

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Современное состояние высокоточной лазерной дальнометрии

В.П. Васильев

Измерение расстояний с помощью лазеров (лазерная дальнометрия) в настоящее время обеспечивает миллиметровую точность на мегаметровых дистанциях, и ещё большая точность потребуется в ближайшем будущем. К числу факторов, ограничивающих точность измерений, относятся вариации показателя преломления земной атмосферы и структура отражающих целей. Кратко рассмотрены пути преодоления этих ограничений. Показан прогресс в развёртывании сети лазерной спутниковой дальнометрии, достигнутый в России за последние десятилетия, и указаны некоторые перспективы дальнейшего развития данной области.

Ключевые слова: спутниковая лазерная дальнометрия, ретрорефлекторы, ошибка цели

PACS numbers: 06.30.Bp, 42.62. – b, 91.10.Fc

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038147>

Содержание

1. Введение (790).
 2. Виды и характеристики станций лазерной дальнометрии (791).
 3. Спутники-цели (792).
 4. Перспективы развития лазерной дальнометрии (795).
 5. Заключение (796).
- Список литературы (797).

1. Введение

Высокоточная лазерная дальнометрия используется сегодня для решения огромного множества задач, но среди них неизменной актуальностью и широтой применения выделяются определение координат неподвижных точек на поверхности Земли (геодезия), а также определение мгновенных координат и параметров движения динамических объектов — навигация. В XX в. на смену механическим устройствам для таких измерений — мерным лентам, счислителям оборотов колёс — пришли устройства для измерения времени распространения электромагнитных волн разных диапазонов — радиочастотного и оптического (применительно к подземным и подводным измерениям используется также определение времени распространения акустических волн).

Оптический диапазон волн при решении таких задач имеет как преимущества, так и недостатки по сравнению с радиочастотным диапазоном: последний обеспечивает всепогодность и в ряде случаев возможность загоризонтных измерений (за счёт дифракции радиоволн), однако на точность в радиочастотном диапазоне влияют искаже-

ния электромагнитного поля местными предметами и существенное воздействие оказывают факторы окружающей среды (атмосфера, ионосфера), влияющие на скорость распространения радиочастотных колебаний.

В оптическом диапазоне эти снижающие точность измерения факторы оказываются меньше, но возрастают потери в воздушной среде (особенно за счёт рассеяния в аэрозолях [1]¹ и влияния фона солнечного излучения, нередко создающего сильные помехи проведению измерений).

Поэтому наиболее разумно сочетание средств обоих диапазонов, причём оптические средства — сегодня это в основном лазерная дальнометрия — служат эталоном для калибровки и сверки радиотехнических систем.

В середине XX в. высокоточная дальнометрия, основанная на измерении времени распространения электромагнитных волн, использовалась преимущественно для наземных геодезических работ, а поскольку при таких работах требования к точности обычно преобладали над требованиями к оперативности (за исключением военных применений), оптические (с начала 1960-х годов — лазерные) дальнометры получили преимущественное распространение. Измеряемые дальности в ходе таких работ обычно не превышали нескольких десятков километров, и среди применяемых методов предпочтение отдавалось фазовой дальнометрии (измерению сдвига фаз модулирующего сигнала, налагаемого на распространяющийся световой пучок).

Сейчас благодаря развитию космических навигационно-геодезических систем наземные координатные сети стали строиться с их помощью, и применяемая для этого лазерная дальнометрия получила название спутниковой лазерной дальнометрии (Satellite Laser Ranging —

В.П. Васильев. Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения",
ул. Авиамоторная 53, 111024 Москва, Российская Федерация
E-mail: tkuzmina@nprk-spp.ru

Статья поступила 25 мая 2017 г.

¹ При распространении в водной среде (особенно в сине-зелёной области видимого спектра) потери в оптическом диапазоне, наоборот, оказываются меньше, чем в радиочастотном [2], благодаря чему оптическая дальнометрия (как и передача информации) находит применение при подводных работах.



Рис. 1. Спутниковые лазерные дальномеры серии "Сажень-Т", предназначенные для второго поколения космических аппаратов ГЛОНАСС-М. (а) SLR-станция в Щёлково, введённая в строй в 2000 г. (б) Квантово-оптическая система Алтайского оптико-лазерного центра, введённая в строй в 2006 г. (в) Телескоп траекторных измерений Алтайского оптико-лазерного центра. (г) Передислоцируемая SLR-станция "Сажень-ТОС", введённая в строй в 2006 г., на космодроме Байконур.

SLR). Так как повсеместно распространяющаяся спутниковая навигация опирается на геодезию, требования к точности навигационно-геодезических систем быстро возрастают, и особенно жёсткие требования предъявляются к лазерной дальнометрии, служащей эталонным и калибровочным средством для этих систем.

Если в 1960–1970-е годы достаточно малой считалась погрешность измерений дальности порядка нескольких дециметров, то с 2000-х годов поднимается вопрос о достижении точности ± 1 мм.

Для решения этих проблем в глобальном масштабе создана Международная служба лазерной дальнометрии (International Laser Ranging Service — ILRS) [3]; с начала 1990-х годов Российская Федерация стала её членом. В настоящее время под эгидой ILRS работает свыше 50 измерительных станций по всему миру и ещё несколько десятков станций находится в стадии сооружения или реконструкции.

Следует заметить, что эта измерительная сеть для её оптимизации должна быть по возможности равномерно распределена по поверхности Земного шара, и ещё в 1990-е годы у международного SLR-сообщества имелись претензии: территория самой большой в мире страны — России — была очень слабо оснащена SLR-станциями (у нас их принято называть квантово-оптическими станциями — КОС); однако сегодня мы в этом отношении вышли на передовые позиции — на российской территории имеется 20 действующих станций, а к 2020 г. их будет 29, кроме того, мы вносим вклад в сгущение SLR-сети Южного полушария, оснащённого пока слабее Северного (две наши станции — в Бразилии и ЮАР — уже успешно функционируют).

Изменяются и сами SLR-станции — они стали компактнее, но при этом точнее прежних. Если в начале 1970-х годов наши первые лазерные станции имели оп-

тические приборы на основе полутораметровых прожекторных зеркал (лазерный локатор СКОЛ-2 имел четыре зеркала на общем опорно-поворотном устройстве), то выпускаемая в последние годы серийно лазерная станция "Сажень-ТМ" имеет сдвоенную оптическую систему с диаметром зеркал 25 см, обеспечивая при этом такую же дальность действия и на порядок лучшую точность измерения.

2. Виды и характеристики станций лазерной дальнометрии

Виды изготавливаемых на нашем предприятии — Научно-производственной корпорации "Системы прецизионного приборостроения" (НПК СПП) — лазерных дальнометрических станций, действующих в настоящее время, представлены на рис. 1 и 2, а их расположение на территории России и ближайших к ней стран показано на рис. 3.

Достижимая сейчас в мировой практике (в том числе и у нас) точность измерения составляет около 0,5 см и ограничивается, как было констатировано в 2005 г. на специальном международном совещании в г. Истборне (Великобритания), имевшем в названии подзаголовок "Towards 1-mm accuracy" [4] ("Путь к точности 1 мм"), в основном двумя факторами, а именно: трудностью точного учёта показателя преломления атмосферного воздуха на пути распространения лазерного луча и так называемой ошибкой цели, о чём следует сказать несколько подробнее.

Показатель преломления воздуха вблизи поверхности Земли составляет $\sim 1,0003$ [5] и в общей сложности вносит задержку времени распространения сигнала в пересчёте на дальность от ~ 3 м до ~ 10 м в зависимости от "угла места" (наклона линии визирования по отноше-

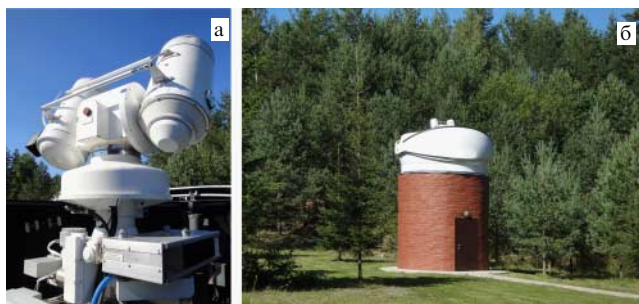


Рис. 2. Серийная малогабаритная SLR-станция "Сажень-ТМ" (разработка 2005 г.), в которой реализован метод высокочастотной лазерной дальнометрии: (а) общий вид станции, (б) "Сажень-ТМ" в укрытии (Ленинградская обл., Светлое). Частота повторений импульсов 300 Гц, мощность 0,75 Вт. Дальность: высота орбит до 23000 км, длительность лазерного импульса 200 пс, среднеквадратичное отклонение (СКО) в стандартных принимаемых импульсах (в "нормальной точке" (normal point)) 3–8 мм. Угловые координаты: видимая звёздная величина не менее 12^м, СКО измерений 1–2 угл. с, угловая скорость до 49 угл. с. Фотометрия: видимая звёздная величина не слабее 11^м, СКО фотометрии не более 2^м.

нию к плоскости горизонта); работа при малых углах места, при которых задержка превышает 10 м, вообще нежелательна. Показатель преломления воздуха зависит от его температуры, давления и влажности, а измеряются эти факторы лишь в точке расположения станции. Учесть все нюансы распределения указанных параметров вдоль трассы луча с помощью модели атмосферы удастся пока в лучшем случае с погрешностью в несколько миллиметров (в пересчёте на дальность), хотя исследование и учёт местных условий в сочетании с совершенствованием общей модели атмосферы позволяют постепенно повышать эту точность.

Теоретически существует следующий путь решения данной проблемы: одновременное измерение дальности на двух сильно разнесённых длинах волн лазерного излучения (например, в видимом и инфракрасном диапазонах спектра) с использованием уравнения дисперсии — зависимости показателя преломления от длины волны — в принципе позволяет получить значение задержки сигнала в атмосфере, не прибегая к измерению температуры, давления и влажности воздуха вдоль трассы; однако было показано, что для достижения таким способом погрешности 1 мм в измеряемой дальности надо измерять разность времени распространения этих двух длин волн с точностью, лучшей чем $\pm 0,5$ пс [5] (т.е. $\pm 0,07$ мм в пересчёте на дальность), чего пока не удастся осуществить по ряду технических причин.

3. Спутники-цели

Другой серьёзный ограничитель точности — ошибка цели — обусловлен тем, что почти все спутники-цели для высокоточных геодезических и геофизических измерений представляют собой металлические шары, на поверхности которых установлено множество ретро-рефлекторов — уголковых отражателей из кварцевого стекла (кстати, большинство таких спутников-целей и отражателей для них изготовлено в НПК СПП) (табл. 1 и рис. 4). Эти сферические конструкции имеют диаметр от 0,23 до 2,15 м, а число уголковых отражателей на каждой из них составляет от 20 до 2142.

Вследствие одновременного отражения лазерного импульса от нескольких ретро-рефлекторов, находящихся на разных удалениях от станции, и из-за неизбежного разброса величин эффективной отражающей поверхности этих ретро-рефлекторов возникает погрешность, достигающая для крупных сферических



Рис. 3. (В цвете онлайн.) Российская сеть лазерных станций дальнометрии.

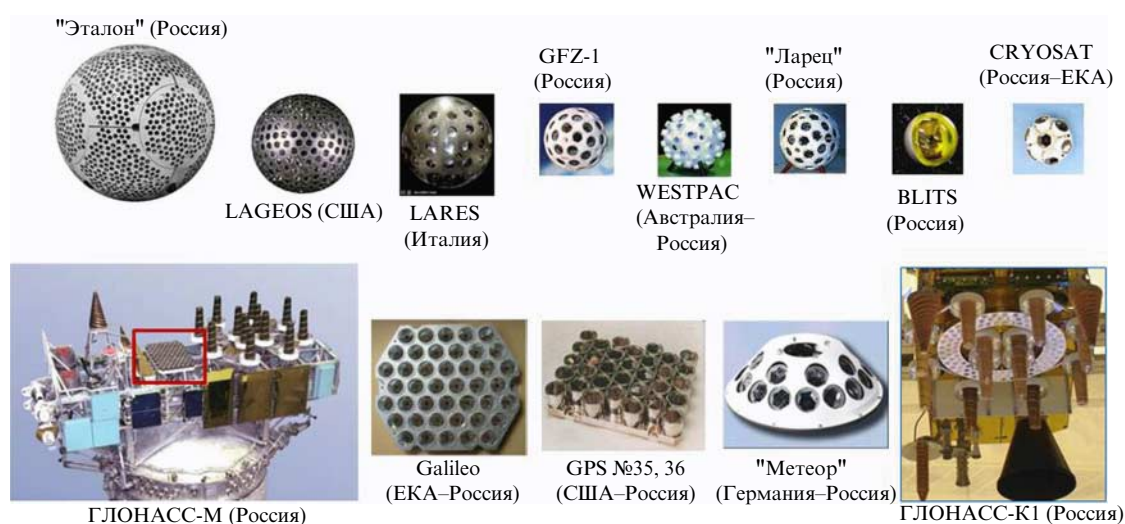


Рис. 4. Отечественные и зарубежные ретрорефлекторные системы и спутники.

Таблица 1. Лазерные ретрорефлекторные системы, созданные НПК СПП для российских космических аппаратов*

Тип космического аппарата (КА)	Высота орбиты, км	Год запуска	Число КА	Количество светоотражателей на КА	Размер системы ретрорефлектора, мм
"Салют-4"	350	1975	1	42	184 × 168 × 47
"Цикада-11, -13"	1000	1976	2	280	235 × 145 × 110
"Метеор-1"	950	1976	2	70	∅ 585 × 210
"Молния-1С"	36000	1974	1	70	504 × 318 × 510
"Радуга"	36000	1976	2	50	306 × 255 × 248
ГЕО-ИК	1500	с 1981 по 1990	11	692	∅ ₁ 1960 – ∅ ₂ 1410 (кольцевая зона)
ГЛОНАСС	19100	с 1981 по 2000	> 50	396	1330 × 1010
"Эталон-1, -2"	19100	1989	2	2142	∅ 1294
"Ресурс-0"	620	1992	1	2	200 × 160 × 90
"Метеор-2"	950	1993	1	3	196 × 66 × 96
"Метеор-3" **	1200	1994	1	24	∅ 280 × 100
"Зея"	475	1997	1	20	∅ 968
ГЛОНАСС	19100	с 2000 по 2005	11	132	∅ ₁ 660 × ∅ ₂ 380
"Метеор-3М-1"	1020	2002	1	1 сфера ∅ 60 мм	∅ 88 × 64
"Ларец"	690	2003	1	60	∅ 215
"Можаец"	690	2003	1	6	∅ 115 × 46
ГЛОНАСС-М	19100	с 2003 по настоящее время	45	112	511 × 311
BLITS 2009	832	2009	1	Автономная сфера	∅ 170
ГЕО-ИК-2	1000	2011, неудачный запуск	1	30	∅ 300 × 96,5
"Спектр-Р"	Эллиптическая (апогей до 350000)	2011	1	100	500 × 406 × 80
ГЛОНАСС-К	19100	2011	1	123	∅ ₁ 626 × ∅ ₂ 340 (кольцевая зона)

* Всего оборудовано лазерными ретрорефлекторами 148 космических аппаратов.
 ** Россия – Германия.

спутников-целей нескольких сантиметров (рис. 5 и табл. 2).

Ещё в 1990-е годы для решения специфических высокоточных задач геодинамики (в частности, для япон-

ского проекта Keystone по предсказанию землетрясений и цунами на основе наблюдения малых подвижек земной коры) в НПК СПП была создана специальная SLR-цель WESTPAC (Western Pacific Satellite) (см. рис. 4), на ко-

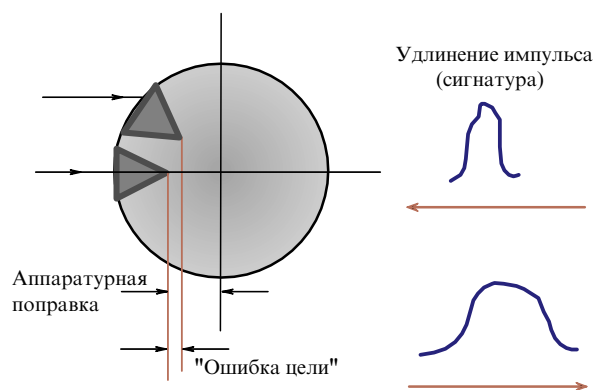


Рис. 5. Схема образования ошибки цели.

Таблица 2. Параметры ретрорефлекторных систем

Ретрорефлекторная система	Высота орбиты, км	Ошибка цели*, мм	Удлинение импульса (сигнатура)*
Ajisaï (Япония)	1400	50	Есть
"Эталон"	19100	40	Есть
ГЛОНАСС	19100	25	Есть
LAGEOS (США)	5800	10	Есть
"Ларец"	690	2,0	Есть
WESTPAC	835	0,5	Нет
"Блиц"	835	0,1–0,3	Нет

* См. рис. 5.

торой в каждый момент времени лазерный сигнал отражается только от одного ретрорефлектора, что достигается ограничением его углового поля специальными блендами. Это позволило снизить среднюю величину ошибки цели для данного спутника до $\pm 0,5$ мм, но вызвало некоторые трудности при его наблюдении: между сериями отражений от разных ретрорефлекторов возникали перерывы, а усреднение результатов измерений с помощью закрутки спутника вокруг своей оси при его запуске на орбиту постепенно ухудшалось из-за торможения этого вращения вихревыми токами, возникающими в металлическом корпусе спутника при его движении в магнитном поле Земли (кстати, этот недостаток в определённой мере присущ всем металлическим сферическим спутникам-целям).

Для радикального преодоления трудностей, связанных с ошибкой цели, нами был предложен, изготовлен и

выведен в космос спутник-цель совершенно нового типа — BLITS (Ball Lens In The Space), представляющий собой стеклянный шар с использованием принципа линзы Лüneберга [6, 7], позволяющего фокусировать падающий на такую линзу пучок излучения с плоским волновым фронтом на противоположной поверхности линзы (рис. 6). Нанеся на половину сферы отражающее покрытие и придав сферической линзе вращение вокруг оси, лежащей в плоскости раздела между отражающей и прозрачной поверхностями, можно получить отражённый сигнал в виде периодически повторяющихся серий отражённых импульсов, причём такой спутник не имеет металлических частей, в которых могут возникать вихревые токи, и его вращение вокруг оси закрутки остаётся неизменным за всё время его службы в космосе.

Такой спутник практически представляет собой "точечную" цель, не вызывающую искажения формы отражённого импульса и колебаний положения эффективной точки отражения относительно центра массы спутника. Вызываемая температурными изменениями показателя преломления стекла погрешность в измерении дальности не превышает 0,1 мм.

Этот выведенный на круговую орбиту высотой 835 км спутник, успешно наблюдавшийся всеми станциями международной SLR-сети с конца 2009 г. до начала 2013 г., послужил прототипом для нового спутника BLITS-M с несколько большими размером и массой, который в настоящее время подготавливается к запуску на орбиту высотой ~ 1500 км, где влияние атмосферы на стабильность орбиты почти отсутствует, что позволит эффективно использовать этот космический аппарат для геофизических исследований и геодезических измерений с точностью, достижение которой ранее было затруднительным.

Важным дополнением к рассмотренным выше дальномерным системам является разработанная в последнее время "беззапросная" квантово-оптическая система (БКОС) [8], предназначенная для передачи лазерного импульса с наземной станции на бортовые приёмники космических аппаратов Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) и привязки принятых этим приёмником импульсов к бортовой шкале времени соответствующего космического аппарата (рис. 7). Это позволяет, используя привязку высокоточных "часов" наземной лазерной станции к этому времени, производить сверку бортовых шкал времени аппаратов ГЛОНАСС с наземным эталоном, обеспечивая благодаря малым погрешностям лазерной линии значитель-

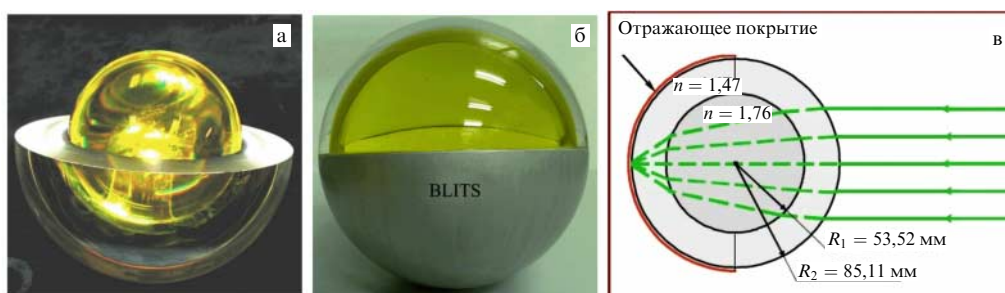


Рис. 6. Сферический стеклянный спутник BLITS: (а) в разобранном виде; (б) лётный образец; (в) схема устройства. Основные параметры BLITS (BLITS-M): диаметр 170 мм (220 мм), масса 7,5 кг (17 кг), высота орбиты 835 км (1500 км), эффективная поверхность рассеяния 10^5 м² (10^6 м²), ошибка цели 100 мкм (100 мкм).

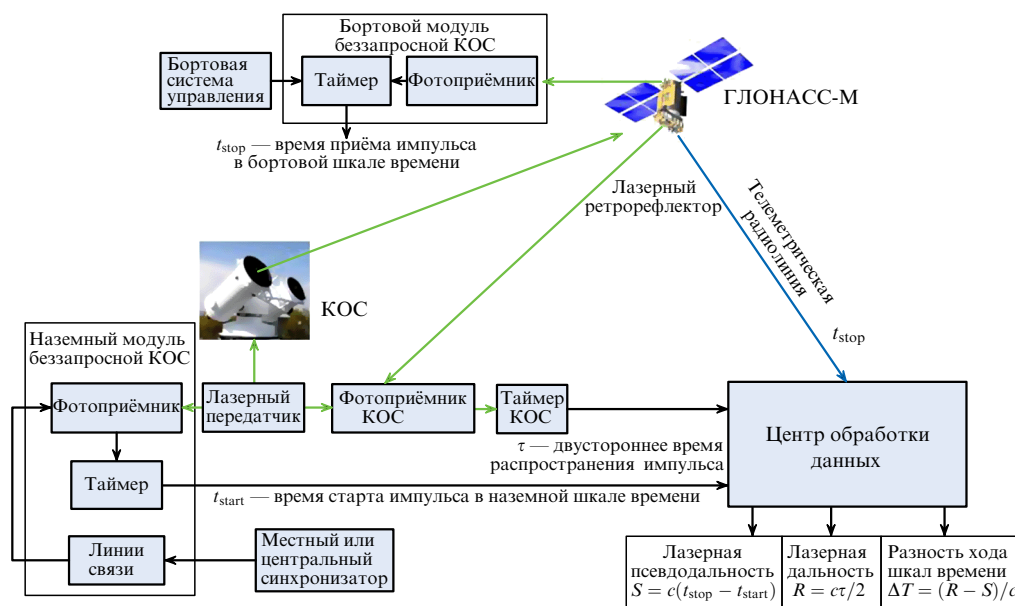


Рис. 7. Использование беззапросной КОС в целях определения расхождения бортовой и наземной шкал времени.

ное повышение точности синхронизации бортового времени ГЛОНАСС и соответствующее повышение точности навигационно-геодезических определений с помощью этой глобальной космической системы.

Оснащение в ближайшей перспективе всех новых наземных лазерных станций указанной системой ввиду широкого охвата сетью таких станций территории Земного шара обеспечит в дальнейшем значительное повышение точностных характеристик системы ГЛОНАСС и даст ей в этом отношении преимущество перед другими глобальными спутниковыми навигационно-геодезическими системами. В ещё большей степени этому будет способствовать оснащение всех космических аппаратов новых модификаций лазерными линиями межспутниковой лазерной навигационно-связной системы (МЛНСС) для быстрого многократного обмена данными о расхождении шкал времени на этих аппаратах (рис. 8). Аппаратура линий МЛНСС, по существу, представляет собой сочетание беззапросного дальномера и низкоинформативной линии связи.

4. Перспективы развития лазерной дальнометрии

Каковы же дальнейшие перспективы развития высокоточной лазерной спутниковой дальнометрии после оснащения измерительной сети новыми, содержащими систему БКОС, подготовленными к серийному производству станциями типа "Сажень-К" и "Сажень-Л" (рис. 9) [9], обладающими возможностью достижения аппаратурной погрешности 1–2 мм, и после существенного расширения сети точных станций? Что задумано, запланировано и может быть реализовано в ближайшие годы на нашем предприятии?

Прежде всего, предусмотрен ввод в строй второй очереди Алтайского оптико-лазерного центра² с телескопом диаметром 3,12 м (рис. 10) и лазерным дальнометром.

² Первая очередь этого измерительного и исследовательского центра функционирует уже более 15 лет.



Рис. 8. Межспутниковая лазерная навигационно-связная система Терминал МЛНСС для ГЛОНАСС-М № 752, 753.

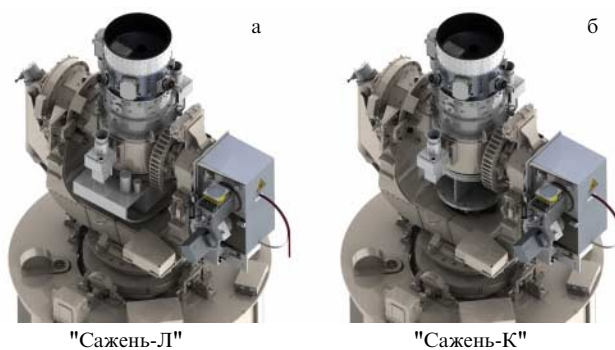


Рис. 9. Лазерные системы прецизионной точности для измерения дальности и передачи времени: (а) КОС "Сажень-Л", (б) КОС "Сажень-К".



Рис. 10. Общий вид строительства второй очереди Алтайского оптико-лазерного центра с телескопом ТИ (телескоп информационный) с диаметром зеркала 3,12 м.

мером, который будет способен эффективно измерять с миллиметровой точностью расстояния до ретрорефлекторов, установленных на Луне.

Здесь надо отметить, что уже в течение последних трёх лет мы проводили измерения на дальностях, сравнимых с расстоянием до Луны, — имеется в виду работа по ретрорефлекторной панели, установленной на космическом аппарате "Радиоастрон" с вытянутой эллиптической орбитой с апогеем почти 350 тыс. км. Однако точность используемой при этом дальномерной аппаратуры — около 1 дм, чего вполне достаточно для решения задач данной космической миссии, но недостаточно для решения фундаментальных задач, связанных с исследованиями Луны и системы Земля–Луна (здесь уместно упомянуть, что наша земная геодезия и навигация осуществляются в системе, положение центра тяжести которой находится в связанной системе Земля–Луна, и даже "земная твердь" колеблется в зависимости от положения Луны, не говоря уже об уровнях океанских вод).

В настоящее время лунной лазерной дальнометрией (Lunar Laser Ranging — LLR) занимаются всего три станции (две в США и одна во Франции), имеющие соответствующее оборудование — мощные короткоимпульсные лазерные передатчики и большие приёмные телескопы. В ближайшем будущем к ним присоединится и наша станция на Алтае; эта работа по времени увязана с новыми космическими миссиями, в ходе которых на Луну будут доставлены новые ретрорефлекторные системы, в том числе создаваемые на нашем предприятии.

Сейчас в трёх точках на Луне имеются ретрорефлекторные панели, доставленные туда астронавтами миссий Apollo-11, Apollo-14 и Apollo-15, а ещё в двух точках — меньшие по размерам панели, установленные на советских аппаратах "Луноход-1" и "Луноход-2". Но все эти системы были доставлены на Луну более 40 лет назад и их эффективность снизилась по естественным причинам (из-за запыления и эрозии поверхности, а возможно, и радиационной деградации).

5. Заключение

В завершение хотелось бы поделиться некоторыми взглядами на будущее лазерных дальномерных станций и сетей.

Сегодня созрели и получили экспериментальную апробацию технологии, позволяющие создать портативные дальномерные системы с такими же (и даже лучшими) точностными и дальностными характеристиками, как у ныне действующих и создаваемых стационарных систем. Вместо куполов и других стационарных сооружений для таких станций будет достаточно кожуха или чехла, как у переносных геодезических приборов, что создаст новые условия для развития измерительных сетей.

При этом затраты времени на выполнение точных измерений с помощью таких станций будут резко сокращены благодаря высокой частоте повторения лазерных импульсов и, соответственно, увеличению средней мощности излучения, что позволит значительно повысить их информационную производительность, а это весьма важно ввиду быстрого роста числа космических аппаратов-целей, оснащённых ретрорефлекторами.

Расширение сети наземных лазерных станций, наряду с возникающими благодаря этому новыми возможностями, создаёт или, вернее, обостряет некоторые проблемы, связанные, в частности, с безопасностью их эксплуатации.

Дело в том, что использование в настоящее время для измерений видимого диапазона излучения (подавляющее большинство станций использует лазеры с длиной волны излучения 532 нм — зелёный свет) при значительной мощности лазерных передатчиков, необходимой для обеспечения измерений при больших дальностях, создаёт опасность повреждения глаз людей, случайно попавших в пределы пучка излучений либо в зону отражения от оказавшихся в пределах пучка зеркальных поверхностей. Для предотвращения таких ситуаций станции оснащаются системами предупреждения о движении летательных аппаратов, пилоты и/или пассажиры которых могут пострадать от лазерных излучений, а также вводится запрет на работу при малых углах места, когда почти параллельный поверхности земли пучок излучения может попасть в окна наземных сооружений либо в глаза людей, находящихся на возвышенностях. При расширении сети станций вероятность таких опасных ситуаций возрастает.

В связи с этим прорабатывается вопрос о переводе лазерных станций в "безопасный" инфракрасный диапазон: при длине волны более 1,3 мкм излучение не проходит через толщу глазного яблока (стекловидное тело) и не достигает сетчатки, содержащей уязвимые чувствительные элементы глаза [10]. Наиболее перспективным представляется переход к длине волны $\sim 1,55$ мкм, которую можно эффективно генерировать и для которой созданы высокочувствительные и быстродействующие приёмники. Такой переход будет способствовать созданию "поколения безопасных станций", что в свою очередь будет способствовать расширению измерительной сети.

Оснащение лазерных станций передатчиками с длиной волны излучения $\sim 1,55$ мкм одновременно с сохранением передатчиков видимого диапазона позволит в перспективе применить упомянутый выше "рефрактометрический" метод учёта задержки излучения в атмосфере с использованием дисперсионного уравнения, если обеспечить одновременное измерение при двух длинах волн (например, 0,53 и 1,55 мкм). Сейчас уже появились приёмники, способные эффективно работать на этих

длинах волн без необходимости использования разных детекторов, что позволяет унифицировать оптический тракт такого дальномера и облегчает достижение высочайшей точности определения разности времён прихода принимаемых импульсов с этими длинами волн, устраняя таким образом ещё одну (последнюю?) трудность на пути к достижению субмиллиметровой точности лазерной спутниковой дальнометрии.

Дальнейшим большим шагом на этом пути, по убеждению автора настоящей статьи, станет "пересадка" измерительных средств (лазерных дальномерных станций) с Земли на борт космического аппарата, так что на поверхности Земли надо будет устанавливать лишь ретрорефлекторы и небольшие лазерные маяки для упрощения наведения бортового дальномера на наземную станцию. Бортовая лазерная станция будет, конечно, обслуживать не только наземные пункты, но и космические аппараты с ретрорефлекторами, причём это будет происходить без перебоев, обусловленных метеорологической обстановкой.

Заметим, что мгновенные координаты бортовой измерительной станции, расположенной на достаточно высокой орбите, могут определяться с очень высокой точностью (уже сейчас координаты наземных лазерных станций определяются привязкой к космическим аппаратам типа LAGEOS (LASer GEOdynamics Satellite) с высотой орбиты около 6000 км)³.

³ Интересно, что установка дальномерной аппаратуры на борту космического аппарата позволит, кроме того, значительно повысить энергетический бюджет измерительной линии за счёт уменьшения расходимости лазерного пучка, чему не будет препятствовать атмосферная турбулентность вблизи наземной лазерной станции, а также повысить эффективность наземных ретрорефлекторных систем благодаря стабилизации условий их работы. На земле ретрорефлекторы проще защитить от воздействия солнечного излучения и тем самым избежать ухудшения отражательных характеристик из-за температурных градиентов и т.п., а поскольку размер апертуры отражателей, как правило, меньше размера области когерентности турбулентной атмосферы ("диаметр Фрида" [11]), линейное обращение волнового фронта при отражении и "замороженность" атмосферной турбулентности за время распространения импульса через атмосферу и обратно обеспечат отсутствие флуктуаций и деградации отражённых пучков.

Резкое упрощение, миниатюризация и удешевление наземных станций при таком подходе позволят осуществить быстрое сгущение наземной сети, заполнение такими пунктами труднодоступных районов (в которых сложно разместить активные лазерные станции с их инфраструктурой) и в конечном счёте резко повысить эффективность сети высокоточной лазерной дальнометрии.

К сожалению, в небольшой статье нет возможности даже кратко упомянуть о других многочисленных применениях высокоточной лазерной дальнометрии — от решения важнейших задач фундаментальной науки до разнообразных практических устройств, в том числе бытового назначения.

Список литературы

1. Миронов В Л *Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере* (Новосибирск: Наука, 1981)
2. Показеев К В, Чаплина Т О, Чашечкин Ю Д *Оптика океана* (М.: МАКС Пресс, 2010)
3. Intern. Laser Ranging Service, <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov>
4. *ILRS Technical Workshop on Laser Ranging. Towards 1-mm accuracy, October 3–7, 2005, Eastbourne, UK, 2005*
5. Kaye G W, Laby T H *Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions* (London: Longmans, 1948); Кэй Дж, Лэби Т *Таблицы физических и химических постоянных* (М.: Физматгиз, 1962)
6. Vasiliev V et al., in *11th Intern. Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 1998*
7. Shargorodsky V D, Vasiliev V P, Parkhomenko N N "BLITS: The first autonomous zero-signature satellite in orbit", in *17th Intern. Workshop on Laser Ranging, Bad Koetzing, Germany, 2011*
8. Pasinkov V V et al., in *18th Intern. Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan, 2013*
9. Sadovnikov M, in *19th Intern. Workshop on Laser Ranging, Annapolis, MD, USA, 2014*
10. ANSI Z 136.1– Safe Use of Lasers (Standard), Laser Institute of America, 2007
11. Fried D L *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1372 (1966)

Current state of high-accuracy laser ranging

V.P. Vasiliev

*Scientific and Production Corporation "Precision Instrument-Making Systems",
ul. Aviamotornaya 53, 111024 Moscow, Russian Federation
E-mail: tkuzmina@nppk-spp.ru*

While laser distance measurement (laser ranging) currently provides millimeter accuracy at megameter scales, still higher accuracy will be required in the near future. Factors limiting the accuracy are variations in the Earth atmosphere index of refraction and the structure of light-reflecting targets. This paper briefly outlines ways to overcome these limitations and reviews the progress in deploying Russia's satellite laser ranging network over the last decades. Some prospects for further progress in this field are also discussed.

Keywords: satellite laser ranging, retroreflectors, target error

PACS numbers: 06.30.Bp, **42.62.–b**, 91.10.Fc

Bibliography — 11 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (7) 790–797 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038147>

Received 25 May 2017

Physics – Uspekhi **61** (7) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038147>