



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ СПУТНИКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В РОССИИ

В.П.Васильев, д.т.н., В.Д.Шаргородский, д.т.н.,
Научно-производственная корпорация
"Системы прецизионного приборостроения"
(АО "НПК "СПП"), www.npk-spp.ru

Лазерная дальнометрия служит эталоном для калибровки и сверки радиотехнических систем, синхронизации бортового времени ГЛОНАСС. Высокоточная лазерная дальнометрия используется сегодня для решения огромного множества задач, но среди них своей неизменной актуальностью и широтой применения выделяется определение координат неподвижных точек на поверхности Земли (геодезия), а также определение мгновенных координат и параметров движения динамических объектов – навигация.

В XX веке на смену механическим устройствам для геодезических измерений – мерным лентам, счислителям оборотов колес – 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 свои преимущества и недостатки по сравнению с радиочастотным диапазоном: последний обеспечивает всепогодность и в ряде случаев возможность загоризонтных измерений (за счет дифракции радиоволн). Однако на точность в радиочастотном диапазоне влияют искажения 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 оказывают меньшее влияние. Зато возрастают потери в воздушной

CURRENT STATE OF HIGH-PRECISION SATELLITE LASER DISTANCE MEASUREMENT IN RUSSIA

V.P.Vasilyev, *Doc.of Tech. Sc.*, V.D.Shargorodsky,
Doc.of Tech. Sc., Scientific and production
corporation "Systems of precision instrument making"
(JSC NPK SPP), www.npk-spp.ru

Laser distance measurement serves as a standard for calibration and verification of radio engineering systems, makes a check of onboard time scales of GLONASS devices with a terrestrial standard. The high-precision laser distance measurement is used for the solution of a huge set of tasks today, but among them the invariable relevance and width of application distinguishes determination of coordinates of motionless points on the Earth's surface (geodesy) and also determination of instant coordinates and parameters of the movement of dynamic objects – navigation.

In the XX century to replace mechanical devices for such measurements – to measured tapes, numerator turns of wheels – devices for measurement of time distribution of electromagnetic waves of different ranges – radio-frequency and optical have come (applicable to underground and underwater measurements also definition of time distribution of acoustic waves is used).

Optical wave band at the solution of such tasks has the advantages and shortcomings in comparison with radio-frequency range: the last provides all-weather capability and in some cases a possibility of over-the-horizon measurements (due to diffraction of radio waves), however accuracy in the radio-frequency range is influenced by distortions of the electromagnetic field by local objects and environment factors (the atmosphere, ionospheres) influencing the speed of distribution of radio-frequency fluctuations make essential impact.

In the optical range these factors reducing the accuracy of measurement appear less, but losses increase in the air environment (especially due to dispersion in aerosols [1]* and influence of

* At distribution in the water environment (especially in blue-green area of a visible range) losses in the optical range, on the



среде (особенно за счет рассеяния в аэрозолях [1]^{*}) и возмущается влияние фона солнечного излучения, создающего нередко сильные помехи проведению измерений.

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

В середине XX века высокоточная дальнометрия, основанная на измерении времени распространения электромагнитных волн, использовалась преимущественно для наземных геодезических работ. Поскольку при таких работах требования к точности обычно превалировали над требованиями к оперативности (за исключением военных применений), то оптические (с начала 60-х годов – лазерные) дальнометры получили преимущественное распространение. Измеряемые дальности в ходе таких работ обычно не превышают 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 (SLR – satellite laser ranging). Так как повсеместно распространяющаяся спутниковая навигация опирается на геодезию, требования к точности навигационно-геодезических систем быстро возрастают. Особенно жесткие требования предъявляются к лазерной дальнометрии, служащей эталонным и калибровочным средством для этих систем.

Если в 60-е и 70-е годы достаточно малой считалась погрешность измерений дальности порядка единиц дециметров, то с 2000-х годов поднимается вопрос по достижению точности ± 1 мм.

Для решения этих проблем в глобальном масштабе создана Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS – International Laser Ranging Service) [3]; с начала 90-х годов Российская Федерация стала ее членом. Под эгидой ILRS работают в настоя-

а background of the sunlight creating quite often strong hindrances to carrying out measurements.

Therefore the combination of means of both ranges, and optical means is the most reasonable – today it is generally a laser distance measurement – serve as a standard for calibration and verification of radio engineering systems.

In the middle of the XX century the high-precision distance measurement based on measurement of time of distribution of electromagnetic waves was used mainly for land geodetic works and as during such works of the requirement to accuracy usually prevailed over requirements to efficiency (except for military applications), optical (since the beginning of the 60th years – laser) range finders have gained primary distribution. The measured ranges during such works usually don't exceed several tens kilometers, and among the applied methods preference was given to a phase distance measurement (measurement of shift phases of the modulating signal imposed on the extending light bunch).

Nowadays, thanks to development of space navigation and geodetic systems, land coordinate networks began to be under construction with their help, and the laser distance measurement applied for this purpose has received the name of a satellite laser distance measurement (SLR – satellite laser ranging). As everywhere the extending satellite navigation relies on geodesy, requirements to the accuracy of navigation and geodetic systems quickly increase, and especially strict requirements are imposed to the laser distance measurement serving as reference and calibration means for these systems.

If in 60th and 70th as rather small was considered an error of range measurements of decimeter order units, then from 2000th years the question on reaching the accuracy of ± 1 mm is brought up.

For the solution of these problems the International service of a laser distance measurement (ILRS – International Laser Ranging Service) [3]; since the beginning of the 90th years the Russian Federation became its member. Under the auspices of ILRS over 50 measuring stations on all to the world work now, and some more dozens of stations are in a stage of a construction or reconstruction.

It is necessary to notice that for optimization of this measuring network it has to be whenever possible evenly distributed on the surface of the globe, and in the 90th years the international SLR

contrary, turn out less, than in radio-frequency [2] thanks to what the optical distance measurement (as well as information transfer) finds application during the underwater works.

* При распространении в водной среде (особенно в синезеленой 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" в интересах второго поколения КА "Глонасс-М": а – SLR станция в Щелково, введена в 2000 году; б – Квантово-оптическая система Алтайского оптико-лазерного центра, введена в 2006 году; с – Телескоп траекторных измерений Алтайского оптико-лазерного центра; д – Космодром Байконур, SLR станция "Сажень-ТОС", введена в 2006 году, передислоцируемая станция

Fig. 1. Satellite laser range finders of the "Sazhen-t" series for the benefit of the second generation of KA of "Glonass-M": a – the SLR station in Shcholkovo, established in 2000; b – the Quantum and optical system of the Altai optiko-laser center, established in 2006; c – the Telescope of trajectory measurements of the Altai optiko-laser center; d – Baikonur Cosmodrome, SLR the Sazhen-TOS station, established in 2006, the redeployed station

щее время свыше 50 измерительных станций по всему миру, и еще несколько десятков станций находятся в стадии сооружения или реконструкции.

Следует заметить, что для оптимизации этой измерительной сети она должна быть по возможности равномерно распределена по поверхности земного шара. Еще в 90-е годы международное SLR-сообщество предъявляло к России претензии: территория самой большой в мире страны была очень слабо оснащена SLR-станциями (у нас их принято называть квантово-оптическими станциями – КОС). Сегодня мы в этом отношении вышли на передовые позиции – на российской территории 20 действующих станций, а к 2020 году их будет 29, и к тому же мы вносим вклад в сгущение SLR-сети южного полушария, оснащенного пока слабее северного (две наших станции – в Бразилии и ЮАР – уже успешно функционируют).

Изменяются и сами SLR-станции – они стали компактнее, но при этом точнее прежних. Если в начале

community had claims: the territory of the biggest country in the world – Russia – has been very poorly equipped with SLR stations (at us it is accepted to call them quantum and optical stations – QOS); today we in this regard came to the advanced positions – in the Russian territory of 20 operating stations, and by the year 2020 will be 29, and besides we make a contribution to condensation of SLR network of the southern hemisphere equipped still more weakly than northern (two of our stations – in Brazil and the Republic of South Africa – already successfully function).

Also SLR stations change – they became more compact, but at the same time more precisely than former. If in the early seventies our first laser stations had optics on the basis of one-and-a-half-meter projector mirrors (the laser locator of SKOL-2 had 4 such mirrors on the general basic and rotary device), then the laser station "Sazhen-TM" produced in recent years has dual optical system with a diameter of mirrors of 25 cm, providing at the same time the same range and much the best accuracy of measurement.

Types of made at our enterprise and acting now laser stadiametric stations are shown in fig. 1 and 2, and their arrangement in the territory of Russia and the next to it countries – in fig. 3.

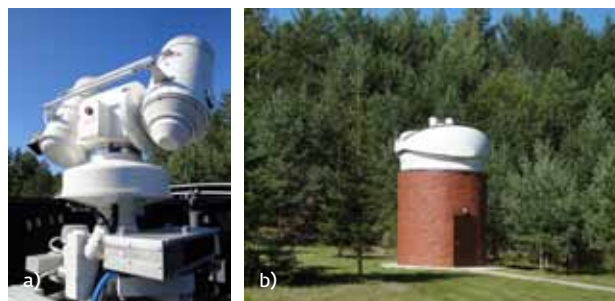
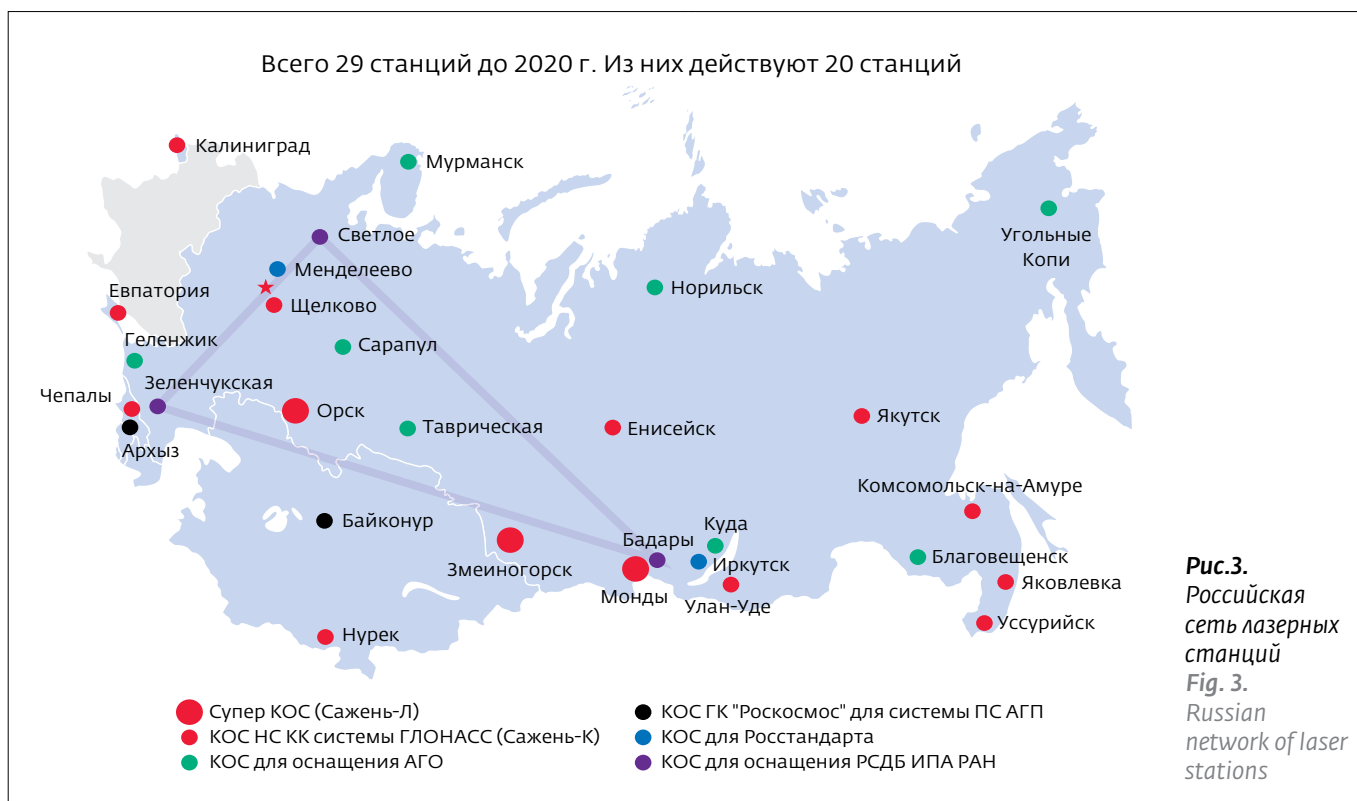


Рис.2. Серийная SLR станция "Сажень-ТМ", разработка 2005 года (частота повторений импульсов 300 Гц, мощность 0,75 Вт; метод одноэлектронной высокочастотной лазерной дальнометрии реализован в серийных малогабаритных лазерных станциях "Сажень-ТМ"): а – Серийная SLR станция "Сажень-ТМ"; б – Серийная SLR станция "Сажень-ТМ" в укрытии (Ленинградская обл., Светлое)

Fig. 2. Serial SLR "Sazhen-TM" station, development of 2005. Frequency of pulses repetitions – 300 Hz, power – 0,75 W. The method of a one-electron high-frequency laser distance measurement is realized in serial small-size laser stations "Sazhen-TM": a – Serial SLR the "Sazhen-TM" station; b – Serial SLR the "Sazhen-TM" station in the shelter (The Leningrad Region, Svetloe)



70-х годов наши первые лазерные станции имели оптику на основе полутораметровых прожекторных зеркал (лазерный локатор СКОЛ-2 имел 4 таких 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 ту же дальность действия и на порядок лучшую точность измерения.

Виды изготавливаемых на нашем предприятии и действующих в настоящее время лазерных дальнометрических станций показаны на рис.1 и 2, а их расположение на территории России и ближайших к ней стран - на рис.3.

Достижимая сейчас в мировой практике (в том числе и у нас) точность измерения составляет около 0,5 см и ограничивается в основном двумя факторами. Как было констатировано в 2005 году на специальном международном совещании в г. Истборн (Великобритания), имевшем в названии подзаголовков Towards 1-mm accuracy [4], т.е. "Путь к точности 1 мм", это - трудность точного учета показателя преломления атмосферного воздуха на пути распространения лазерного луча и так называемая "ошибка цели". Об этом следует рассказать несколько подробнее.

Показатель преломления воздуха вблизи поверхности Земли составляет ~1,0003 [5] и в общей слож-

Reached now in world practice (including us) the accuracy of measurement is about 0,5 cm and is limited generally by two factors; as it has been stated in 2005 at the special international meeting to Eastbourne (Great Britain) which had a subtitle of Towards 1-mm accuracy [4] (a way to the accuracy of 1 mm), these factors are - difficulty of accurate accounting of index refraction of atmospheric air on the way of distribution of a laser beam and a so-called "error of the purpose" that is necessary to tell slightly in more detail about.

Index of air refraction near the Earth's surface is ~ 1,0003 [5] and in total brings a delay of time of distribution of a signal from ~ 3 m to ~ 10 m depending on "a place corner" (an inclination of the vising line in relation to the horizon plane); work at small corners of the place when this delay exceeds 10 m, in general is undesirable. The size of index refraction of air depends on its temperature, pressure and humidity, and these factors are measured only in a point of the station arrangement. It is possible to consider all nuances of distribution of these parameters along the route of the beam by means of atmosphere model so far at best with a margin error in several mm (in terms of range) though the research and accounting of local conditions in combination with improvement of the general model of the atmosphere allows to improve this accuracy gradually.

ности вносит задержку времени распространения сигнала от ~3 м до ~10 м в зависимости от "угла места" (наклона линии визирования по отношению к плоскости горизонта); работа при малых углах места, когда эта задержка превышает 10 м, вообще нежелательна. Величина показателя преломления воздуха зависит от его температуры, давления и влажности, а измеряются эти факторы лишь в точке расположения станции. Учесть все нюансы распределения этих параметров вдоль трассы луча при помощи модели атмосферы можно пока в лучшем случае с погрешностью в несколько мм (в пересчете на дальность), хотя исследование и учет местных условий в сочетании с совершенствованием общей модели атмосферы позволяет постепенно улучшать эту точность.

Теоретически существует путь решения данной проблемы – одновременное измерение дальности на двух сильно разнесенных длинах волн лазерного излучения (например в видимом и инфракрасном участках спектра) с использованием уравнения дисперсии – зависимости показателя преломления от длины волны. В принципе это 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 нужно измерять разность времени распространения для этих двух длин волн с точностью лучше $\pm 0,5$ пикосекунды [5] (т.е. $\pm 0,07$ мм в пересчете на дальность). Этого пока не удается выполнить по ряду технических причин.

Второй серьезный 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 ретрорефлекторов – угловых отражателей из кварцевого стекла. Кстати, большинство таких спутников-целей и отражателей для них изготовлено нашим предприятием (см. табл.1 и рис.4). Эти сферические конструкции имеют диаметр от 23 см до 2,15 м, а количество угловых отражателей на каждом из них составляет от 20 до 2142.

Из-за одновременного отражения лазерного импульса от нескольких ретрорефлекторов, нахо-

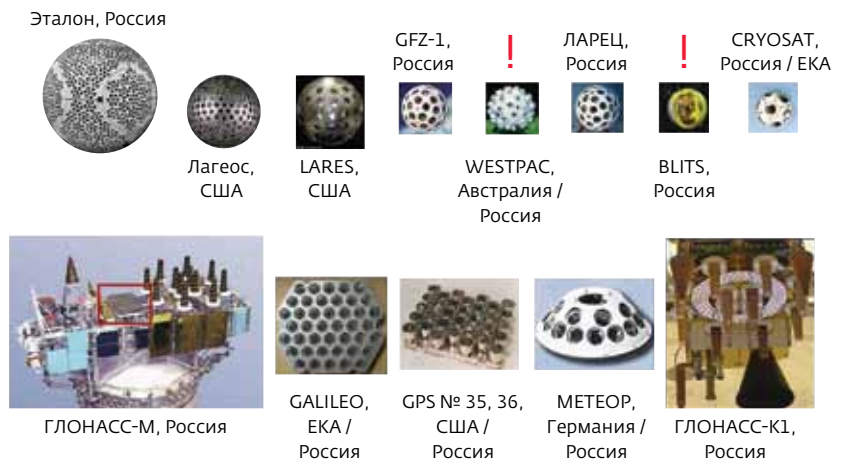


Рис.4. Отечественные и зарубежные ретрорефлекторные системы и спутники

Fig. 4. Domestic and foreign retroreflex systems and satellites

Theoretically there is a solution of this problem – simultaneous measurement of range on two strongly carried lengths of waves of a laser radiation (for example, in visible and infrared sections of a range) with use of the equation of dispersion – dependences of refraction index on wavelength – in principle allows to receive value of signal delay in the atmosphere, without resorting to temperature measurement, pressure and air humidity along the route; however it was shown that for achievement in such a way the error of 1 mm it is required to measure the difference of propagation time for these two lengths of waves with an accuracy in the measured range better $\pm 0,5$ picoseconds [5] (i.e. $\pm 0,07$ mm in terms of range) that it is not possible to make on a row of technical reasons yet.

The second serious limiter of accuracy – "a purpose error" – is caused by the fact that almost all satellites purposes for high-precision geodetic and geophysical measurements represent metal spheres on which surface the set of retroreflector – angular reflectors from quartz glass (by the way, the majority of such satellites is established – the purposes and reflectors for them is made by our enterprise – see tab. 1 and fig. 4). These spherical designs have diameter from 23 cm to 2,15 m, and the number of angular reflectors on each of them is from 20 to 2142.

Because of simultaneous reflection of a laser impulse from several retroreflectors which are on different removals from the station and because of inevitable dispersion of sizes of the effective



Таблица 1. Лазерные ретрорефлекторные системы, созданные АО "НПК "СПП" для российских космических аппаратов (всего оборудовано лазерными ретрорефлекторами 148 космических аппаратов)

Table 1. The laser retroreflex systems created by JSC NPK SPP for the Russian spacecrafts. In total it is equipped with laser retroreflectors of 148 spacecrafts

Тип КА	Высота орб., км	Год запуска	Кол-во КА	Кол-во СВ на КА	Размер системы ретрорефл., мм
Салют-4 (Россия)	350	1975	1	42	184×168×47
Цикада-11, -13 (Россия)	1 000	1976	2	280	235×145×11
Метеор-1 (Россия)	950	1976	2	70	ø585×210
Молния-1С (Россия)	36 000	1974	1	70	504×318×510
Радуга (Россия)	36 000	1976	2	50	306×255×248
ГЕОИК (Россия)	1 500	с 1981 по 1990	11	692	ø ₁ 1960–ø ₂ 1410 кольцевая зона
ГЛОНАСС (Россия)	19 100	с 1981 по 2000	>50	396	1330×1010
Эталон-1, -2 (Россия)	19 100	1989	2	2142	ø1294
Ресурс-0 (Россия)	620	1992	1	2	200×160×90
Метеор-2 (Россия)	950	1993	1	3	196×66×96
Метеор-3 (Россия-Германия)	1 200	1994	1	24	ø280×100
Зея (Россия)	475	1997	1	20	ø968
ГЛОНАСС (Россия)	19 100	С 2000 по 2005	11	132	ø ₁ 660×ø ₂ 380
Метеор-ЗМ-1 (Россия)	1 020	2002	1	1 сфера D60 мм	ø88×64
Ларец (Россия)	690	2003	1	60	ø215
Можаец (Россия)	690	2003	1	6	ø115×46
ГЛОНАСС-М (Россия)	19 100	с 2003 по н.в.	*45	112	511×311
BUTS 2009 (Россия)	832	2009	1	автоном. сфера	ø170
ГЕО-ИК (Россия)	1 000	февраль 2011 неудачный запуск	1	30	ø300×96,5
Слектр-Р (Россия)	Эллиптическая	2011	1	100	500×406×80
		2011, 2014	2		
ГЛОНАСС-К (Россия)	19 100	2011	1	123	ø ₁ 626×ø ₂ 340 кольцевая зона

дящихся на разных удалениях от станции, и из-за неизбежного разброса величин эффективной отражающей поверхности этих ретрорефлекторов возникает погрешность, достигающая для крупных сферических спутников-целей нескольких единиц миллиметров (см. табл. 2).

Еще в 90-е годы для решения специфических высокоточных задач геодинимики (в частности, для японского проекта Keystone по предсказанию землетрясений и цунами на основе наблюдения малых подвижек земной коры) нашим предприятием была

reflecting surface of these retroreflectors there is an error reaching for large spherical satellites – the purposes of several cm (tab. 2).

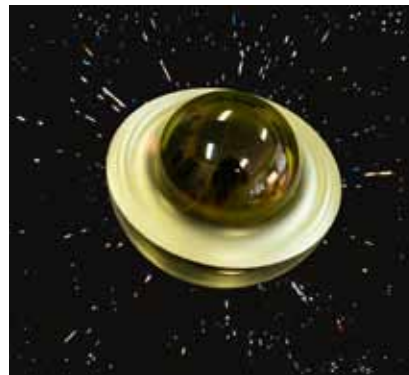
In the 90th years for the solution of specific high-precision problems of geodynamics (in particular, for the Japanese Keystone project on prediction of earthquakes and a tsunami on the basis of observation of small motions of the earth crust) our enterprise has created the special SLR purpose of WESTPAC (see fig. 4) where in each timepoint the laser signal is reflected only from one retroreflector that is reached

создана специальная SLR-цель WESTPAC (см. рис.4), где в каждый момент времени лазерный сигнал отражается только от одного ретрорефлектора, что достигается ограничением его углового поля специальными блендами. Такое решение 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 определенной 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). Он представлял собой стеклянное сферическое тело с использованием принципа линзы Люнеберга [6, 7]. потому его конструкция позволяла сфокусировать падающий на такую линзу пучок излучения с плоским волновым фронтом на противоположной поверхности линзы (рис.5). Нанеся на половину сферы отражающее покрытие и придав сферической линзе вращение вокруг оси, лежащей в плоскости раздела между отражающей и прозрачной поверхностями, можно получить отраженный сигнал в виде периодически повторяющихся серий отраженных импульсов. Причем такой спутник не имеет металлических частей, где могут возникать вихревые токи, и его вращение вокруг оси закрутки остается неизменным за все время службы спутника в космосе.

Такой спутник практически представляет собой "точечную" цель, не вызывающую искажения формы отраженного 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 спутник, успешно наблюдавшийся всеми станциями международной SLR-сети с конца



a)



b)

Рис.5. Сферический стеклянный спутник "Блиц": а – сферический спутник "BLITS" в разобранном виде; б – летный образец

Fig. 5. Spherical glass Blitz satellite: a – the Spherical BLITS satellite in unassembled form; b – the Flight sample

by restriction of its angular field with special blends. It has allowed to reduce the average size of "a purpose error" for this satellite to $\pm 0,5$ mm, but has caused some difficulties at its observation: between series of reflections from different retroreflectors there were breaks, and averaging of results of measurements by means of turning of the satellite round its pivot-center at its start into an orbit gradually worsened because of braking of this rotation by the vortex currents arising in the metal case of the satellite at its movement in magnetic field of Earth (by the way, this lack of a certain measure is inherent in all metal spherical satellite purposes).

For radical overcoming the difficulties connected with "a purpose error" we have offered, made and launched in space the satellite purpose of absolutely new type – BLITS (Ball Lens In The Space) representing a glass spherical body with use of the principle of a lens of Lyuneberg [6], [7] allowing to focus the radiation bunch falling on such lens with the flat wave front on an opposite surface of a lens (fig. 5). Having applied the reflecting covering on a half of the sphere and having given to a spherical lens rotation around the axis lying in the section plane between the reflecting and transparent surfaces it is possible to receive the reflected signal in the form of periodically repeating series of the reflected impulses, and such satellite has no metal parts where there can be vortex currents, and its rotation around the axis of turning remains invariable for all the time of service of the satellite in space.

Such satellite practically represents the "dot" purpose which isn't causing distortion of a form

Таблица 2. Проблемы достижения субмиллиметровой точности измерений дальности по лазерным спутникам
Table 2. Problems of achievement of submillimetric accuracy measurements of range on laser satellites

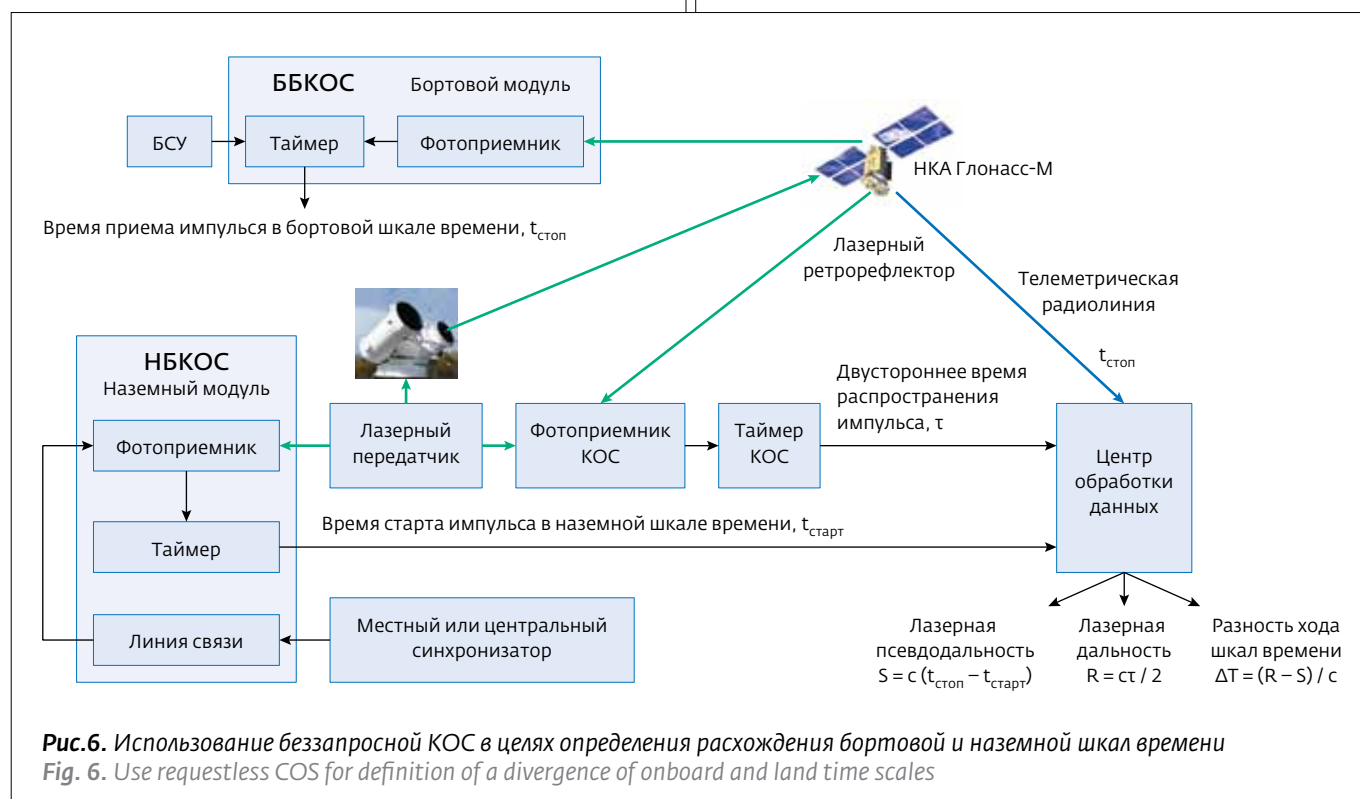
Ретрорефлекторная система	Высота орбиты, км	Ошибка цели, мм	Удлинение импульса (сигнатура)
Ajisai (яп.)	1400	50	есть
Эталон	19100	40	есть
Глонасс	19100	25	есть
Lageos(CLUA)	5800	10	есть
Ларец	690	2,0	есть
Вестпас	835	0,5	нет
Блиц	835	0,1–0,3	нет

2009 года до начала 2013 года, был выведен на круговую орбиту высотой 835 км и послужил прототипом для нового спутника BLITS-M несколько большего размера и массы. В настоящее время новый спутник 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 измере-

of the reflected impulse and fluctuations of provision of an effective point of the reflection concerning the center mass of the satellite. The error caused by temperature changes of index of glass refraction in measurement of range doesn't exceed 0,1 mm.

This satellite which was successfully observed by all stations of the international SLR network since the end of 2009 prior to the beginning of 2013 has been put to circular orbit 835 km high and has served as a prototype for the new BLITS-M satellite, of a little bigger size and weight which is prepared for start into an orbit by height ~ now 1500 km where influence of the atmosphere on stability of an orbit is almost absent that will allow to use effectively this spacecraft for geophysical surveys and geodetic measurements with an accuracy, which achievement was difficult earlier.

Important addition to the range-metering systems considered above is (BKOS)[8] "requestless" system developed recently intended for transmission of laser pulse from the earth-based station on airborne receivers of the GLONASS spacecrafts and a binding of the pulses accepted by this receiver to an onboard time scale of the appropriate spacecraft (fig. 6). It allows, using a binding of high-precision "hours" of the earth-based laser station by this time, to make a check of onboard time scales of GLONASS



ний с точностью, достижение которой раньше было затруднительным.

Важным дополнением к рассмотренным выше дальномерным системам является разработанная в последнее время "беззапросная" система (БКОС) [8]. Она предназначена для передачи лазерного импульса с наземной станции на бортовые приемники космических аппаратов ГЛОНАСС и привязки принятых этим приемником импульсов к бортовой шкале времени соответствующего космического аппарата (рис.6). Это позволяет, используя привязку высокоточных "часов" наземной лазерной станции к этому времени, производить сверку бортовых шкал времени аппаратов ГЛОНАСС с наземным эталоном, обеспечивая за счет малых погрешностей лазерной линии значительное 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 такой системой с учетом широкого охвата сетью таких станций территории земного шара обеспечит в дальнейшем значительное повышение точностных характеристик системы ГЛОНАСС и создаст ей в этом отношении преимущество перед другими глобальными спутниковыми навигационно-геодезическими системами. В еще большей степени этому будет способствовать оснащение всех космических аппаратов новых модификаций межспутниковыми лазерными линиями (МЛНСС) для быстрого многократного обмена данными о расхождении шкал времени на этих аппаратах (рис.7). Аппаратура этих линий по существу представляет собой сочетание беззапросного дальномерного и низкоинформативной линии связи.

Каковы же дальнейшие перспективы развития высокоточной лазерной спутниковой дальнометрии – после оснащения измерительной сети новыми, содержащими систему БКОС, станциями типа "Сажень-К" и "Сажень-Л" (рис.8) [9], подготовленными к серийному производству и 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 центра* с телескопом диаметром 3,12 м (рис.9) и лазерным

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



Рис.7. Межспутниковая лазерная навигационно-связная система (МЛНСС). Терминал МЛНСС-УЛК для КА Глонасс-М № 752, 753

Fig. 7. Inter-satellite Laser Navigation and Coherent System (ISLNCS). The MLNCS-ULK Terminal for KA of Glonass-M No. 752, 753

devices with a terrestrial standard, providing at the expense of small errors of the laser line the substantial increase of accuracy of synchronization of onboard time of GLONASS and the appropriate increase in accuracy of navigation and geodesic determination by means of this global space system.

Equipment in the short term of all new earth-based laser stations by network of such stations of the territory of the globe will provide with such system taking into account broad coverage further substantial increase of precision characteristics of GLONASS system and will create her in this regard advantage before other global satellite navigation and geodetic systems. In a bigger degree it will be promoted by equipment of all spacecrafts of new modifications by inter-satellite laser lines (MLNCS) for fast repeated data exchange about a divergence of time scales on these devices (fig.7). The equipment of these lines in essence represents a combination of a requestless range finder and the low-informative communication line.

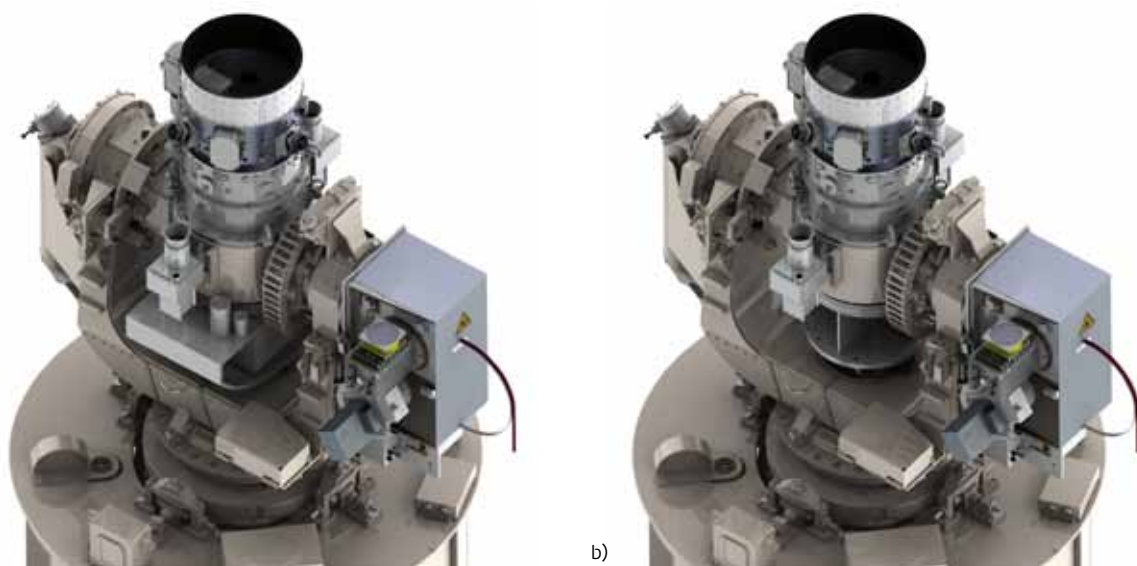


Рис. 8. Лазерные системы прецизионной точности для измерения дальности и передачи времени: а – КОС "Сажень-Л"; б – КОС "Сажень-К"

Fig. 8. The laser systems of precision accuracy for measurement of range and transfer of time: а – COS "Sazhen-L"; б – COS "Sazhen-K"

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

Здесь надо заметить, что уже в течение прошедших трех 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, апогей которой находится на расстоянии почти 350 тысяч километров от Земли. Однако точность использованной при этом дальномерной аппаратуры – около дециметра, что 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, где положение центра тяжести 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 дальномерией (LLR-Lunar Laser Ranging) занимаются всего три станции (две в США и одна во Франции), имеющие соответствующее оборудование – мощные короткоимпульсные лазерные передатчики и большие приемные телескопы. В ближайшем будущем к ним присоединится и наша станция на Алтае. Эта работа во времени увязана с новыми космическими миссиями, в ходе которых на Луну будут достав-

What further prospects of development of a high-precision laser satellite distance measurement – after equipment of measuring network with new, containing the BKOS system, stations like "Sazhen-K" and "Sazhen-L" (fig. 8)[9] prepared for mass production and having potential of achievement of an instrument error of 1-2 mm and after essential expansion of network of exact stations? What is conceived, planned and can be realized in the next years at our enterprise?

First of all, input is provided in a system of the second turn of the Altai optiko-laser center* with the telescope with a diameter of 3,12 m (fig. 9) and a laser range finder which will be capable to measure effectively with a millimetric accuracy of distance to the retroreflectors established on the Moon.

Here it is necessary to notice that within last three years we took measurements at ranges, comparable with distance to the Moon – it means the work on the retroreflex panel installed on the "Radioastron" spacecraft with the extended elliptic orbit which apogee is at distance of nearly 350 thousand km from Earth. However the accuracy of the ranging equipment used at the same time – about a decimeter that it is quite enough for the solution of problems of this space mission, but isn't enough for the solution of the fundamental tasks connected with researches of the Moon and system Earth Moon (here appropriate

* The first stage of this measuring and research center functions more than 15 years.

лены и новые ретрорефлекторные системы, в том числе создаваемые на нашем предприятии.

Сейчас в трех точках на Луне имеются ретрорефлекторные панели, доставленные туда астронавтами миссий Apollo-11, Apollo-14, Apollo-15, а еще 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 эффективность их снизилась из-за естественных причин (запыления и эрозии поверхности, а возможно и радиационной деградации).

К сожалению, в короткой статье нет никакой возможности хотя бы кратко упомянуть о других многочисленных применениях высокоточной лазерной дальнометрии – от решения важнейших задач фундаментальной науки до разнообразных практических устройств, в том числе и бытового назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распространение лазерного пучка в атмосфере/Под ред. В.Е.Зуева и В.Л.Миронова. – М.: Изд-во "Мир", 1981.
2. К.В.Показеев, Т.О.Чаплина, Ю.Д.Чашечкин. Оптика океана. – М.: Изд-во МГУ, 2010.
3. Электронный ресурс <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov> [дата последнего обращения 18.09.2017].
4. ILRS Technical Workshop on Laser Ranging. Towards 1-mm accuracy. – Eastbourne, UK, 2005.
5. Дж. Кэй, Т.Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. – М.: Изд-во Физматгиз, 1962.
6. V.Vasiliev, I.Gashkin, M.Belov, V.Shargorodsky. A new approach to a submillimeter accuracy SLR target design. – Proc. of the 11-th International Workshop on Laser Ranging. Deggendorf, Germany, 1998.
7. BLITS: The first autonomous zero-signature satellite in orbit. – Proc. of the 17-th International Workshop on Laser Ranging, Bad Koetzing, Germany, 2011.
8. V.V.Pasinkov, V.D.Shargorodsky, M.A.Sadovnikov, V.V.Sumerin. The concept and the preliminary results of the SLR application in the problem of improving the GLOHASS accuracy. – Proc. of the 18-th International Workshop on Laser Ranging. Fujiyoshida, Japan, 2013.
9. M.Sadovnikov. SLR Station of the new generation for time transfer with subnanosecond accuracy and ranging with submillimeter accuracy in night and daytime. – Proc. of the 19-th International Workshop on Laser Ranging, Annapolis, MD, USA, 2014.
10. ANSI Z 136.1– Safe Use of Lasers (Standard), Laser Institute of America, 2007.



Рис.9. Строительство второй очереди АОЛЦ с телескопом ТИ – 3,12 м

Fig. 9. A general view of construction of the second turn of AOLTs with the TI telescope – 3,12 m

to mention that our terrestrial geodesy and navigation are carried out in system where the center of gravity position is in the related system Earth Moon, and even "terra firma" fluctuates depending on position of the Moon, not to mention levels of ocean waters.

Now only three stations (two in the USA and one in France) having the corresponding equipment – powerful short-pulse laser transmitters and big reception telescopes are engaged in a lunar laser distance measurement (LLR–Lunar Laser Ranging). In the near future our station in Altai also will join them; this work in time is coordinated to new space missions during which will be delivered to the Moon and new retroreflex systems including created at our enterprise.

Now in three points on the Moon there are retroreflex panels delivered there by astronauts of missions of Apollo-11, Apollo-14, Apollo-15 and in two points – the panels, smaller by the sizes, installed on the Soviet devices "Moon Rover-1" and "Moon rover-2". But all these systems were delivered to the Moon more than 40 years ago and their efficiency decreased because of the natural reasons (dust pollution and erosion of a surface, and maybe also because of possible radiation degradation).

Unfortunately, in short article there is no opportunity at least briefly to mention other numerous applications of a high-precision laser distance measurement – from the solution of the major problems of fundamental science to various practical devices including household purpose.