

**СЛИЧЕНИЕ УДАЛЁННЫХ ШКАЛ ВРЕМЕНИ НА  
ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ****И.Ю. Игнатенко**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

igig@vniiftri.ru

*В работе рассматриваются вопросы передачи времени при помощи средств лазерной локации, использование результатов исследований для передачи шкал времени, выявление систематических ошибок, калибровки шкал времени, расширение фундаментальных задач, в частности анизотропии скорости связи и др.*

*Questions of time transfer via satellite laser ranging's means, using the results of researches for time scales transfer, identification of systematic errors, calibrations of time scales, the expansion of fundamental tasks, in particular, anisotropies of communication speed, etc. are presented in the issue.*

*Ключевые слова: лазерная локация, лазерно-локационные станции, временные вариации, параметры вращения Земли, сличение наземных и бортовых часов, гравитация, передача времени*

Лазерная локация спутников (SLR) наряду с другими средствами, позволяет решать множество фундаментальных и прикладных задач. В 70-80-е годы при помощи лазерной локации были получены основные точные данные о параметрах вращения Земли, ее размерах и форме, ориентации в пространстве. С 90-х годов проводится мониторинг долгопериодических изменений гравитационных полей, измерения высших гармоник гравитационного поля Земли. Результаты, полученные в процессе лазерной локации, использовались и используются ITRF в части определения движения центра масс Земли. В настоящее время активно развиваются методы исследований в части дальнейшей детализации этой информации, обсуждаются вопросы повышения качества расчетов орбит и ряд других направлений. Среди применений лазерной локации находятся мониторинг движения тектонических плит, в том числе в интересах предсказания стихийных бедствий (краткосрочные прогнозы землетрясений, цунами), космическая геодезия и навигация и проч.

Однако с появлением и развитием глобальных навигационных систем, интерферометрии со сверхдлинными базами, совершенствованием системы DORIS доля лазерно-локационных измерений во всем массиве получаемых данных существенно уменьшилась. Тем не менее, на сегодняшний день SLR является одним из наиболее высокоточных средств измерений для данной области, что и предопределяет её активное использование и развитие. В последнее время обращалось внимание и на то обстоятельство, что имеющиеся технологии не заменяют, а только взаимно дополняют друг друга.

Глобальные сети Международного геодезического союза (IAG) включают

---

*Альманах современной метрологии, 2016, №8*

в себя ряд служб, работающих на выполнение задач, стоящих перед организацией. По данным [1] сети имеют в своем составе 42 лазерно-локационные станции, 407 пунктов GNSS, 45 систем для VLBI и 58 пунктов наблюдения DORIS. Данные средства используются во многих научных и практических приложениях. Примерное распределение имеющихся средств по видам «деятельности» следующее.

TRF:

- координаты пунктов и скорости их изменения: SLR, GNSS, VLBI, DORIS;

- масштабы и временные вариации: SLR, VLBI;

- уплотнение сетей: GNSS;

- равномерность распределения сетей: DORIS.

Астрономические системы координат: VLBI.

Прецизионный расчет орбит (POD):

- точные спутниковые эфемериды: SLR, GNSS, DORIS;

- калибровка удаленных средств и инструментов: SLR, GNSS;

- мониторинг уровня моря: SLR, GNSS, DORIS;

Параметры вращения Земли:

- движение полюсов: SLR, VLBI, GNSS, DORIS;

- длительность суток SLR, GNSS, DORIS;

- UT1-UTC и долговременная стабильность отклонений: VLBI.

Исследования атмосферы:

- тропосферные задержки: GNSS, VLBI;

- глобальное картографирование концентрации электронов в ионосфере: GNSS, DORIS;

- выделение профилей распределения водяного пара: GNSS.

Исследование гравитации:

- статические и варьирующиеся коэффициенты гравитационного поля Земли: SLR, DORIS;

- масса Земли: SLR;

- вариации положения центра масс Земли: SLR.

Время и частота:

- сличение наземных и бортовых часов: GNSS;

- передача времени и частоты: GNSS;

Фундаментальные исследования:

- общая теория относительности и альтернативные теории: SLR/LLR;

- искривление световых лучей и расширение времени: VLBI.

Передача времени, хотя это и не указано в цитируемом источнике, относится к одному из перспективных направлений деятельности SLR, как одному из наиболее точных средств.

Эксперименты по передаче времени при помощи средств лазерной локации (Time Transfer by Laser Link) проводятся под эгидой французской обсерватории OCA (Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse) при участии CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) и Европейского космического агентства (ESA). В настоящее время для этой цели используется альтиметрический спутник Jason 2, эксплуатирующийся с середины 2008 года. Заявленный срок эксплуатации спутника – до июня 2011 года, с возможным продлением до июня 2014-го.

Среди заявленных целей Time Transfer by Laser Link (T2L2) имеются и прикладные, и фундаментальные задачи, в частности передача шкал времени, выявление систематических ошибок, калибровка шкал времени, измерение анизотропии скорости света и др.

T2L2 является логическим продолжением эксперимента LASSO (LAser Synchronization from Stationary Orbit), первые упоминания о котором относятся к 1972 году. В 1988 году был запущен геостационарный спутник Meteosat P2, имевший на борту в том числе и средства передачи сигналов времени оптическими методами для реализации целей эксперимента.

На борту спутника имелись уголковые отражатели, фотодетектор и кварцевые часы. Часы не были привязаны к абсолютной шкале времени и, по сути, представляли собой хронограф, фиксирующий разность моментов прихода импульсов лазерного излучения. Т.о. передача времени между лазерно-локационными станциями базировалась на принципах колокации. Две станции, каждая из которых в один и тот же момент времени по своей локальной шкале излучала лазерные импульсы. Момент прихода отраженного сигнала каждой из станций также привязывался к своей локальной шкале. В результате по разности показаний часов, расположенных на спутнике, с учетом измеренного при помощи локации времени распространения света до спутника, вычислялась разность шкал времени на каждой из станций. Разность моментов, фиксировавшаяся на борту, передавалась по телеметрии в центр обработки.

Первая серия экспериментов, относящаяся к концу 80-х годов, проводилась на территории Европы. Со стороны СССР в эксперименте принимала участие Крымская научная станция ФИАН (Кацивели). Относительно небольшие расстояния между европейскими обсерваториями позволяли контролировать разность локальных шкал времени традиционными способами и, тем самым качество передачи шкалы при помощи средств лазерной локации. Целью этих экспериментов являлась проверка возможностей такого способа передачи, отработка технологий и проч.

Для второй серии экспериментов спутник Meteosat P2 был перемещен в точку, находящуюся примерно над серединой Атлантики. Это было сделано для обеспечения его одновременной видимости с двух континентов – Евро-

пы и Америки.

В 1992 г. состоялась первая оптическая передача между обсерваториями ОСА во Франции и McDonald (штат Техас) в Соединенных штатах Америки. Достигнутые значения погрешности передачи шкалы времени (нестабильности) составили  $10^{-13}$  за 1000 секунд.

По результатам эксперимента была признана перспективность данного направления, несмотря на определенные трудности с осуществлением непосредственно самого эксперимента. В частности, спутник вращался вокруг своей оси с частотой 5 Гц. Ширина диаграммы направленности уголкового отражателя составляла 300. Диаграмма направленности фотодетектора имела еще меньшую величину. Это вызывало определенные проблемы, как с получением отраженного сигнала, так и фиксацией аппаратурой спутника момента времени прихода лазерного излучения. А учитывая и необходимость синхронизации двумя станциями моментов излучения, простые решения, как, например, «плавающий» период излучения, здесь не вполне подходили.

Дальнейшая отработка технологии T2L2 проводилась в 1996 году с использованием российской орбитальной станции «Мир». На станции было размещено соответствующее оборудование французского производства, однако полностью эксперименты не были завершены.

Одновременно была намечена программа на Международной космической станции (ISS) в части применения ансамбля атомных часов. Однако и она не была реализована по ряду технических причин. Под эгидой CNES также делались технико-экономические обоснования относительно определения возможностей размещения соответствующего оборудования с открытой коммуникационной архитектурой и на других спутниках. В том числе рассматривались варианты использования для этой цели аппаратов *Mugiade Micro-satellite*, *Galileo Test Bed* и ряда других.

В 2004 году NASA решило установить на спутник Jason 2 необходимый инструментарий как американский вклад в программу. Предварительный анализ подтвердил достаточно высокую эффективность данного решения.

Принцип функционирования T2L2, как и в эксперименте LASSO, основан на измерении времени распространения светового импульса от лазерной станции до спутника (и обратно) и фиксации момента прихода данного импульса по бортовым часам спутника. На борту находятся фотодетектор, аппаратура временной привязки и высокостабильный генератор, выполняющий роль часов. Наземный сегмент включает в себя лазерно-локационные станции необходимого качества (LRA).

Лазерно-локационная станция в асинхронном режиме в момент времени  $t_{start}$  излучает короткий световой импульс, который отражается от трипель-призм, расположенных на спутнике, а момент его прихода  $t_{board}$  регистрируется бортовыми часами. Отраженный сигнал принимается наземной локаци-

онной станцией в момент времени  $t_{return}$ . Разность шкал времени, например, станции А и бортовых часов спутника S находится как

$$X_{AS} = \frac{t_{start} + t_{return}}{2} - t_{board} + \tau_{rel} + \tau_{atm} + \tau_{geometry},$$

где  $\tau_{rel}$  - релятивистская поправка,  $\tau_{atm}$  – задержка в атмосфере,  $\tau_{geometry}$  - геометрический фактор, учитывающий смещения отражателя и фотодетектора относительно базовой точки. Аналогичным образом определяется и разность шкал времени  $X_{BS}$  станции В и спутника S. Соответственно передача времени между станциями А и В осуществляется путем вычисления разности  $X_{AS}$  и  $X_{BS}$ . Величины поправок незначительны, в частности  $\tau_{atm}$ , в данном контексте пренебрежимо мала, т.к. свет туда и обратно распространяется по одному и тому же пути, что компенсируется при вычислениях. Тем не менее, эта поправка должна быть определена и учитываема при установке бортовой шкалы времени. Величина релятивистской поправки при двусторонней передаче, по разным оценкам, не превосходит 0,1 пс [2]. Одна из возможных схем передачи шкалы времени представлена на рисунке 1.

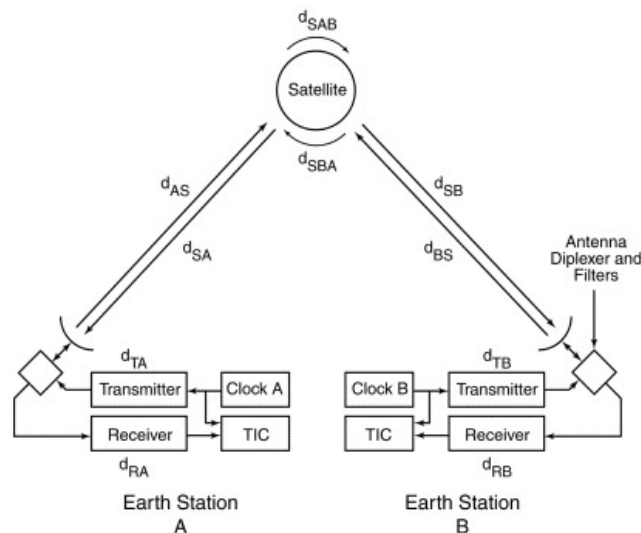


Рис. 1

Наземная лазерно-локационная станция должна быть снабжена аппаратурой привязки стартового и стопового лазерных импульсов к шкале времени. Лазерный передатчик должен работать на длине волны 532 нм, что предполагает использование Nd:YAG лазера с удвоением частоты. Длительность импульса должна находиться в пределах от 10 до 200 пс. Частота следования импульсов от 10 Гц до нескольких кГц.

В настоящее время, как уже было сказано выше, в мире на постоянной основе работает около 40 лазерно-локационных станций. Из них около 25 регулярно лоцируют спутник Jason 2. Достигнутые на сегодняшний день характеристики погрешности передачи времени представлены на графике (рисунок 2). Здесь же для сравнения приведены и результаты сличений, выполненные традиционными методами [3].

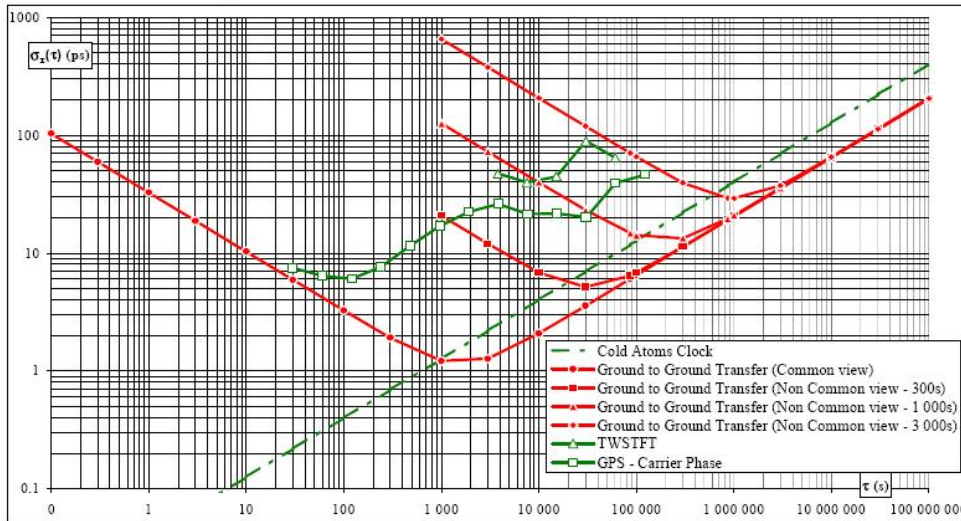


Рис. 2

Представленные результаты позволяют говорить о перспективности данного направления. Как видно из графиков, наивысшая точность передачи между двумя наземными станциями (~1 пс за 1000 с) достигается при одновременной видимости спутника с обеих станций. При отсутствии одновременной видимости результаты заметно хуже, но и в этом случае качество передачи времени на 1–2 порядка превосходит, например, качество передачи дуплексной системой (TWSTFT). В связи с этим технология T2L2 может быть использована и, впрочем, уже используется для калибровки и поверки средств типа TWSTFT, GPS и других радиотехнических методов передачи. В этом случае появляется возможность улучшить качество синхронизации часов на больших базах. Калибровка средств TWSTFT методами лазерной локации признана перспективной, и в настоящее время активно ведутся исследовательские работы в этом направлении. В ходе 17-й Международной конференции по лазерной локации был представлен ряд докладов, подтверждающих данные результаты, и намечены пути развития данных технологий.

Начиная с марта-апреля 2010 г. данные телеметрии спутника Jason 2 выкладываются в открытый доступ. Одной из самых существенных технических проблем является различие в энергии излучения лазерно-локационных станций, что затрудняет работу бортовых детекторов космического аппарата в части обнаружения светового сигнала, а также узлов временной привязки для фиксации моментов его прихода. С осени 2009 г. проводилась замена программного обеспечения, настройка порогов обнаружения и дополнительное тестирование всего комплекса в целом. Низкоэнергетические станции, такие как «Менделеево», могут работать с данным спутником в ночное время. Договоренность о нашем участии в этой работе имеется. Пробная локация спутника Jason 2 показала, что сигнал устойчиво регистрируется бортовой аппаратурой. Однако продолжение работ в данном направлении сдерживается отсутствием эталонного времени на станции «Менделеево».

Данное направление активно разрабатывается и в части использования оптической передачи времени в рамках глобальных навигационных систем. Например, в составе создаваемой Китайской народной республикой космической навигационной системе КОМПАСС предполагается использование оптических средств для синхронизации и контроля шкал времени бортовых часов навигационных спутников. В настоящее время работа ведется в рамках проекта LTT (Laser Time Transfer). Полученные результаты подтверждают высокую эффективность метода и сравнимы с результатами, полученными в программе T2L2 [4]. Это позволяет улучшить тактико-технические характеристики системы в целом, которые, как известно, напрямую влияет на «качества» шкалы времени. Названное обстоятельство может в будущем существенно повысить конкурентоспособность системы.

Имеющийся в работе экспериментальный спутник BEIDOU M1, на котором отрабатываются основные технические решения будущей глобальной навигационной системы, снабжен как радиотехническими средствами передачи времени, так и средствами LTT. Появились сообщения об успешной передаче шкалы через этот спутник между обсерваторией ОСА во Франции и обсерваторией Шанхая в КНР. Также со спутником BEIDOU M1 активно работают лазерно-локационные станции Simosato (Япония), Кацивели (Крым), Graz (Австрия), MacDonald (США), Wettzell (Германия) и ряд других. 15 января 2010 г. был запущен еще один спутник системы КОМПАСС, однако его характеристики пока неизвестны.

Подобные работы ведутся и в рамках проекта GALILEO. Однако на работающих пока двух спутниках GIOVE-A и GIOVE-B средства оптической передачи отсутствуют. Со стороны Парижской обсерватории (SYRTE) имеется предложение по датированию PPS GPS на борту (платформа Proteus), включая контроль нарушений работы.

В настоящее время Европейским космическим агентством на период 2015...2025 гг. разрабатывается фундаментальный исследовательский проект EGE (Einstein Gravity Explorer), суть которого заключается в уточнении гравитационного потенциала путем анализа хода часов. В рамках проекта рассматривается вопрос о включении в систему передачи времени и технологий T2L2. В настоящий момент уточняются возможности выделения дополнительного финансирования для включения в состав проекта рассматриваемых средств.

В области фундаментальных исследований, в части определения отклонения света, которое автор работы [1] «отдает на откуп» VLBI, также имеется определенный прогресс. Отклонение света в процессе лазерной локации устойчиво наблюдается [6], и на сегодняшний день получены вполне удовлетворительные результаты [7].

Перспективы передачи времени средствами SLR еще более очевидны при размещении на борту космического аппарата высокоточных часов на базе, например, водородного или оптического стандарта частоты. В этом случае космический аппарат может выступать в качестве эталона-переносчика, как для космического, так и для наземных сегментов системы GLONASS и других потребителей. Представляется перспективной и передача времени от ГЭВЧ к территориально разнесенным рабочим эталонам.

В свете сказанного на сегодняшний день лазерно-локационная станция может быть использована, прежде всего, для выполнения работ по сличению шкал времени между ГЭВЧ и Парижской обсерваторией с одновременной калибровкой имеющихся средств, а также между ГЭВЧ и обсерваториями, имеющими необходимое качество шкал. К ним относятся, прежде всего, OSA (Франция), Wettzell (Германия), Zimmer (Швейцария) и ряд других. Кроме того, через спутник Jason 2 теоретически возможна работа по калибровке средств передачи времени Менделеево – Иркутск (имеются периоды одновременной видимости). Через спутник BEIDOU M1 возможна работа с азиатскими обсерваториями, как то: Шанхай (КНР), Simosato (Япония), а также с европейскими, и не исключена возможность с американскими.

Использование описанных технологий формулирует и определенные требования к лазерно-локационной станции. Ограничение средней мощности лазера ставит перед необходимостью выбора между редкими высокоэнергетическими и частыми более слабыми импульсами. Например, концепция «SLR 2000» заключалась в уменьшении на несколько порядков энергии излучения каждого из зондирующих импульсов передатчика с таким же повышением частоты следования этих импульсов. В теоретическом обосновании [8] данной концепции упор делался на увеличение или сохранение средней мощности лазера по сравнению с тем же параметром хорошо зарекомендовавших себя лазерно-локационных станций, например, серии «MOBLAS».

*Альманах современной метрологии, 2016, №8*



При этом предполагалось, что наиболее важные характеристики станции, по крайней мере, не ухудшатся. В том же обосновании влияние шумов аналитически не учитывалось и вероятность ложной тревоги (принятия шума за сигнал) не рассматривалась. Анализ работы таких станций [9] позволяет выявить их относительно невысокую эффективность с точки зрения таких показателей качества, как предельная дальность действия и погрешность измерений дальности. Еще одна теоретическая модель представлена в [10]. Излагаемый расчетный метод, основанный на корпускулярном представлении оптических сигналов в пуассоновском приближении, позволяет теоретически исследовать эффекты изменения частоты лазерного зондирования и амплитудной дискриминации сигналов. В качестве примера как раз рассматривается дальномер "Сажень-ТМ", параметры которого оказываются далеки от оптимума. В последнее время названная концепция в значительной мере пересмотрена.

Современные требования предполагают обеспечение субсантиметровой точности, а это, в свою очередь, требует уменьшения длительности лазерного импульса с одновременным повышением его энергии. Кроме того, в ряде обсерваторий также используется и двухчастотная локация. Это позволяет свести к минимуму ошибки, связанные с атмосферной рефракцией. Т.к. показатель преломления в оптическом диапазоне мало зависит от влажности, то при благоприятных условиях обеспечивается относительная погрешность

$$\frac{\Delta n_g}{n_g} = 10^{-6} \dots 10^{-7},$$

где  $n_g$  – групповой показатель преломления [5]. В СВЧ диапазоне остаточная ошибка при работе на двух частотах существенно выше и достигает величин 2...3%. В цитируемом источнике для решения данной задачи также обсуждается возможность совместного использования оптических и радиочастот, т.к. при работе по трем частотам остаточная ошибка становится уже пренебрежимо малой. Однако этот вариант требует дополнительной проработки.

С другой стороны, существует ряд моделей, позволяющих в той или иной степени учесть и это обстоятельство. Например, в качестве базовых в NASA и лазерно-дальномерных программах Европейского космического агентства (ESA) используются алгоритмы Марини-Мюррея. Существует и ряд уточненных моделей, используемых в ряде специальных случаев. Например, модель [7] дает лучшее приближение в умеренных широтах в сравнении с алгоритмами Марини-Мюррея. Однако единообразие применяемой модели для всех наблюдений позволяет исключить дополнительные погрешности, связанные с неточностью различных модельных представлений и использовать все наблюдения, получаемые мировой сетью. Составляющие погрешности,

вызванные неоднородностью атмосферы при проведении различных сеансов измерений, в значительной мере компенсируются при анализе сравнительно длинных рядов наблюдений [9]. Датчики метеопараметров из комплекта КОС размещаются в стандартной метеорологической будке, расположенной на одной высоте с дальномером и отнесенной от строений, способных повлиять на результаты измерений. Проверка имеющихся средств контроля метеопараметров проводится обычным порядком.

При размещении оптических средств передачи времени на борту НКА GLONASS средств фиксации момента прихода лазерного излучения с последующим доступом к данным телеметрии открывается возможность эталонирования не только орбит, но и шкал времени с одновременным измерением дрейфа опорного генератора. В настоящее время подобный аппарат готовится к запуску и опытной эксплуатации.

Другим не менее важным применением КОС является калибровка беззапросных измерительных станций системы GLONASS. Для выполнения этих работ требуется разработка соответствующей методики, учитывающей возможность совместной обработки результатов измерений на трех частотах – двух СВЧ и одной оптической.

Работы в области непосредственной передачи времени средствами SLR, калибровки радиотехнических средств (TWSTFT, GPS, GLONASS) существенно ослабляют требования к вариантам размещения лазерно-локационной станции, но, в свою очередь, требуют наличия на станции физической шкалы времени «эталонного» качества и соответствующей метрологической проработки.

На конференции по лазерной локации (17th International Workshop on Laser Ranging, May 2011, Bad Koetzing, Germany) была заявлена программа ELT (European Laser Time) как развитие программ ISS, предполагающая размещение на орбите ансамбля атомных часов. Данная программа финансируется, к разработке методик и аппаратуры привлечен ряд известных институтов и компаний, включая Университет технологий в Мюнхене, компанию TimeTech, РТВ, обсерваторию Wetzell, обсерваторию OCA (Грасс), NASA, NIST (обсерватория Koganey) и ряд других. Со стороны России в программе участвует «ЦНИИМаш». Требования к лазерно-локационной станции включают в себя работу в однофотонном режиме и наличие часов необходимого качества.

«Конкурентные» преимущества станции «Менделеево» заключаются в том, что она базируется на эталоне времени [11] и эталоне длины с возможностью непосредственной передачи единицы [12].

Последнее обстоятельство позволяет работать в составе ГСЭД в части поддержания базиса Менделеево – Иркутск (после ввода в эксплуатацию дальномеров в Восточно-Сибирском филиале ВНИИФТРИ), а также в коопе-

рации с ОАО «НПК «СПП» получить эталонную пару спутник-станция для контроля качества лазерно-локационных станций мировой сети. В данном случае речь идет о спутниках с «нулевой» ошибкой цели. В настоящее время имеется экспериментальный спутник BLITS, отвечающий этой задаче. Результаты работы по этому спутнику, несмотря на относительно малую высоту его орбиты (~800 км) и его малые размеры (~200 мм), позволяют говорить о перспективности данного направления. Запуск подобного спутника больших размеров на средневысотную орбиту, аналогичную спутникам LAGEOS, что, наряду с повышением точности определения основных параметров (которые определяются по LAGEOS'у), позволит развить и это направление.

Главной метрологической характеристикой дальномера как измерительного преобразователя время – длина является соответствие действительного значения частоты заполнения счетчика измерителя интервалов времени из состава аппаратуры системы. Необходимо отметить, что значимыми параметрами являются как долговременная, так и кратковременная нестабильность частоты заполнения. Если долговременная стабильность частоты определяет долговременные характеристики дальномера, то кратковременная – среднее квадратическое отклонение результатов измерений за время сеанса локации космического аппарата. Непосредственное подключение данного измерителя к сигналам ГЭВЧ позволяет решить данную задачу с необходимой точностью. Более того, подключение лазерного спутникового дальномера к аппаратуре формирования шкалы времени ГНС ГЛОНАСС [10] позволит проводить работы по непосредственной калибровке беззапросных измерительных станций и контролю бортовой шкалы времени аппаратов нового поколения. Для реализации этого необходимо наличие сигналов 1 rps и эталонной частоты 10 МГц в месте размещения аппаратуры КОС, а также усилителей-распределителей эталонных сигналов и средств оцифровки шкалы времени.

Для калибровки КОС в наземных условиях необходим стабильный калибровочный базис, т.к. для прямых методов измерения наилучшим способом определения точностных характеристик является последовательное измерение одного или нескольких неизменных расстояний. Именно свойство неизменности длины базиса используется для обнаружения зависимости погрешностей дальномера от варьируемых влияющих факторов. Калибровка лазерного спутникового дальномера в наземных условиях, обеспечивающая сохранение метрологических характеристик при локации космических аппаратов, является самостоятельной научно-технической задачей.

Принимаемый полезный сигнал, отраженный от космического аппарата, представляет собой единичные фотоны, и для правильного функционирования узлов временной привязки аппаратуры измерителя интервалов времени

калибровочный сигнал должен быть ослаблен до этих же величин. Это можно осуществить путем подбора нейтральных светофильтров в оптическом тракте при использовании многоканального амплитудного анализатора, включенного в тракт приема отраженного сигнала. Кроме того, анализатор позволяет проводить точную настройку и контроль фотоприемника отраженного сигнала с целью минимизации его шумов и нестабильности времени задержки при максимально возможном при этих условиях квантовом выходе, что позволяет уменьшить как неконтролируемые систематические ошибки, так и случайные составляющие погрешности системы в целом.

Контроль линейности преобразования дальность – время необходим, в первую очередь, для минимизации мультипликативной составляющей систематической погрешности лазерного спутникового дальномера до пренебрежимо малых величин.

Предлагаемый комплекс мероприятий позволит контролировать метрологические параметры спутникового лазерного дальномера в процессе эксплуатации [8]. Таким образом, изделие «Сажень-ТМ», снабженное дополнительными техническими средствами, может являться базовой основой для создания эталона I разряда.

Примерная схема сличения КОС с эталоном длины выглядит следующим образом [3].

На калибровочную опору – базисный пункт помещается эталон-переносчик (Leica 5005), откалиброванный на эталоне длины в соответствии с действующей методикой.

В точку пересечения осей опорно-поворотного устройства КОС помещается трипель-призма из комплекта КОС.

Телескоп опорно-поворотного устройства КОС наводится на окуляр эталона переносчика.

При помощи эталона - переносчика определяется расстояние до трипель-призмы через апертуру телескопа.

Полученное значение расстояния корректируется за атмосферу в соответствии с эксплуатационными документами на эталон-переносчик.

Трипель-призма переносится на калибровочную опору – базисный пункт.

Средствами КОС измеряется дистанция до призмы.

Полученная величина корректируется за вынос призмы относительно нуль-пункта эталона-переносчика.

Полученная величина корректируется за атмосферу в соответствии с эксплуатационными документами на КОС.

Аддитивная поправка определяется как разность расстояний, полученных при помощи эталона - переносчика и КОС. Полученная поправка используется при эксплуатации КОС.

Данные измерения следует проводить не менее четырех раз в год, в условиях, характерных для каждого сезона по ГОСТ 16350-80.

### Литература

1. Carey Noll. SLR, GNSS, VLBI and DORIS Networks: ILRS+IGS+IVS+IDS. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, vol. 1, p. 190-192.
2. Luca Lusanna. The Chrono-Geometrical Structure of General Relativity and Clock Synchronization. arXiv:0708.0490v1 [gr-qc] 3 Aug 2007. Взято: <http://arxiv.org/abs/0908.0490v1>.
3. Samain E., Guillemot Ph., Exertier P., Albanese D., Berio P., Laurain O., Para F.J. Paris, Torre J.-M., Viot H., Vrancken P., Petitbon I., Leon S. Time Transfer by Laser Link - T2L2: First data. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, v. 1, p. 682-689.
4. Fumin Yang, Peicheng Huang, Zhongping Zhang, Wanzhen Chen, Haifeng Zhang, Yuanming Wang, Wendong Meng, Jie Wang, Guangnan Zou, Ying Liao, Luyuan Wang, Prochazka Ivan, You Zhao, Cunbo Fan, Xingwei Han. Preliminary Results of the Laser Time Transfer (LTT) Project. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, v. 1, p. 690-694.
5. Воробьев В.И. Оптическая локация для радиоинженеров. Под ред. проф. В.П. Васильева. – М.: Радио и связь, 1983. – 176 с.
6. Ignatenko Yu., Tryapitsyn V., Ignatenko I. Determination of Speed Aberration While Laser Location of Earth Artificial Satellites// Journal of Automation and Information Sciences, v. 36, issue 4, 2004.
7. Ignatenko Igor Yu., Ignatenko Yuriy V., Tryapitsyn Vladimir M., Makeyev Andriy A.. Measurement of Anomalous Angle of Deviation of Light During Satellite Laser Ranging. Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. October 2008, Poznań, Poland, v. 1, p. 92-96.
8. Degnan J. United Approach to Photon-Counting Microlaser Ranges, Transponder and Altimeters // Geoscience Technology Office, Code 920.3, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt.– MD 20771 USA. – 2001, p. 431-447.
9. McGarry J., Zagwodzki T. SLR2000: The Path Toward Completion, Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging. Canberra, Australia, October 2006.
10. Куракин А.Л.. Оптимизация параметров лазерных дальномеров//

- Авиакосмическое приборостроение, №6, 2009.
11. Ignatenko Igor Yu., Palchikov Vitaliy G., Zhestkov Anatoly G. New generation of the SLR station "Mendeleev". Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging. May 2011, Bad Koetzing, Germany.
  12. Ignatenko Igor Yu. Method of comparison laser locator with standard of length, Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, May 2011, Bad Koetzing, Germany.
  13. Максимцев С.А. Атмосферная поправка в результаты оптических измерений расстояний до внеатмосферных объектов. В кн.: Всесоюзное научно-практическое совещание по проблемам совершенствования аппаратных средств и таблиц для определения рефракции электромагнитных волн в атмосфере. Тезисы докладов.- Иркутск: СФ ВНИИФТРИ, 1984, с. 79 – 81.
  14. Игнатенко И.Ю., Жестков А.Г. Метрологическое обеспечение лазерно-локационных измерений/ Материалы 6-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства».- Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2012, с. 281 – 282.
  15. Жестков А.Г., Игнатенко И.Ю., Кауфман М.Б., Цыба Е.Н. Анализ систематических погрешностей нового спутникового дальномера ВНИИФТРИ «Сажень-ТМ»/ Материалы 6-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства».- Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2012, с. 283 – 285.
  16. Наумов А.В., Игнатенко И.Ю., Каган С.Н., Норец И.Б., Смирнов Ю.Ф. Формирование и передача шкалы времени в ГНС ГЛОНАСС/ Материалы 6-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства».- Менделеево: ФГУП ВНИИФТРИ, 2012, с. 290 – 293.