

РЕТРОРЕФЛЕКТОРНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СТЕКЛЯННЫХ СПУТНИКОВ «БЛИЦ»

А.Л. Соколов

Ю.И. Меренкова

Г.И. Медведева

В.В. Мурашкин

alsokolov@bk.ru

heeyjulie@mail.ru

galenok@bk.ru

dwb1@inbox.ru

АО «НПК «СПИ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проанализированы пространственные и энергетические характеристики стеклянных геодезических пассивных спутников «Блиц» с радиальной симметрией для высокоточной лазерной дальнометрии в интересах ГЛОНАСС. Рассмотрены принципы расчета ретрорефлекторной сферической системы спутников, представляющей собой совокупность концентрических слоев с различными показателями преломления и толщиной. В соответствии со спецификой космического применения ретрорефлекторной сферической системы спутников необходимо обеспечить максимум отраженной мощности в направлении на приемник с учетом явления скоростной аберрации света. Показано, что на основе моделирования в программе Zemax можно выбрать оптимальные параметры оптических элементов, например радиусов кривизны и показателей преломления, с учетом технологических возможностей производства, которые формируют требуемые искривления волновой поверхности отраженного света. На основе аберрационного расчета выполнен анализ дифракционных картин отраженного когерентного лазерного излучения в дальней зоне и отобраны варианты конструкций ретрорефлекторной сферической системы спутников с увеличенными максимумами первого или второго порядков. Приведена формула для оценки пространственной энергетической характеристики спутников «Блиц» — эквивалентной поверхности рассеяния. Введено понятие эффективного диаметра выходного пучка, в пределах которого отраженный свет формирует дифракционную картину в дальней зоне

Ключевые слова

Спутниковая лазерная дальнометрия, ретрорефлекторная сферическая система, эквивалентная поверхность рассеяния, диаграмма направленности, дифракционная картина, сферические аберрации

Поступила 25.04.2022

Принята 19.09.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Лазерные измерительные средства являются одними из ключевых средств обеспечения ГЛОНАСС геодезическими и эфемеридными данными повышенной точности, в частности, эти средства позволяют уточнять геоцентрические координаты измерительных средств наземного сегмента ГЛОНАСС и привязку Государственной геоцентрической системы координат к центру масс Земли [1–3]. Результаты измерения времени пролета зондирующего лазерного импульса до ретрорефлекторной системы спутника (РСС) и обратно, проводимые квантово-оптической станцией, должны поддерживаться средствами метрологического обеспечения, среди которых основную роль играют геодезические спутники [4, 5].

Геодезические пассивные спутники для высокоточной лазерной дальнометрии, как правило, представляют собой сферические конструкции из металла, на поверхности которых устанавливают множество угловых отражателей (рис. 1) [4–7].

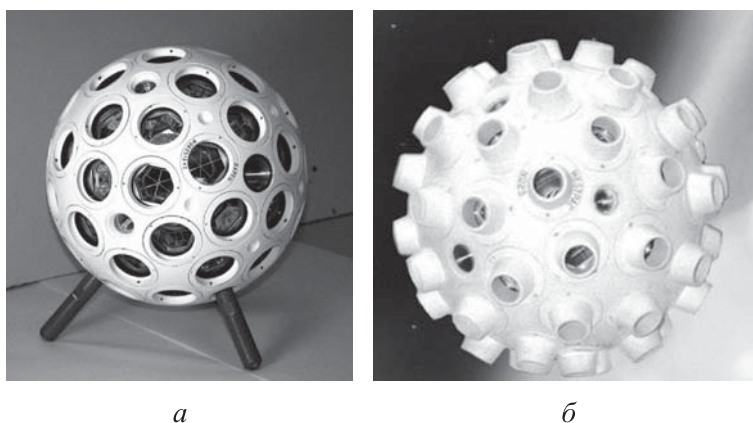


Рис. 1. Спутники «Ларец» (а) и WESTPAC (б)

За последние 30 лет созданы и выведены на орбиты десятки спутников такого типа [6–10]. Погрешность измерения дальности до этих спутников определяется многими факторами, среди которых два зависят от их конструкции — это искажение формы отраженного лазерного импульса и ошибка цели, т. е. погрешность привязки результатов измерения дальности к центру масс спутника. Ошибка цели обусловлена тем, что отраженный оптический сигнал образуется в результате сложения сигналов от нескольких угловых отражателей, положение которых относительно луча, проходящего через центр массы спутника, в момент прихода сигнала неизвестно, а оптические характеристики отдельных отражателей несколько различаются. Для уменьшения этих погрешностей используют результаты многократных измерений, при которых полученные данные усредняются

благодаря вращению спутника вокруг центра масс, специально придаваемому ему при выводе спутника на орбиту. Однако скорость вращения спутника с металлическим корпусом на орбите постепенно уменьшается из-за взаимодействия магнитного поля Земли с наведенными в металле вихревыми токами.

Указанные недостатки можно преодолеть путем реализации спутника в виде сферической линзы по принципу Люнеберга, фокусирующей падающую плоскую волну на своей противоположной поверхности, снабженной отражающим покрытием. В АО «НПК «СПП» в 2008 г. разработана и изготовлена РСС «Блиц» [5, 11, 12]: концентрические мениски выполнены из оптического стекла ЛК6, толщина мениска $d = 31,59$ мм, внешний радиус кривизны $R_1 = 85,11$ мм; внутренний шар — из оптического стекла ТФ5, радиус кривизны $R_2 = 53,52$ мм (рис. 2). Один из менисков покрыт тонким слоем алюминия. Спутник «Блиц» установлен в качестве попутной нагрузки на спутнике «Метеор-М». Несмотря на недостаточно высокую орбиту ($H = 835$ км, где присутствует влияние атмосферы Земли), спутник «Блиц» доказал принципиальную возможность существенного уменьшения ошибки цели геодезических спутников путем создания целиком стеклянного спутника, способного выдержать условия космического полета.

Ретрорефлекторным сферическим системам наземного базирования посвящен ряд работ, в частности [13, 14]. Однако применение таких систем в космосе имеет явную специфику, связанную с необходимостью учета скоростной аберрации света при отражении от движущегося спутника, также к ним предъявляются повышенные требования по термоустойчивости. Если РСС применять на Земле как геодезическое средство, то узкий лазерный пучок, проходящий через центр РСС, после отражения остается парааксиальным, и сферические аберрации не играют существенной роли. Задача расчета РСС космического базирования существенно усложняется, поскольку, с одной стороны, необходимо максимально использовать широкий лазерный пучок, а значит, аберрации нельзя игнорировать, с другой стороны, необходимо получить максимум отраженной энергии не на оси диаграммы направленности отраженного излучения, а на так называемом угле аберрации. Как известно, ось лазерного пучка, отраженного от движущегося спутника, отклоняется от исходного направления на определенный угол в зависимости от тангенциальной скорости (скоростной аберрации света [1–3]). Угол аберрации обратно пропорционален высоте орбиты спутника и изменяется в некотором диапазоне, зависящим от положения спутника на орбите. Для высоты $\sim 1000 \dots 2000$ км угол аберрации равен $6 \dots 10''$.

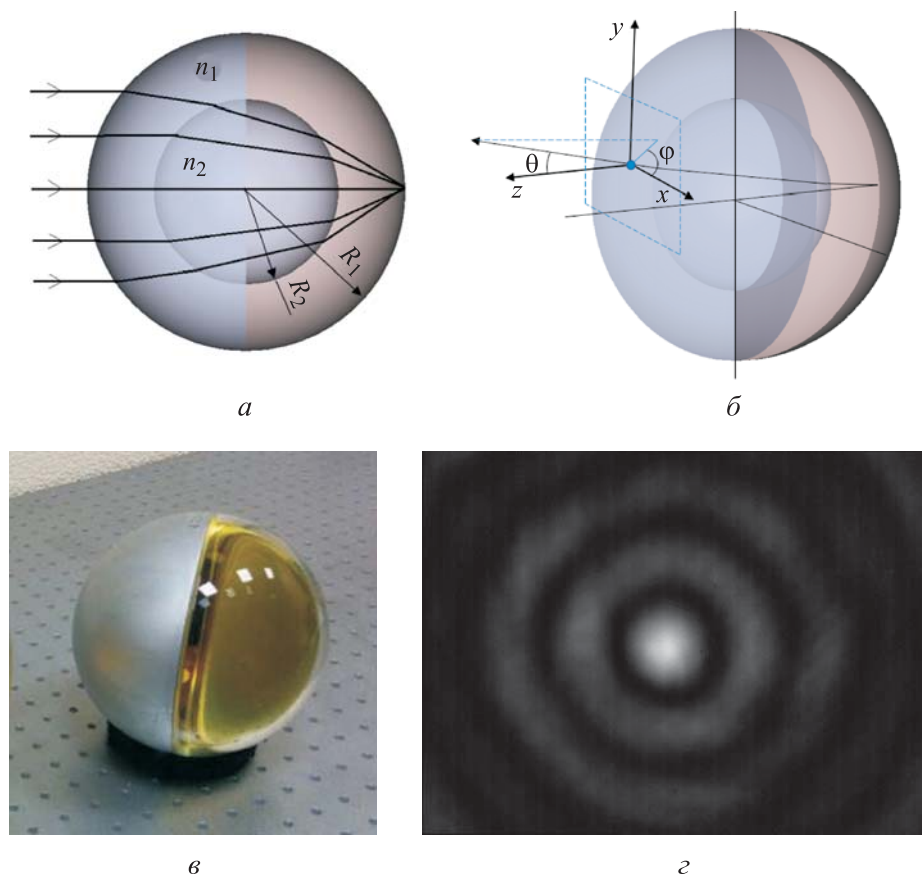


Рис. 2. Ретрорефлекторный сферический спутник «Блиц»
 ($R_1 = 85,11$ мм; $R_2 = 53,52$ мм; $n_1 = 1,47$; $n_2 = 1,76$):

a — ход лучей через РСС; *b* — система координат и направление лучей отраженного света; *в* — спутник «Блиц»; *г* — дифракционная картина, образованная излучением, отраженным от спутника «Блиц»

Цель настоящей работы — разработка методики построения РСС «Блиц» с учетом угла абберации, зависящего от высоты орбиты, при этом рассматривается когерентное лазерное излучение.

Ретрорефлекторная сферическая система. В общем случае ретрорефлекторная система стеклянных спутников «Блиц» состоит из внутреннего шара и нескольких слоев стекла с различным показателем преломления. По условиям технологии изготовления РСС слои выполняют в виде составных менисков, которые приклеивают к внутреннему шару и друг к другу, при этом важную роль играет точность подгонки при склеивании и изготовлении всех радиусов кривизны. Максимальный размер РСС ограничивается технологическими возможностями, в частности, нанесением отражающего покрытия. Одна из целей, которые преследуются

при подборе радиусов кривизны и показателей преломления оптических элементов РСС, — уменьшить сферические aberrации.

Рассмотрим идеальный случай РСС, у которой каким-либо образом устранены сферические aberrации для прошедшего ее пучка света. В этом случае падающая плоская волна фокусируется в точку на задней поверхности и, отражаясь, возвращается плоской, при этом размер шара играет роль диафрагмы, на которой происходит дифракция. Такая идеальная система эквивалентна телескопической системе с увеличением $\times 1$ и, соответственно, является афокальной.

Все лучи, прошедшие идеальную РСС, имеют одинаковый оптический путь, и в рамках скалярной волновой теории система эквивалентна дифракции Фраунгофера плоской волны на однородном диске. В дальней зоне дифракционная картина имеет вид кружка Эйри с распределением, описываемым функцией Бесселя, при этом направление на первый минимум θ_{\min} определяется диаметром D : $\theta_{\min} = 1,22 \lambda / D$, где λ — длина волны. В этом случае, как известно [15], сила излучения в дальней зоне на оси ($\theta = 0$) равна

$$J(0) = \Phi S / \lambda^2, \quad (1)$$

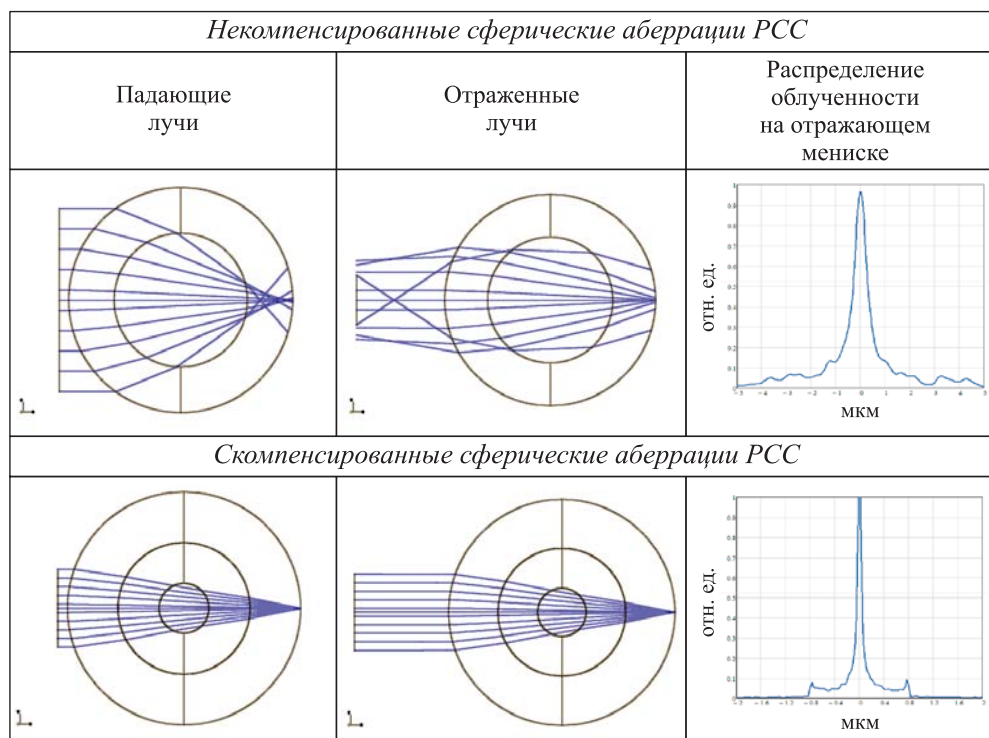
где Φ — поток (мощность) пучка, падающего на РСС; S — площадь сечения РСС.

В действительности сферическая aberrация РСС приводит к тому, что падающий пучок не фокусируется в точку на отражающем мениске (табл. 1). На задней поверхности мениска с зеркальным покрытием, например интерференционным, формируется распределение плотности мощности — облученность. При этом только в частном случае возможна концентрация энергии на малой площади при определенном соотношении радиусов менисков и шара, а также их показателей преломления.

В произвольном случае РСС ширина распределения облученности на отражающей поверхности столь велика, что диаметр коллимированного отраженного пучка составляет всего несколько миллиметров. Другими словами, только параксиальный пучок проходит такую оптическую систему, не претерпевая существенного увеличения расходимости.

Для компенсации сферических aberrаций необходимо использовать несколько слоев стекла с различными показателями преломления [1, 10, 11] (это подтверждается данными из табл. 1). При этом для двухслойной конструкции РСС показатель преломления шара должен быть больше, чем показатель преломления менисков, например, шар выполнен из стекла марки ТФ5, а внешние мениски — из стекла марки К108.

Ход лучей и распределение облученности на отражающем мениске РСС



Пространственные энергетические характеристики РСС принято описывать с помощью различных фотометрических характеристик: силы излучения, яркости, диаграммы направленности, дифракционной картины в дальней зоне, эквивалентной поверхности рассеяния (ЭПР) и др. Эти параметры в общем случае зависят от направления наблюдения отражающего объекта. В случае космического аппарата нас интересует направление на приемную апертуру телескопа лазерного дальномера, а оно определяется углом скоростной аберрации. Для высоты орбиты 2000 км это в среднем составляет 8". Следовательно, оптимальный вид диаграммы направленности отраженного излучения — это кольцо потока энергии с угловым радиусом 8".

При определении характеристик отражения РСС принято использовать понятие ЭПР [10]. Эквивалентная поверхность рассеяния при этом должна быть максимальна на угле аберрации спутника. Как правило, можно принять, что светимость M_r пропорциональна облученности E_{las} спутника лазерным излучением с учетом коэффициента потерь α на пропускание в толще стекла и отражение от внутренней поверхности менис-

ка: $M_r = \alpha E_{las}$. В космической лазерной дальнометрии ЭПР принято рассчитывать по формуле

$$\sigma(\theta, \phi) = S \frac{J_r(\theta, \phi)}{J_0(\theta, \phi)} = 4\pi\alpha \frac{J_r(\theta, \phi)}{M_r} \approx 4\pi\alpha \frac{S}{\Omega_{ef}}. \quad (2)$$

Здесь $J_r(\theta, \phi)$ — сила излучения объекта в направлении, задаваемом углами θ, ϕ в системе координат, связанной с осевой точкой РСС; $J_0(\theta, \phi)$ — сила излучения изотропного источника равной мощности; S — площадь объекта, с которой происходит излучение; Ω_{ef} — телесный угол, внутри которого распространяется отраженное излучение.

В идеальном случае для однородного отражающего диска площадью S ЭПР на оси дифракционной картины с учетом (1) и (2) равна

$$\sigma_0(0) = 4\pi\alpha \frac{S^2}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Направление на первый максимум в случае дифракции плоской волны на круглом отверстии (отражающем диске) равно $\theta_{1\max} = 1,62\lambda / D$, при этом облученность составляет 1,75 % максимума. Это означает, что при $\lambda = 532$ нм и угле абберации 7,5" оптимальный размер коллимированного пучка должен быть равен 23,7 мм; согласно (3) ЭПР на оси отраженного пучка при коэффициенте потерь 0,5 равна $4,3 \cdot 10^6$ м² и, соответственно, в направлении угла абберации (первого максимума) равна $7,6 \cdot 10^4$ м². Это на порядок меньше значения ЭПР, создаваемой уголкового отражателем с апертурой 28 мм. Требуемое значение ЭПР для устойчивой лазерной локации по стеклянному спутнику на высоте 2000 км должно быть в 5 раз больше.

Следовательно, полное устранение сферических аббераций в рассматриваемом случае приводит к неудовлетворительному результату. Необходимо подбирать радиусы кривизны оптических элементов так, чтобы первый или второй максимумы дифракционной картины возрастали за счет уменьшения интенсивности отраженной энергии на оси.

Расчет фотометрических характеристик отраженного излучения на задней поверхности мениска, на выходе из РСС и на произвольном расстоянии можно проводить с помощью программы Zemax. Предположим, что, воспользовавшись ресурсами Zemax, получили некоторое нормированное распределение силы излучения $F(\theta) = J_r(\theta, \phi) / J_{r\max}(0)$ в дальней зоне, которое отличается от распределения, описываемого функцией Бесселя.

Поток отраженной энергии Φ_r с учетом радиальной симметрии дифракционной картины определяется из выражения

$$\Phi_r = 2\pi J_{r \max} \int_0^{\pi/2} F(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (4)$$

Для оценки энергетических характеристик РСС космического базирования, в частности ЭПР, преобразуем (2) следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma(\theta, \phi) &= 4\pi\alpha S_r \frac{J_r(\theta, \phi)}{\Phi_r} = 4\pi\alpha S_r \frac{J_r(\theta, \phi)}{2\pi J_{r \max} \int_0^{\pi/2} F(\theta) \sin \theta d\theta} = \\ &= \frac{4\pi\alpha S_{ef} F(\theta)}{Q_{ef}}; \end{aligned} \quad (5)$$

здесь S_{ef} — площадь, соответствующая эффективному диаметру выходного пучка (ЭДВП) D_{ef} , т. е. части пучка, которая с заданной точностью формирует дифракционную картину отраженного излучения в дальней зоне.

Физический смысл введенного параметра

$$Q_{ef} = 2\pi \int_0^{\pi/2} F(\theta) \sin \theta d\theta \quad (6)$$

состоит в том, что он дает эквивалентное значение телесного угла, внутри которого распространяется отраженное излучение, формирующее дифракционную картину. Этот параметр минимален в случае дифракции на диске: $Q = \lambda^2 / S$ и ЭПР на оси пучка определяется из (3). Если отраженное излучение соответствует закону Ламберта для равнояркого диска ($F(\theta) = \cos\theta$), то $Q = \pi$ и $\sigma(0) = 4\alpha S$.

В случае РСС пространственное распределение отраженной энергии определяется не дифракцией Фраунгофера, а дифракцией Френеля с несколькими действующими зонами. Эффективный диаметр выходного пучка можно приближенно определить из графика волновых aberrаций в выходном зрачке, рассчитанного в программе Zemax. Разбив волновую поверхность на зоны Френеля, можно определить их площадь. В оптимизированной конструкции РСС площадь первых трех зон на порядок превышает площадь последующих зон, и можно использовать приближенное выражение для эффективной площади выходного пучка, формирующего дифракционную картину в дальней зоне:

$$S_{ef} \approx S_1 - S_2 + \frac{1}{2}S_3. \quad (7)$$

Для расчета ЭПР на угле абберации θ_a спутника сначала удобно определить значение ЭПР на оси отраженного пучка

$$\sigma(0) \approx \frac{4\pi\alpha S_{ef}}{Q_{ef}}, \quad (8)$$

а затем из графика нормированного распределения силы излучения $F(\theta)$ получить $\sigma(\theta_a)$.

Приближенная формула (8) применима только для оценки значения ЭПР и сравнительного анализа различных конструкций РСС, что необходимо для проектирования. Точное значение ЭПР должно экспериментально измеряться на специальной установке, предназначенной для контроля уголковых отражателей [10].

Результаты исследования РСС трех видов и соответствующие значения ЭПР, рассчитанные по приближенной формуле (8) с учетом (6), (7), приведены в табл. 2.

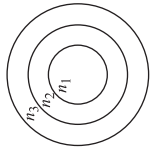
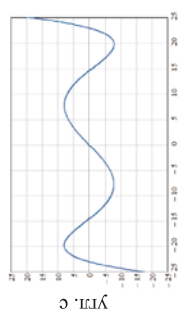
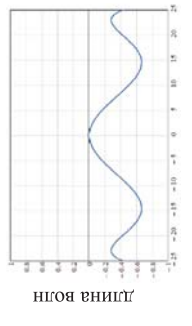
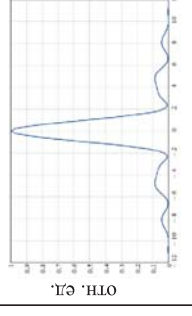
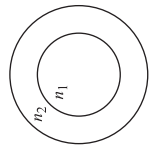
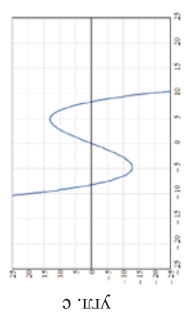
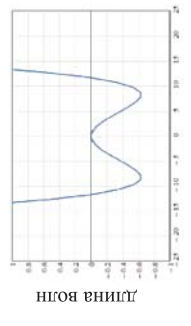
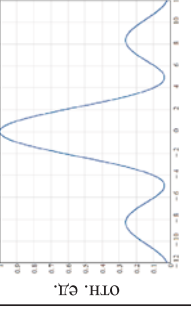
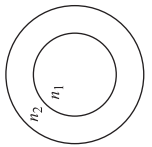
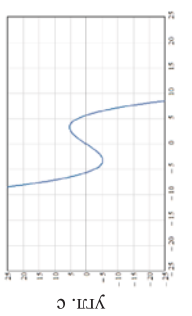
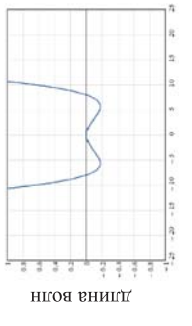
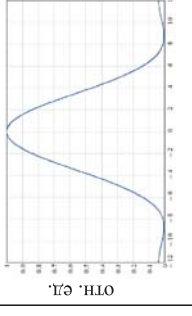
Оптические схемы РСС двух видов, трех- и двухслойной, оптимизированы по условию достижения максимума силы излучения в направлении углов дифракции $7...8''$, равных возможному диапазону углов абберации спутника, при этом диаметр РСС выбран равным 240 мм. Для первой трехслойной конструкции $n_1 = 1,89$, $n_2 = 1,91$, $n_3 = 1,69$; для второй и третьей двухслойных конструкций $n_1 = 1,77$, $n_2 = 1,52$. Третья двухслойная конструкция РСС изготовлена ранее как опытный образец спутника «Блиц-М», ее внешний диаметр равен 220 мм, а диаметр внутреннего шара — 128 мм для нормальных климатических условий (см. табл. 2).

Сравнивая силы излучения для нулевого угла дифракции и угла дифракции $7...8''$ в соответствующих дифракционных картинах определяли ЭПР для спутника на высоте орбиты 2000 км. Для трехслойной конструкции РСС приближенное значение ЭДВП равно 54 мм, для двухслойной конструкции РСС $D_{ef} = 26$ мм (оба значения рассчитаны для вакуума и средней температуры на орбите), а для двухслойной РСС со слабо скомпенсированными абберациями $D_{ef} = 18$ мм (при нормальных климатических условиях).

Данный образец двухслойной конструкции экспериментально исследован для проверки формул (7), (8) путем сравнения с эталонным уголковым отражателем; получено хорошее совпадение экспериментальных результатов измерения ЭПР и значений, рассчитанных по формуле (8).

Таблица 2

Результаты исследования трех конструкций РСС

Конструкция	График			ЭПР, м ²
	угловых аберраций	волновых аберраций	Диаграмма направленности	
				$\sigma(0) = 3,2 \cdot 10^7$ $\sigma(8'') = 1,6 \cdot 10^6$
				$\sigma(0) = 1,0 \cdot 10^6$ $\sigma(8'') = 3 \cdot 10^5$
				$\sigma(0) = 9,5 \cdot 10^5$ $\sigma(7'') = 1 \cdot 10^4$

Заключение. В результате проведенных исследований установлено следующее:

– сферические aberrации РСС приводят к тому, что дифракционная картина в дальней зоне определяется дифракцией Френеля, число зон которой зависит от конструкции РСС;

– для достижения целевой задачи по получению максимальной ЭПР на углах aberrации, зависящих от высоты орбиты спутника, полной компенсации сферических aberrаций не требуется — необходимо создать дифракционную картину с увеличенными максимумами первого или второго порядков;

– для увеличения значения ЭПР необходимо добиваться увеличения площади первой и третьей зон путем подбора радиусов кривизны оптических элементов с учетом их показателей преломления;

– наилучших результатов по формированию оптимальной диаграммы направленности отраженного излучения можно достичь, увеличивая число слоев с различными показателями преломления (в настоящей работе не анализировалось, сколько всего должно быть слоев);

– полученная формула (8) для оценки ЭПР по значениям ЭДВП, определяемого по графику волновых aberrаций, и эффективного телесного угла (6) позволяет проводить оптимизацию конструкции РСС.

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] Degnan J.J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review. In: *Contributions of space geodesy to geodynamics: technology*. Vol. 25. Washington, AGU, 1993, pp. 133–162.
- [3] Otsubo T., Appleby G.M., Gibbs P. GLONASS laser ranging accuracy with satellite signature effect. *Surv. Geophys.*, 2001, vol. 22, no. 5-6, pp. 509–516.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015676419548>
- [4] Соколов А.Л., Акентьев А.С., Ненадович В.Д. Космические ретрорефлекторные системы. *Светотехника*, 2017, № 4, с. 19–23.
- [5] Акентьев А.С., Васильев В.П., Садовников М.А. и др. Ретрорефлекторный сферический спутник. *Оптика и спектроскопия*, 2015, т. 119, № 4, с. 588–593.
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0030403415100049>
- [6] Коротаев В.В., Панков Э.Д. Поляризационные свойства уголкового отражателя. *Оптико-механическая промышленность*, 1981, № 1, с. 9–12.

- [7] Мурашкин В.В., Садовников М.А., Соколов А.Л. и др. Исследование диаграммы направленности уголкового отражателя с различным покрытием граней. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2011, т. 16, № 3, с. 47–50.
- [8] Садовников М.А., Соколов А.Л. Пространственная поляризационная структура излучения, формируемая уголковыми отражателями с неметаллизированными гранями. *Оптика и спектроскопия*, 2009, т. 107, № 2, с. 213–218.
- [9] Crabtree K., Chipman R. Polarization conversion cube-corner retroreflector. *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 30, pp. 5882–5890. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.49.005882>
- [10] Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика. М., ФИЗМАТЛИТ, 2019.
- [11] Белов М.С., Васильев В.П., Гашкин И.С. и др. Сферическая линза как спутник-цель для прецизионной лазерной дальнометрии. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2007, № 7, с. 11–14.
- [12] Васильев В.П., Ненадович В.Д., Мурашкин В.В. и др. Термодеформации стеклянного сферического спутника. *Оптика и спектроскопия*, 2016, т. 121, № 3, с. 497–503. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0030403416090233>
- [13] Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М., Советское радио, 1974.
- [14] Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В. Автоматизация изменений световозвращательных характеристик. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*, 2004, № 2 (55), с. 27–35.
- [15] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.

Соколов Андрей Леонидович — д-р техн. наук, доцент, начальник отделения АО «НПК «СПП» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 53).

Меренкова Юлия Игоревна — заместитель начальника отдела АО «НПК «СПП» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 53).

Медведева Галина Игоревна — инженер-исследователь 1-й категории АО «НПК «СПП» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 53).

Мурашкин Вячеслав Владимирович — канд. техн. наук, первый заместитель начальника отделения АО «НПК «СПП» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 53).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Соколов А.Л., Меренкова Ю.И., Медведева Г.И. и др. Ретрорефлекторные сферические системы стеклянных спутников «Блиц». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 4 (141), с. 108–122.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-4-108-122>

RETROREFLECTOR SPHERICAL SYSTEMS OF THE BLITZ GLASS SATELLITES

A.L. Sokolov

Yu.I. Merenkova

G.I. Medvedeva

V.V. Murashkin

alsokolov@bk.ru

heeyjulie@mail.ru

galenok@bk.ru

dwb1@inbox.ru

JSC “SPC “PSI”, Moscow, Russian Federation

Abstract

Spatial and energy characteristics of the BLITS glass geodesic passive satellites with radial symmetry for high-precision laser ranging in the interests of GLONASS were analyzed. Principles of calculating the retroreflector spherical system of satellites being a set of concentric layers with different refractive index and thickness were considered. In this case and in accordance with specifics of space application of the retroreflector spherical system of satellites, it is necessary to ensure the maximum reflected power in the receiver direction taking into account phenomenon of the light high-speed aberration. It is shown that on the basis of simulating in the Zemax program, it becomes possible to select optimal parameters of the optical elements, i.e., curvature radii and refractive indices taking into account the production technological capabilities, which are forming the required curvature of the reflected light wave surface. Based on the aberration calculation, diffraction patterns of the reflected coherent laser radiation in the far zone were analyzed, and design options for a retroreflector spherical system of satellites with increased maxima of the first or second orders were selected. A formula is provided for estimating spatial energy characteristics of the BLITS satellites including the equivalent scattering surface. The concept of the outflow beam efficient diameter is introduced, within which the reflected light forms a diffraction pattern in the far zone

Keywords

Satellite laser ranging, retroreflector spherical system, equivalent scattering surface, radiation pattern, diffraction pattern, spherical aberrations

Received 25.04.2022

Accepted 19.09.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Vasilyev V.P., Shargorodskiy V.D. Precision satellite laser ranging using high-repetition-rate lasers. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2007, no. 7, pp. 6–10 (in Russ.).

- [2] Degnan J.J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review. In: Contributions of space geodesy to geodynamics: technology. Vol. 25. Washington, AGU, 1993, pp. 133–162.
- [3] Otsubo T., Appleby G.M., Gibbs P. GLONASS laser ranging accuracy with satellite signature effect. *Surv. Geophys.*, 2001, vol. 22, no. 5-6, pp. 509–516.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015676419548>
- [4] Sokolov A.L., Akentyev A.S., Nenadovich V.D. Space retroreflector arrays. *Light & Engineering*, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 18–23.
- [5] Akentyev A.S., Vasilyev V.P., Sadovnikov M.A., et al. Retroreflector spherical satellite. *Opt. Spectrosc.*, 2015, vol. 119, no. 4, pp. 589–593 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X15100045>
- [6] Korotaev V.V., Pankov E.D. Polarization properties of corner reflectors. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost*, 1981, no. 1, pp. 9–12 (in Russ.).
- [7] Murashkin V.V., Sadovnikov M.A., Sokolov A.L., et al. Far-field diffraction pattern of corner cube reflectors with a various converging of face. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2011, vol. 16, no. 3, pp. 47–50 (in Russ.).
- [8] Sadovnikov M.A., Sokolov A.L. Spatial polarization structure of radiation formed by a retroreflector with nonmetallized faces. *Opt. Spectrosc.*, 2009, vol. 107, no. 2, pp. 201–206. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X09080062>
- [9] Crabtree K., Chipman R. Polarization conversion cube-corner retroreflector. *Appl. Opt.*, 2010, vol. 49, no. 30, pp. 5882–5890. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.49.005882>
- [10] Ishchenko E.F., Sokolov A.L. *Polyarizatsionnaya optika* [Polarization optics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2019.
- [11] Belov M.S., Vasilyev V.P., Gashkin I.S., et al. Ball lens — a target satellite for precision laser ranging. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2007, no. 7, pp. 11–14 (in Russ.).
- [12] Vasilyev V.P., Nenadovich V.D., Murashkin V.V., et al. Thermal deformations of a glass spherical satellite. *Opt. Spectrosc.*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 460–465.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X16090228>
- [13] Zelkin E.G., Petrova R.A. *Linzovye anteny* [Lens antennas]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974.
- [14] Baryshnikov N.V., Bokshanskiy V.B., Zhivotovskiy I.V. Automation of measurement of light-retroreflection characteristics. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2004, no. 2 (55), pp. 27–35 (in Russ.).
- [15] Born M., Wolf E. *Principles of optics*. Oxford, Pergamon Press, 1959.

Sokolov A.L. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of Department, JSC “SPC “PSI” (Aviamotornaya ul. 53, Moscow, 111024 Russian Federation).

Merenkova Yu.I. — Deputy Head of Department, JSC “SPC “PSI” (Aviamotornaya ul. 53, Moscow, 111024 Russian Federation).

Medvedeva G.I. — Research Engineer of the 1st category, JSC “SPC “PSI” (Aviamotornaya ul. 53, Moscow, 111024 Russian Federation).

Murashkin V.V. — Cand. Sc. (Eng.), First Deputy Department Head, JSC “SPC “PSI” (Aviamotornaya ul. 53, Moscow, 111024 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sokolov A.L., Merenkova Yu.I., Medvedeva G.I., et al. Retroreflector spherical systems of the BLITS glass satellites. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 4 (141), pp. 108–122 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-4-108-122>