



МАЛОГАБАРИТНАЯ РЕТРОРЕФЛЕКТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ЛОМОНОСОВ"

А.С.Акентьев, А.Л.Соколов, д.т.н.,
АО "Научно-производственная корпорация
"Системы прецизионного приборостроения",
Москва

Предложена конструкция малогабаритной ретрорефлекторной системы с субмиллиметровой ошибкой цели для низкоорбитальных спутников, в том числе космического аппарата "Ломоносов". Определены факторы, влияющие на энергетические и точностные характеристики малогабаритной ретрорефлекторной системы.

На всех современных навигационных и геодезических космических аппаратах (КА) размещают панели уголкового отражателя (УО) – так называемые ретрорефлекторные системы (РС) [1-7]. Назначение этих систем состоит в отражении луча лазерного дальномера от КА обратно к приемнику оптико-лазерной станции для прецизионного измерения дальности до КА.

Разработанная в АО "Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения" малогабаритная РС "Пирамида" представляет собой пирамидальную конструкцию из четырех УО с общей вершиной (рис.1). Масса составляет всего 60 г, а габаритный размер не превышает 40 мм.

Для достижения требуемых энергетических и точностных характеристик необходимо, чтобы конструктивные параметры РС обеспечивали оптимальную диаграмму направленности отраженного излучения, которую принято характеризовать эквивалентной поверхностью рассеяния (ЭПР). Явление скоростной абберации приводит к тому, что оптимальное направление приема отраженного лазерного луча не совпадают с осью диаграммы направленности и зависит от скорости спутника, то есть от высоты его орбиты. Для низкоорбитальных спутников среднее значение скоростной абберации [1, 2,

SMALL-SIZE RETROREFLECTORY SYSTEM FOR LOMONOSOV SPACECRAFT

A.S.Akentyev, A.L.Sokolov, Dr.of.Sc. (Engineering)
Joint-stock company «Research-and-production
corporation "Precision Systems and Instruments»,
Moscow

The construction of small-size retroreflectory system with submillimeter target error for low-orbit satellites, including Lomonosov spacecraft, is suggested. The factors, which influence on the energy and precision characteristics of small-size retroreflectory system, are determined.

The panels of corner-cube-reflector (AR), or so-called retroreflectory systems (RS), are installed in all modern navigation and geodesic spacecrafts (SC) [1-7]. The intended purpose of such systems consists in the reflection of the beam of laser rangefinder back to the detector of optical and laser station for precision measurement of the distance to SC.

Small-size RS "Pyramid" developed in JSC "Scientific and Manufacturing Corporation "Systems of Precision Instrument Engineering" represents the pyramid-shaped construction of four CR with the common vertex (Fig. 1). Its weight is only 60 g and overall dimensions do not exceed 40 mm.

In order to reach the required energy and precision characteristics it is necessary for the construction parameters of RS to provide the optimal directivity diagram of reflected radiation, which is typically characterized by equivalent scattering area of cross-section (CS). The phenomenon of velocity aberration results in the fact that the optimal direction of detection of reflected laser beam does not concur with the axis of directivity diagram and it depends on the satellite velocity, in other words on the height of its orbit. The average value of velocity aberration [1, 2, 4] for low-orbit satellites is about 8". It means that particularly at such angle from the axis of directivity diagram CS must be maximal, and it is required to expand the directivity diagram somehow, for example, to reduce the size of CR. However, at the same time the aperture decreases, and detected energy of laser radiation is reduced in general.

At zenithal area of SC overflying the angle of incidence on all four CR is approximately equal to 54°.

4] составляет около $8''$. Это значит, что именно при таком угле от оси диаграммы направленности ЭПР должна быть максимальной, и необходимо каким-то образом расширять диаграмму направленности, например, уменьшать размер УО. Однако при этом уменьшается апертура, и в целом падает принимаемая энергия лазерного излучения.

В зенитной области пролета КА угол падения на все четыре УО равен примерно 54° . Апертура УО при перемещении спутника от горизонта к зениту уменьшается и имеет овальную форму. В результате ЭПР максимальна при зенитном угле наблюдения $\theta_{zen}=63^\circ$ (рис.2, угол места $\beta=27^\circ$) и минимальна в случае расположения спутника в зенитной области $\theta_{zen}=0...10^\circ$. Максимальные значения ЭПР достигаются, когда излучение падает только на один УО.

Минимумы I соответствуют случаю, когда излучение падает на два УО при пролете спутника по траектории, лежащей в плоскости α (α – плоскость, образованная точкой расположения квантово-оптической станции и нормальным вектором, направленным по касательной к поверхности земного эллипсоида). Минимумы II соответствуют расположению спутника на траверсе, при этом угловое отклонение оси отраженного от РС лазерного луча, вследствие явления скоростной абберации, максимально.

Вместе с тем, расстояние до спутника минимально как раз в зенитной области и максимально (более чем в три раза) в случае расположения спутника на горизонте. Поскольку количество фотонов, отраженных от спутника и принимаемых наземной квантово-оптической станцией, обратно пропорционально четвертой степени расстояния до спутника, то уменьшение апертуры УО в зенитной области компенсируется уменьшением расстояния.

Влияние двух факторов приводит к тому, что количество фотонов, регистрируемых оптико-лазерной станцией, максимально при зенитном угле наблюдения спутника $\theta_{zen}=40^\circ$. В отличие от других аналогичных ретрорефлекторных систем [7], количество фотонов, отраженных от РС "Пирамида" и регистрируемых фотоприемником, не изменяется столь значительно при пролете спутника по небесной сфере.

При увеличении количества УО возрастает как ЭПР, так и вероятность отражения излучения от двух и более УО. Если расстояние от лазерного передатчика до отдельных УО в РС отлича-



Рис.1. Малогабаритная ретрорефлекторная система "Пирамида" для низкоорбитальных спутников
Fig. 1. Small-size retroreflector system "Pyramid" for low-orbit satellites

During the movement of satellite from horizon to zenith, CR aperture decreases and it has oval shape. As a result, CS is maximal at zenith viewing angle $\theta_{zen}=63^\circ$ (see Fig. 2, tilt angle $\beta=27^\circ$) and minimal in case of satellite location in zenith area $\theta_{zen}=0...10^\circ$. Maximal values of CS are reached when the radiation is incident only on one CR.

Minimums I correspond to the case when the radiation is incident on two CR during the satellite overflying along the trajectory located in the plane α (α – plane formed by the point of location of quantum-optical station and normal vector directed along the tangent to the surface of earth ellipsoid). Minimums II correspond to the satellite location on traverse, and at the same time the angular deflection of axis of laser beam reflected from RS is maximal due to the phenomenon of velocity aberration.

At the same time, the distance to satellite is minimal in zenith area and maximal (by more than

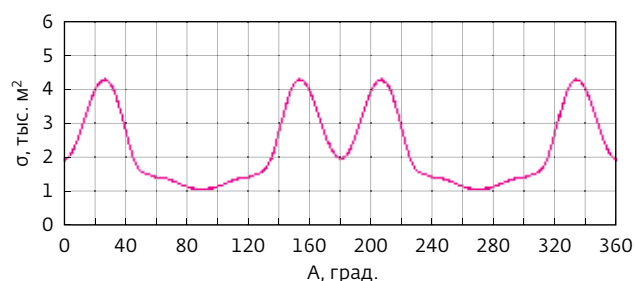


Рис.2. Зависимость ЭПР от угла А при расположении спутника с углом места $\beta=27^\circ$ для высоты орбиты $H=500$ км: А – азимутальный угол, отсчитываемый от плоскости α
Fig. 2. Dependence of CS on the angle A in case of satellite position with the tilt angle $\beta=27^\circ$ for orbit height $H=500$ km: A – azimuth angle taken from the plane α .

ется, то возникает удлинение ответного сигнала, приводящее к так называемой ошибке цели. Для РС "Пирамида" ошибка цели очень мала за счет малого размера УО и соединения их вершин. Максимальная величина ошибки возникает, когда излучение падает сразу на несколько УО при их несимметричном расположении от оси лазерного пучка, при этом оптический путь в этих УО не совпадает. Минимум ошибки соответствует случаю попадания лазерного луча на два УО, ориентированных одинаково, или при отражении лазерного излучения только от одного УО. В целом расчетная величина ошибки цели при измерении дальности до КА не превышает 0,5 мм.

Две малогабаритные ретрорефлекторные системы "Пирамида", созданные в АО "НПК "Системы прецизионного приборостроения", были размещены на борту КА "Ломоносов" в рамках космического эксперимента по лазерной локации совместно с НИИ ядерной физики МГУ, Корпорацией ВНИИЭМ и ФГУП ЦНИИмаш при участии ФГУП "ВНИИФТРИ" (рис.3). Спутник был запущен на солнечно-синхронную орбиту высотой 500 км в апреле 2016 года с научной аппаратурой Московского государственного университета для исследования явлений в верхних слоях атмосферы Земли.

Каждая из РС, представляющая собой пирамиду из четырех угловых отражателей (см. рис.1), способна отражать лазерные импульсы со всей нижней полусферы. Одна РС была приклеена к корпусу спутника, а другая к выдвинутой штанге на расстоянии около двух метров от первой РС.

Проведенные лазерные измерения дальности позволили наблюдать два сигнальных трека с расстоянием между ними всего 0,5-2 м, зависящем от ориентации спутника относительно лазерной станции в момент наблюдения. В этом случае применялся так называемый однофотонный режим, при котором дальность с погрешностью в несколько сантиметров определяется путем счета одиночных сигнальных фотонов, пришедших от РС. Однофотонный режим может достигаться за счет увеличения расходимости зондирующего лазерного пучка до 20-30 угловых секунд.

Несмотря на малые размеры каждая РС обеспечила достаточный уровень ответного сигнала. По нашей оценке (были проведены сравнительные измерения по спутникам "Stella" и "Lageos") ЭПП составила до 100 000 м².



Рис. 3. Космический аппарат "Ломоносов" (РС показаны в увеличенном масштабе)
Fig. 3. Lomonosov spacecraft (RS are shown in scaled up form)

three times) in case of satellite location on horizon. Since the number of photons reflected from satellite and received by ground quantum-optical station is inversely proportional to the fourth degree of distance to satellite, the reduction of CR aperture in zenith area is compensated by the distance decrease.

The influence of two factors results in the fact that the number of photons recorded by optical and laser station is maximal at zenith viewing angle of satellite $\theta_{zen}=40^\circ$. As opposed to other analogous retroreflector systems [7], the quantity of photons reflected from RS "Pyramid" and recorded by photodetector does not significantly vary during the satellite overflying along celestial sphere.

In case of increase of CR quantity, CS and probability of radiation reflection from two and more CR grow. If the distance from laser transmitter to individual CR in RS differs, the extension of response signal causing so-called target error occurs. For RS "Pyramid" the target error is very low at the expense of CR small size and connection of their vertexes. Maximal value of error occurs when the radiation is incident on several CR at once upon their unsymmetrical arrangement from the axis of laser beam, and in such case the optical path in these CR does not concur. Error minimum corresponds to the case of laser beam incidence on two identically oriented CR or to the case of reflection of laser radiation only from one CR. In general, the estimated value of target error does not exceed 0.5 mm when measuring the distance to SC.



Результаты космического эксперимента позволяют рекомендовать ретрорефлекторную систему "Пирамида" для установки на низкоорбитальные космические аппараты для определения их ориентации и для дополнительного мониторинга развертывания составных частей КА в космосе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев В.П., Шаргородский В.Д.** Прецизионная спутниковая лазерная дальнометрия на основе лазеров с высокой частотой повторения импульсов. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2007, № 7, с.6–10.
2. **Садовников М.А.** Необходимые условия достижения субмиллиметровой точности измерений в спутниковой лазерной дальнометрии. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2009, № 12, с.13–16.
3. **Соколов А.Л., Мурашкин В.В.** Дифракционные поляризационно-оптические элементы с радиальной симметрией. – Оптика и спектроскопия, 2011, т. 111, с.900–907.
4. **Садовников М.А., Соколов А.Л., Шаргородский В.Д.** Анализ эквивалентной поверхности рассеяния угловых отражателей с различным покрытием граней. – Успехи современной радиоэлектроники, 2009, №8, с.55–62.
5. **Соколов А.Л., Мурашкин В.В.** Дифракционные свойства угловых отражателей. – Фотоника, 2011, №3, с.52–55.
6. **Sokolov A.L.** Formation of polarization-symmetrical beams using cube-corner reflectors. – J. Opt. Soc. Am. A, 2013, v.30, №7, p.1350–1357.
7. **Акентьев А.С., Васильев В.П., Соколов А.Л., Союзова Н.М.** Малогабаритная ретрорефлекторная система. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2014, №8, с.34–37.

Two small-size retroreflectory systems "Pyramid" designed at JSC "SMC "SPIE" were located onboard the SC "Lomonosov" within the framework of space experiment in laser location jointly with the Research Institute of Nuclear Physics of Moscow State University, Corporation VNIIEM and FSUE TsNIImash with the participation of FSUE "VNIIFTRI" (Fig. 3). The satellite was launched in sun synchronous orbit with the height of 500 km in April 2016 with the scientific equipment of Moscow State University in order to study the phenomena in the upper layers and Earth's atmosphere.

Each RS representing the pyramid of four corner-cube-reflectors (see Fig. 1) is capable to reflect the laser pulses from the whole lower hemisphere. One RS is glued to the satellite frame and the other one is glued to the extension rod at the distance of about 2 m from the first RS.

Carried out laser measurements of distance allowed observing two signal tracks with the distance between them of only 0.5–2 m depending on the satellite orientation relative to laser station at the moment of observation. In this case so-called single-photon mode was used; at this mode the distance with the error of several centimeters is determined by counting the single signal photons coming from RS. Single-photon mode can be reached at the expense of increase of probing laser beam divergence to 20–30 seconds of arc.

Notwithstanding the small size, every RS provided the sufficient level of response signal. According to our evaluation (the comparative measurements by satellites "Stella" and "Lageos" were performed), CS was up to 100 000 m².

The results of space experiment allow recommending the retroreflectory system "Pyramid" for the installation in low-orbit spacecrafts in order to determine their orientation and monitor additionally the deployment of SC components in space.