , то определяется поверхность геоида R (основной режим использования альтиметра для построения модели геоида);

Калибровка радиотехнических средств (2/2)

Возможность калибровки радиоканала между КА ГЛОНАСС и беззапросной измерительной станцией (БИС) измерениями КОС на требуемом уровне точности и стабильности пока еще не доказана экспериментально, в частности:

- Как при проведении калибровки разделить межчастотные задержки «внизу» (в приемном тракте) и «наверху» (в передающем тракте)
- Насколько стабильны задержки в приемном и передающем тракте во времени в зависимости от разных условий
- С какой точностью реализуется на одной станции привязка к единой шкале времени БИС-КОС и наземной беззапросной КОС (НБКОС), какое отличие в привязке для других станций системы, какая стабильность такой привязки и т.д.



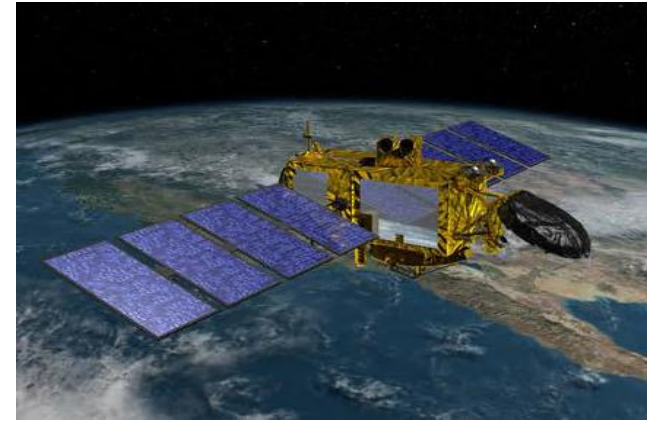
Необходимо экспериментальное подтверждение, что бортовая беззапросная квантово-оптическая система (БККОС) с несколькими или хотя бы с двумя БИС-КОС может прокалибровать каналы с требуемой точностью и стабильностью.

Синхронизация бортовых и наземных шкал времени (1/2)

Два зарубежных эксперимента:

– европейский эксперимент T2L2 (Time Transfer by Laser Link) с использованием DORIS на КА Jason 2 (2008-2018гг., точность синхронизации лучше 100 пикосекунд, максимальное расстояние между синхронизируемыми наземными стандартами – не более 6500 км)

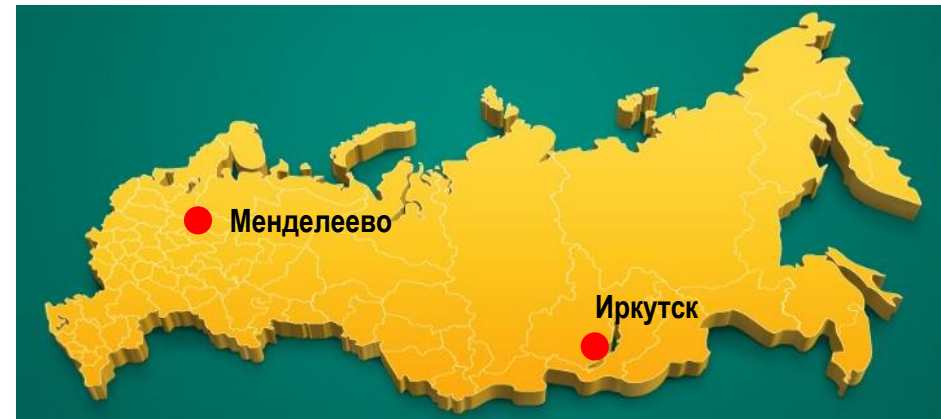
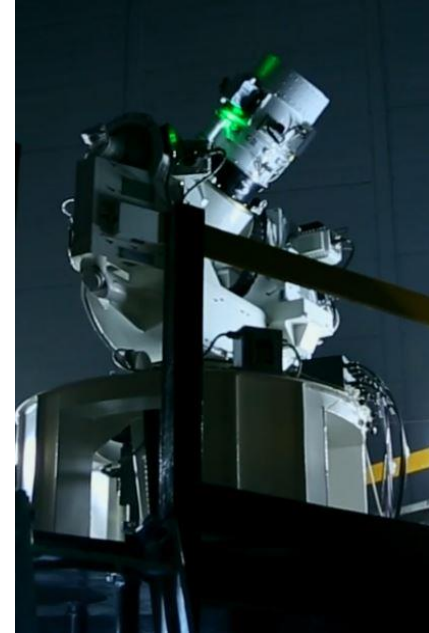
– китайский эксперимент LTT (Laser Time Transfer) в рамках проекта системы Бэйдоу с использованием двух КА на средневысотной орбите (с высотой 21500 км) и двух КА на наклонной геосинхронной орбите (36 000 км) (точность синхронизации бортовых и наземных часов лучше 300 пикосекунд).



Синхронизация бортовых и наземных шкал времени (2/2)

Технология на основе БКОС может обеспечить прорыв в точности синхронизации удаленных стандартов частоты, при отработке новых типов бортовых синхронизирующих устройств, но при этом необходимо:

- решить вопрос с передачей измерительной информации аппаратуры БКОС в заданный интервал времени для целевого использования;
- провести полный цикл отработки технологии БКОС в составе БКОС и НКОС, в том числе, при синхронизации 2-х наземных стандартов;
- проводить экспериментальную отработку технологии БКОС на основе измерений от БКОС, установленной на КА ГЛОНАСС, силами специалистов нескольких организаций

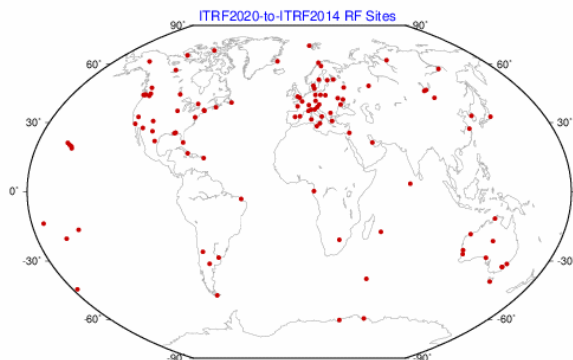


Космическая геодезия

1. Лазерная спутниковая дальнометрия относится к спутниковым методам космической геодезии, в состав которых входит также ГНСС и доплеровские наблюдения DORIS

2. Наиболее широкое распространение в космической геодезии в настоящее время получил метод ГНСС благодаря своим достоинствам:

- всепогодность;
- равномерное покрытие измерениями орбит КА ГНСС (сеть IGS включает около 500 станций геодезического класса, около 200 станций принимают сигналы ГЛОНАСС; сеть IIRS включает порядка 40 станций, в южном полушарии находится всего 9 станций КОС);
- высокая точность фазовых измерений;
- низкая стоимость наземной аппаратуры (необходим только приемник, компьютер и антенна) и ее круглосуточной эксплуатации в автоматизированном режиме.

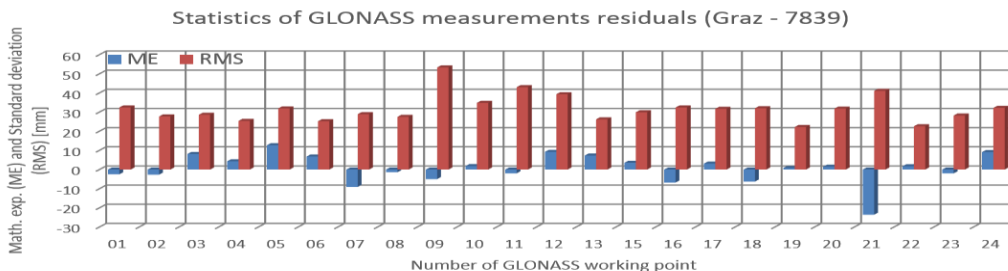


Задачи по разработке методов, алгоритмов и ПМО

Для получения результатов необходимо разработать и экспериментально отработать методы, алгоритмы и ПМО прецизионной обработки измерений КОС, которые (в дополнение к перечисленным ранее) должны обеспечить решение следующих задач:

- оценка (уточнение) привязки ретрорефлекторной панели к центру масс КА, согласованной со смещением фазового центра радиоантенны (колокация в космосе) отдельно для каждого КА ГЛОНАСС (в идеале эта задача должна быть решена на Земле до запуска КА на уровне 1-2 мм);
- детальный анализ зависимости результатов обработки данных от типа ретрорефлекторной панели, типа станции, номера КА, плоскости орбиты с выработкой конкретных рекомендаций по обработке данных для каждого отдельного КА ГЛОНАСС;
- оценка влияния погрешностей систем координат, реализуемых БИС и КОС, поскольку их уточнение, как правило, проводится независимо. Важнейшую роль здесь должны играть точки колокации на Земле (расстояние между точками привязки БИС и КОС должно быть определено с погрешностями на уровне 1 мм).

Статистика отклонений лазерных измерений станции Грац (Австрия) от финальных орбит КА ГЛОНАСС



Основные выводы

- ❑ Высокая точность измерений КОС и отличие их физической природы по сравнению с радиоизмерениями дают возможность использования технологий спутниковой лазерной дальнометрии для повышения эффективности системы ГЛОНАСС
- ❑ 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 ББКос, канала доставки информации с борта КА в центры обработки данных и отсутствия облачности на линии «КА-КОС». Технология на основе КОС может использоваться как метрологическое и неоперативное средство.
- ❑ Необходимо усилить работу по созданию и отработке высокоточных методик, алгоритмов и ПМО целевой обработки измерений КОС в интересах оценки характеристик КА ГЛОНАСС и повышения точности ЭВО, что должно обеспечить создание и эффективную работу российских центров анализа.



Спасибо за внимание!

**АО ЦНИИмаш, 141070, Российская Федерация,
Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
Телефон/Факс: +7 (495) 513 41 39
Эл. адрес: ianc@glonass-iac.ru
Веб-сайт: www.glonass-iac.ru, www.tsniimash.ru**

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СПУТНИКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В СИСТЕМЕ ГЛОНАСС: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

THE MAIN DIRECTIONS OF USING SATELLITE LASER RANGING TECHNOLOGIES IN THE GLONASS SYSTEM: EXPERIENCE AND PROSPECTS

Глотов Владимир Дмитриевич, Glotov Vladimir Dmitrievich, АО «ЦНИИмаш», JSC «TsNIIMash», г. Королев, Российская Федерация, GlotovVD@tsniimash.ru;

Карутин Сергей Николаевич, Karutin Sergey Nikolaevich, АО «ЦНИИмаш», JSC «TsNIIMash», г. Королев, Российская Федерация, KarutinSN@tsniimash.ru;

Кузенков Алексей Николаевич, Kuzenkov Aleksey Nikolaevich, АО «ЦНИИмаш», JSC «TsNIIMash», г. Королев, Российская Федерация, KuzenkovSN@tsniimash.ru;

Митрикас Владимир Валериевич, Mitrikas Vladimir Valerievich, АО «ЦНИИмаш», JSC «TsNIIMash», г. Королев, Российская Федерация, MitrikasVV@tsniimash.ru;

Пафнутьев Андрей Андреевич, Pafnutev Andrey Andreevich, АО «ЦНИИмаш», JSC «TsNIIMash», г. Королев, Российская Федерация, PafnutevAA@tsniimash.ru;

Аннотация:

На основе результатов международных экспериментов по лазерной локации КА ГЛОНАСС, проведенных в 1998-1999 и 2013-2015 годах, и опыта работ специалистов АО ЦНИИмаш рассматривается вопрос о перспективных направлениях применения лазерных измерений для развития системы ГЛОНАСС

Based on the results of international experiments on the laser location of the GLONASS spacecrafts conducted in 1998-1999 and 2013-2015, and the experience of the specialists of JSC TsNIIMash, the issue of promising areas of application of laser measurements for the development of the GLONASS system is being considered.

Основные направления использования лазерных дальномерных измерений

Специальная компьютерная обработка лазерных дальномерных измерений позволяет использовать их при решении задач по следующим основным направлениям:

- определение орбит КА, контроль их точности;
- калибровка радиотехнических средств;
- синхронизация удаленных наземных шкал времени и оценка стабильности бортовых стандартов частоты относительно наземных шкал времени;
- космическая геодезия (уточнение системы координат);
- резервирование траекторных измерений в случае отказа штатных средств контроля орбиты.

Для реализации технологии спутниковой лазерной дальнометрии необходимы три основные компоненты:

- наземные квантово-оптические станции (КОС), обеспечивающие получение высокоточных измерительных данных при проведении лазерной локации космических аппаратов (КА);
- оптические отражатели (ретрорефлекторы – РР), размещенные на КА, лоцируемых с помощью КОС;
- специальное высокоточное программное обеспечение для целевой обработки полученных измерительных данных на миллиметровом уровне точности.

Технологии лазерной спутниковой дальнометрии используются в различных космических проектах уже более 50 лет и основаны на том, что с наземной станции КОС посылаются ультракороткие импульсы длиной несколько десятков пикосекунд в направлении КА, а затем на этой же станции принимается сигнал, отраженный от ретрорефлекторов КА. В результате на станции с высокой точностью измеряется время прохождения сигнала «туда» и «обратно». Дальность между КА и КОС вычисляется на основе измеренного на станции интервала времени и скорости света.

К достоинствам технологии спутниковой лазерной дальнометрии могут быть отнесены:

- высокая точность измерений (ошибка 1-3 мм для усредненных «нормальных точек»);
- оптический диапазон измерений (простая модель тропосферы);
- длительный интервал наблюдений, что позволяет изучать движение литосферных плит и изменение координат геоцентра на продолжительных интервалах времени;
- космическая колокация на КА (совмещение разных типов измерений на одном спутнике в обеспечение решения задач космической геодезии).

К недостаткам данной технологии можно отнести следующие основные проблемы:

- невозможность работы при облачности;
- усложнение измерений в дневных условиях и при засветках оптики от Солнца и Луны;
- высокая стоимость разработки, изготовления и эксплуатации КОС в сравнении с радиотехнической безапробной измерительной станцией (БИС), стоимость которой составляет около 1% от стоимости КОС.

Высокая точность лазерных измерений достигается за счет:

- уменьшения длины импульса лазера;
- увеличения числа измерений в единицу времени (до 1000 и более измерений в секунду);
- минимизации «ошибки цели» (совершенствования ретрорефлекторов на КА);
- постоянной калибровки дальномерного канала;
- использования для целевого анализа «нормальных точек», полученных путем осреднения первичных измерений на интервале времени от 5 до 300 секунд.

Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS)

В состав международной сети наземных КОС входит около 40 станций, которые принадлежат разным странам и расположены на всех континентах Земли, кроме Антарктиды, а также на островах Тихого океана. При этом лазерные наземные станции распределены по поверхности Земли неравномерно: в южном полушарии находится всего 8 станций, в западном полушарии - 9 станций. Для получения высокоточных научных и практических результатов при использовании технологии лазерной спутниковой дальнометрии целесообразно объединять их возможности по проведению лазерных измерений КА.

Координационная деятельность по лазерной локации КА, сбору, хранению и целевой обработке полученных лазерных спутниковых измерений организована в рамках Международной службы лазерной локации (International Laser Ranging Service – ILRS). ILRS с момента ее организации в 1997 году разрабатывает стандарты, формирует состав международных проектов для лазерной локации КА, определяет их приоритетность, координирует работу Центров анализа, проводит ежегодные конференции в целях развития измерительных средств и методов анализа данных.

Лист приоритетности для проведения лазерной локации КА, представленный в ноябре 2023 года на сайте ILRS (<https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov>), включает 54 КА, в том числе, 10 геодезических КА (LAGEOS-1,2, Эталон 1,2, LARES, LARES-2, Stella, Starlette, Ajisai, Larets), 24 КА по программам ГНСС (4 ГЛОНАСС, 4 Galileo, 4 BeiDou, 7 IRNSS, 5 QZS) и 20 КА в рамках научных и технических экспериментов (GRACE-FO-1/2, ICESat-2, Geo-IK-2 и др.).

В рамках пленарного заседания конференции ILRS в Штутгарте в ноябре 2019 года, проходившей в очном режиме, были заслушаны доклады об основных проблемных вопросах развития спутниковой дальнометрии и ближайших перспективах ее развития. В частности, в докладе президента ILRS Тоши Отсубо (Япония) было отмечено, что за последние 20 лет количество действующих лазерных станций мировой сети практически не увеличивалось и оставалось на уровне примерно 40 станций, в то время, как количество станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в мире на текущий момент достигло 18 000.

Основные направления дальнейшего развития технологии лазерной спутниковой локации:

- снижение стоимости разработок и эксплуатации лазерных станций;
- автоматизация в целях повышения производительности и исключения операторских ошибок;
- повышение точности измерений за счет модернизации действующих станций и разработки новых станций;
- разработка новых моделей, методов, алгоритмов и программно-математических комплексов для высокоточного анализа лазерных измерений;
- апостериорная обработка накопленных данных с учетом новых моделей и алгоритмов.

Опыт участия специалистов АО ЦНИИмаш в проектах ILRS

Лазерные уголкового отражатели установлены на все КА ГЛОНАСС, Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай), QZS (Япония), IRNSS (Индия), запланирована их установка на КА серии GPS III (США), начиная с девятого GPS-III-SV9. Для анализа возможностей технологий КОС целесообразно оценить предыдущий мировой опыт использования этих измерений при лазерной локации КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

В настоящее время накоплен большой опыт проведения лазерных измерений КА различных ГНСС и последующей их обработки. В частности, в период с 1994 по 2014 гг. проводилась лазерная локация КА GPS ПА-35 и ПА-36. Начиная с 1995 года лоцировались лазерными станциями сети ILRS КА системы ГЛОНАСС, при этом наиболее интенсивные работы по лазерной локации КА ГЛОНАСС проводились в рамках реализации специальных проектов IGEX98 (1998-1999 гг.) [1-3] и LARGE (2013-2015 гг.) [11-16]. На основе большого объема полученных измерительных данных специалистами Швейцарии, России, США, Германии, Японии, Англии и других стран проводился анализ возможностей использования измерений КОС для определения и контроля эфемеридной информации ГНСС, в том числе, КА системы ГЛОНАСС, некоторые полученные результаты опубликованы в работах [1-17].

Международный ГЛОНАСС Эксперимент IGEX-98 (The International GLONASS Experiment) проводился с октября 1998 по апрель 1999 года. Его главной целью была реализация первой глобальной наблюдательной кампании всех КА ГЛОНАСС для геодезических и геодинимических применений.

Основными задачами IGEX-98 были:

- разработка высокоточных навигационных приемников для сигналов КА ГЛОНАСС и создание на базе непрерывно работающих радиотехнических беззапросных измерительных станций (БИС) глобальной сети слежения за КА ГЛОНАСС;

- отработка совместного взаимодействия лазерной спутниковой подсистемы и системы эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС на основе радиоизмерений;
- уточнение моделирования движения ГЛОНАСС (учет влияния солнечной радиации, режимов ориентации), доработка ПМО анализа измерительных данных ГЛОНАСС;
- определение орбит ГЛОНАСС с точностью лучше одного метра в высокоточной земной системе координат;
- определение матрицы перехода между системами координат ГЛОНАСС (ПЗ-90) и GPS (WGS-84);
- синхронизация систем времени GPS и ГЛОНАСС.

В международном эксперименте IGEX-98 участвовало более 60 станций на базе БИС и 30 КОС, расположенных в 25 странах мира. Лазерными станциями лоцировалось 9 КА ГЛОНАСС (по три КА в каждой плоскости), а по радиотехническим измерениям глобальной сети определялись орбиты всех КА ГЛОНАСС.

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО ЦНИИмаш был единственным российским участником IGEX-98 в качестве Центра анализа, специалистами ИАЦ КВНО были получены следующие основные результаты:

- вычислены эфемериды 9-ти КА ГЛОНАСС на всем шестимесячном интервале эксперимента с ошибкой 20-30 см (1 сигма) по результатам обработки более 6500 сеансов лазерных измерений 30-ти КОС мировой сети ILRS;
- уточнена матрица перехода между системами координат ПЗ-90-ГЛОНАСС и WGS-84 (GPS), получены оценки ее вариаций;
- отработаны алгоритмы и программное обеспечение высокоточного расчета эфемерид КА ГЛОНАСС;
- отработано оперативное взаимодействие с международной системой Центров хранения и анализа данных с использованием средств Интернет.

Вышеуказанные результаты ИАЦ КВНО, полученные при обработке данных эксперимента IGEX98, были представлены на международной конференции по спутниковой навигации в г. Нэшвилл (США) в сентябре 1999, получили высокую оценку и вошли в число основных результатов эксперимента [2-3].

Учитывая то, что общее количество навигационных спутников систем ГЛОНАСС, Бейдоу, Галилео, GPS, IRNSS, QZS, оснащенных уголковыми отражателями, в ближайшее время будет составлять около 100 КА, а количество наземных лазерных станций ограничено (в ближайшей перспективе не более 50 станций в составе мировой сети), при этом в листе приоритетности ILRS есть несколько десятков других КА, возникает проблема определения стратегии проведения и обработки лазерных измерений действующих ГНСС и улучшения согласованности продуктов в области определения орбит.

В целях исследования вышеприведенных вопросов на 18-м международном симпозиуме ILRS в г. Фуджиеда (Япония) было принято решение о проведении специального международного эксперимента LARGE (англ. LAser Ranging to GNSS s/c Experiment). В ходе эксперимента LARGE в период с 2013 по 2015 гг. в приоритетном режиме проводилась интенсивная лазерная локация станциями ILRS всех КА ГЛОНАСС. Система ГЛОНАСС для проведения международного эксперимента была выбрана с учетом того, что к моменту его начала система ГЛОНАСС была полностью развернута, и все КА системы были оснащены ретрорефлекторными отражающими панелями.

В рамках анализа результатов эксперимента LARGE рассматривались следующие возможные варианты использования измерений КОС при определении и контроле эфемерид КА ГЛОНАСС:

- определение независимых эталонных орбит КА ГЛОНАСС строго по измерениям КОС;
- использование лазерных измерений КОС в целях повышения точности определения эфемерид ГЛОНАСС путем их добавления к радиотехническим измерениям при определении орбит КА ГЛОНАСС;
- анализ отклонений лазерных измерений от орбит КА ГЛОНАСС, полученных строго на основе радиоизмерений, в целях контроля точности эфемерид КА ГЛОНАСС

Результаты анализа эксперимента LARGE были представлены осенью 2015 года на специализированном техническом саммите ILRS в г. Матера (Италия), основными из которых в части измерительной кампании являются:

- в эксперименте по лазерной локации КА ГЛОНАСС участвовало 29 станций сети ILRS;
- для всех 24-х активных КА системы ГЛОНАСС проведено около 40 тысяч сеансов лазерных измерений сети ILRS, из них около 10 тысяч российскими станциями;
- в общем составе полученных измерительных данных дневных измерений меньше, чем ночных в 10-20 раз;
- измерения распределены неравномерно вдоль орбиты, в частности, между северным и южным, западным и восточным полушариями, дневными и ночными участками орбит, при этом на некоторых витках лазерные измерения отсутствовали полностью.

К основным результатам, полученным в ИАЦ КВНО при обработке лазерных измерений сети ILRS в рамках эксперимента LARGE, можно отнести следующие положения:

- согласованность лазерных измерений и финальных орбит КА ГЛОНАСС, вычисляемых в ИАЦ КВНО по радиоизмерениям, находится на среднем уровне 25-35 мм по радиальной составляющей. Тем самым с помощью лазерных измерений мировой сети станций подтверждена высокая точность орбит, вычисляемых в режиме регулярной службы в ИАЦ КВНО на основе радиоизмерений;
- погрешности определения орбит для КА во второй плоскости в полтора-два раза выше, чем в целом по группировке, что может быть объяснено отличающейся ориентацией данной плоскости относительно эклиптики и, таким образом, другим воздействием солнечного давления на спутники, находящиеся во второй

орбитальной плоскости, либо тем, что в данной плоскости находятся КА, имеющие достаточно длительный срок эксплуатации;

– существенных отличий в точности определения орбит КА ГЛОНАСС на теневых и безтеневых участках орбит не обнаружено, что свидетельствует о достаточно точном моделировании движения КА в теневой зоне, используемом в ИАЦ КВНО.

Перспективы по использованию измерений КОС в системе ГЛОНАСС

Основные направления использования лазерной спутниковой технологии в интересах системы ГЛОНАСС:

- наиболее оптимальным способом использования измерений КОС для оценки эфемеридной информации ГЛОНАСС (в проекции на наклонную дальность) является анализ отклонений лазерных измерений от орбит КА ГЛОНАСС, дающий возможность провести контроль точности результатов определения орбит КА ГЛОНАСС на базе радиоизмерений, а на этой основе оценить качество применяемых моделей и программного обеспечения для расчета эфемеридно-временной информации на различных участках полета КА, включая теневые участки, уточнить эксплуатационные характеристики для каждого КА ГЛОНАСС;

- технология на основе лазерных измерений может обеспечить существенный прорыв в точности синхронизации удаленных стандартов частоты и при отработке новых типов бортовых часов. В частности, имеется положительный опыт в данном направлении работ при проведении европейского эксперимента T2L2 (Time Transfer by Laser Link) на борту КА Jason2 и китайского эксперимента LTT (Laser Time Transfer) в рамках проекта системы BeiDou. Для практического использования данной технологии необходимо наличие на борту КА ГЛОНАСС специального приемника оптического излучения, а также необходимо решить вопрос с передачей соответствующей измерительной информации в заданный интервал времени в центры анализа данных для последующей обработки и эффективного использования полученных результатов;

- высокоточные методы, алгоритмы и программные средства анализа лазерных измерений должны развиваться в нескольких организациях с целью верификации результатов. Стоимость разработки программных средств существенно ниже расходов на создание лазерных станций, а эффективное использование лазерной дальнометрии невозможно без специальной прецизионной компьютерной обработки измерений.

На величину невязок измерений КОС относительно орбит по фазовым измерениям влияет множество факторов, связанных как с погрешностями моделирования орбит КА (например, погрешности моделирования солнечного давления) и обработки фазовых измерений из-за распространения радиосигналов в тропосфере или ионосфере, так и с проведением и обработкой лазерных измерений (дрожание фотонных детекторов, калибровка дальномерного тракта, атмосферные задержки для разных углов лазерной локации).

В интересах высокоточного и оперативного контроля точности эфемеридного обеспечения КА ГЛОНАСС для получения реально полезных результатов необходимо разработать и экспериментально отработать методы, алгоритмы и программное обеспечение обработки измерений КОС, которые должны обеспечить решение следующих задач:

- оценку (уточнение) привязки ретрорефлекторной панели к центру масс КА, согласованной со смещением фазового центра радиоантенны (колокация в космосе) отдельно для каждого КА ГЛОНАСС;
- детальный анализ зависимости результатов обработки данных от типа ретрорефлекторной панели, типа станции, номера КА, плоскости орбиты с выработкой конкретных рекомендаций по обработке данных для каждого отдельного КА ГЛОНАСС (особенно важно для новых КА типа ГЛОНАСС-К);
- оценку влияния погрешностей систем координат, реализуемых БИС и КОС, поскольку их уточнение, как правило, проводится независимо, важнейшую роль здесь должны играть точки колокации на Земле.

Основные выводы:

- высокая точность измерений КОС и отличие их физической природы по сравнению с радиоизмерениями дают возможность использования технологий спутниковой лазерной дальнометрии для повышения эффективности системы ГЛОНАСС;

- 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 ГЛОНАСС дополнительной аппаратуры, канала доставки информации с борта КА в центры обработки данных и отсутствие облачности на линии «КА-КОС». Технология на основе КОС может использоваться при этом как метрологическое и неоперативное средство;

- необходимо усилить работу по созданию и отработке высокоточных методик, алгоритмов и программного обеспечения целевой обработки измерений КОС в интересах оценки характеристик КА ГЛОНАСС и повышения точности эфемеридно-временного обеспечения, что должно обеспечить создание и эффективную работу нескольких российских центров анализа.

Литература:

1. Mitrikas V., Revnivych S., Bykhanov E. / WGS84/PZ90 Transformation Parameters Determination Based on Laser and Ephemeris Long-Term GLONASS Orbital Data Processing / Proceedings ION GPS-98, Nashville, Sept. 15-18, 1998 pp.1625-1635, Inst. Of Navigation
2. Glotov V., Zinkovski M., Mitrikas V. / GLONASS Precise Orbits as a Result of IGEX-98 Laser Tracking Campaign / International GLONASS Experiment IGEX-98, Workshop Proceedings, pp. 219-226, September 13-14, 1999, Nashville, Tennessee, USA
3. Mitrikas V., Revnivych S., Glotov V., Zinkovski M. / PZ-90 GLONASS to ITRF Transformation as a Result of IGEX-98 Laser Tracking Campaign. International GLONASS Experiment IGEX-98 / Workshop Proceedings, pp. 275-300, September 13-14, 1999, Nashville, Tennessee, USA
4. 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, pp. 725-743, DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00190-015-0810>
5. Rothacer M. The Special Role of SLR for Inter-Technique Combinations // ILRS Workshop 2003. Bad Koetzting, Germany. 2003.
6. Pavlis EC. Comparison of GPS S/C orbits determined from GPS and SLR tracking data/ Adv. Space Res 16 (12), 55-58 : 10.1016/0273-1177, 1995
7. Otsubo T., Appleby G. Gibbs P. Glonass laser ranging accuracy with satellite signature effect. SGEO 22(5-6): 509-516, 2001.
8. Hackel S., Steigenberger P., Hugentobler U., Uhlemann M., Montenbruck O., Galileo orbit determination using combined GNSS and SLR observations // 2014.
9. Urschl, C., Beutler, G., Gurtner, W., Hugentobler, U., and Schaer, S. (2007). Contribution of SLR tracking data to GNSS orbit determination. Advances in Space Research, 39(10):1515–1523. doi: 10.1016/j.asr.2007.01.038.
10. Daniela Thaller, Krzysztof Sośnica, A. Jäggi (2012): The space tie between GNSS and SLR. American Geophysical Union 2012 Fall Meeting 3–7 December 2012, San Francisco, CA, USA.
11. Глотов В.Д., Митрикас В.В., Зинковский М.В. Первые результаты обработки ILRS-данных лазерной локации космических аппаратов ГЛОНАСС в 2014-2015 годах, доклад на шестой Всероссийской конференции КВНО-2015, С-Петербург, ИПА, 2015.
12. 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
13. 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 2015г.
14. V. Glotov, V. Mitrikas, A. Pafnutyev Estimation of the laser retro-reflector array center location for GLONASS-M, Proceedings of 21th ILRS Workshop on laser ranging, Canberra, 2018
15. 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.
16. Глотов В.Д., Митрикас В.В., Пафнутьев А.А., Опыт и перспективы использования лазерной спутниковой дальнометрии в целях развития системы ГЛОНАСС, Космонавтика и ракетостроение, 2019, вып.6 (111), с. 54-65.
17. В.Д. Глотов, С.Н. Карутин, А.Л. Кожинов, В.В. Митрикас, А.А. Пафнутьев О возможных направлениях использования квантово-оптических станций в программе ГЛОНАСС, Труды Института прикладной астрономии РАН, вып.50, 2019, с.23-30.