

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ РЕТРОРЕФЛЕКТОРНОГО СФЕРИЧЕСКОГО СТЕКЛЯННОГО СПУТНИКА

А.Л. Соколов

А.С. Акентьев

Ю.И. Меренкова

А.А. Фокина

alsokolov@bk.ru

alexander.akentev@gmail.com

heeyujulie@mail.ru

anna.fokina.mai@gmail.com

АО «НПК «СПП», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Экспериментально исследованы дифракционные картины излучения, отраженного от ретрорефлекторной сферической системы стеклянных геодезических пассивных спутников типа «Блиц», созданных в АО «НПК «СПП». Спутники типа «Блиц» применяют в интересах ГЛОНАСС для высокоточной лазерной дальнометрии и представляют собой совокупность концентрических слоев с различным показателем преломления. Цель исследования — по результатам экспериментальных данных определить эффективный диаметр пучка, формирующий дифракционную картину отраженного излучения в дальней зоне, значение которого необходимо для расчета энергетического параметра спутника — эффективной поверхности рассеяния. Размер эффективного диаметра пучка для указанной ретрорефлекторной сферической системы определен экспериментально с использованием установки различных диафрагм, ограничивающих размер пучка излучения. Показано, что изменения дифракционной картины в дальней зоне начинаются, когда отверстие диафрагмы меньше эффективного диаметра. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений эквивалентной поверхности рассеяния спутника. Согласно результатам эксперимента, дифракционная картина определяется центральной зоной ретрорефлекторной сферической системы, где волновые aberrации меньше некоторого предела, соответствующего дифракции Френеля с действующими несколькими первыми зонами

Ключевые слова

Спутниковая лазерная дальнометрия, ретрорефлекторная сферическая система, эквивалентная поверхность рассеяния, выходной зрачок, дифракционная картина, волновые aberrации

Поступила 25.04.2022

Принята 23.08.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. В АО «НПК «СПП» разработаны и изготовлены ретрорефлекторные сферические системы (РСС) типа «Блиц» [1–8] для прецизионной калибровки квантово-оптических станций [9–11] в интересах ГЛОНАСС [12]. Два варианта РСС типа «Блиц» приведены на рис. 1.



Рис. 1. Спутники «Блиц» (1) и «Блиц-М» (2)

При проектировании РСС большое значение имеет выбор оптимальных параметров оптических элементов (менисков и внутреннего шара), из которых выполнен спутник [13]. Это связано с тем, что необходимо получить максимум отраженного сигнала в направлении, не совпадающем с оптической осью падающего пучка. Вследствие явления скоростной абберации света луч, отраженный от ретрорефлектора, который движется с космической скоростью, отклоняется на определенный угол [1–5, 9–11]. Угол скоростной абберации зависит от тангенциальной составляющей вектора скорости спутника и, соответственно, от высоты орбиты: чем выше орбита, тем меньше скорость и угол абберации света. Для Луны этот угол равен в среднем $1''$, а для низкоорбитальных спутников — $15...20''$. Выбор оптимальных конструктивных параметров РСС позволяет получить перераспределение энергии излучения в дифракционной картине в направлении на приемник с учетом явления скоростной абберации света.

Основным параметром, характеризующим энергетику любой РСС, применяемой в космосе, принято считать эффективную поверхность рассеяния (ЭПР), которая измеряется в квадратных метрах [9, 11]. Соответственно значение ЭПР в направлении, задаваемом углом абберации, — один из главных численных критериев оценки энергетической эффективности спутника, используемой при выборе его конструкции. Для единичного уголкового отражателя (УО), применяемого на спутниках ГЛОНАСС, ЭПР на угле абберации равна примерно 1 млн м^2 , а для стеклянного спутника типа «Блиц» — в несколько раз меньше.

Теоретический расчет ЭПР стеклянных спутников имеет специфику, связанную с тем, что волновой фронт излучения на выходе из РСС существенно искажается за счет сферических аббераций. Расчет в программе *Zetax* позволяет получить график волновых аббераций в выходном зрачке. Разбив волновую поверхность на зоны Френеля, можно опреде-

лить 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: $S_{ef} \approx S_1 - S_2 + (1/2) S_3$.

Эффективная поверхность рассеяния зависит от направления, которое задается углами θ, φ в сферической системе координат, связанной с осевой точкой РСС, и рассчитывается как [11]:

$$\sigma(\theta, \varphi) = 4\pi\tau S_r \frac{J_r(\theta, \varphi)}{J_0} \approx 4\pi\tau \frac{S_{ef}}{\Omega_{ef}}. \quad (1)$$

Здесь τ — коэффициент пропускания, учитывающий потери на рассеяние и поглощение в материале РСС; S_r — площадь поперечного сечения РСС; $J_r(\theta, \varphi)$ — сила излучения, отраженного от РСС; J_0 — сила излучения точечного источника той же мощности; S_{ef} — эффективная площадь выходного пучка. Эффективный телесный угол определяется из рассчитанного в *Zemax* нормированного распределения силы излучения $F(\theta)$:

$$\Omega_{ef} = 2\pi \int_0^{\pi/2} F(\theta) \sin \theta d\theta.$$

Эффективный диаметр D_{ef} выходного пучка (ЭДВП) рассчитывается из найденного значения эффективной площади S_{ef} .

Для точного определения ЭПР на специальной метрологической установке в фокальной плоскости коллиматора измеряется распределение интенсивности света, отраженного от ретрорефлектора (рис. 2). По соотношению облученности, создаваемой УО с известным значением ЭПР (в метрологической установке используется УО с алюминиевым покрытием граней) и тестируемым ретрорефлектором на фотоприемнике, вычисляется значение ЭПР.

Задача, которая решена в настоящей работе, заключалась в экспериментальном исследовании дифракционной картины лазерного излучения, отраженного от РСС [14]. Такие исследования требуются для экспериментального определения ЭДВП и проверки формулы (1), по которой определяется ЭПР при теоретических расчетах РСС. Это необходимо на практике для получения максимума отраженного излучения в направлении угла абберрации спутника.

Ретрорефлекторная сферическая система. Основная идея, которая позволяет уточнить формулу для расчета ЭПР стеклянных сферических

спутников, заключается в следующем: если размер отверстия диафрагмы становится меньше ЭДВП, то начинает резко уменьшаться облученность — регистрируемая дифракционная картина начинает «проседать», при этом одновременно смещается положение первого минимума в дифракционном распределении. Если используются диски различного размера, перекрывающие падающий пучок, вместо диафрагм с отверстиями, то при закрытии диском ЭДВП дифракционная картина полностью «разрушается».

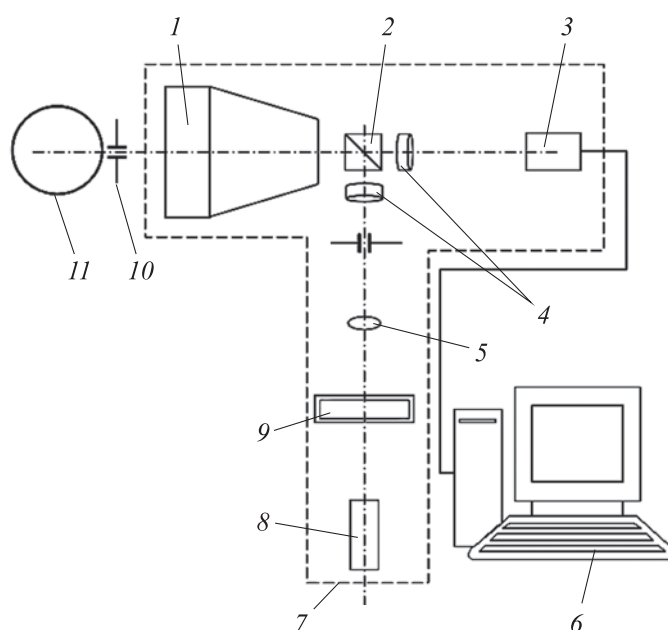


Рис. 2. Схема установки для контроля РСС:

- 1 — длиннофокусный объектив; 2 — светоделительный кубик; 3 — видеокамера;
 4 — линзы; 5 — коллектив; 6 — компьютер; 7 — автоколлимационная система;
 8 — лазер с длиной волны 532 нм; 9 — клин; 10 — диафрагма (диск); 11 — РСС

В процессе экспериментальных исследований определялось влияние диафрагм различных размеров на дифракционную картину РСС с известными конструктивными параметрами. В эксперименте использовался опытный образец спутника «Блиц-М», представляющий собой двухслойную РСС. Внешний диаметр РСС равен 220 мм, диаметр внутреннего шара 128 мм. Расчетные оптические характеристики и измеренная дифракционная картина отраженного излучения такой конструкции (рис. 3) относятся к нормальным климатическим условиям. Отметим, что выбор радиусов кривизны оптических элементов двухслойной РСС проводился для условий применения в космосе с учетом освещения Солнцем (вакуум, температура РСС $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). В результате дифракционная картина

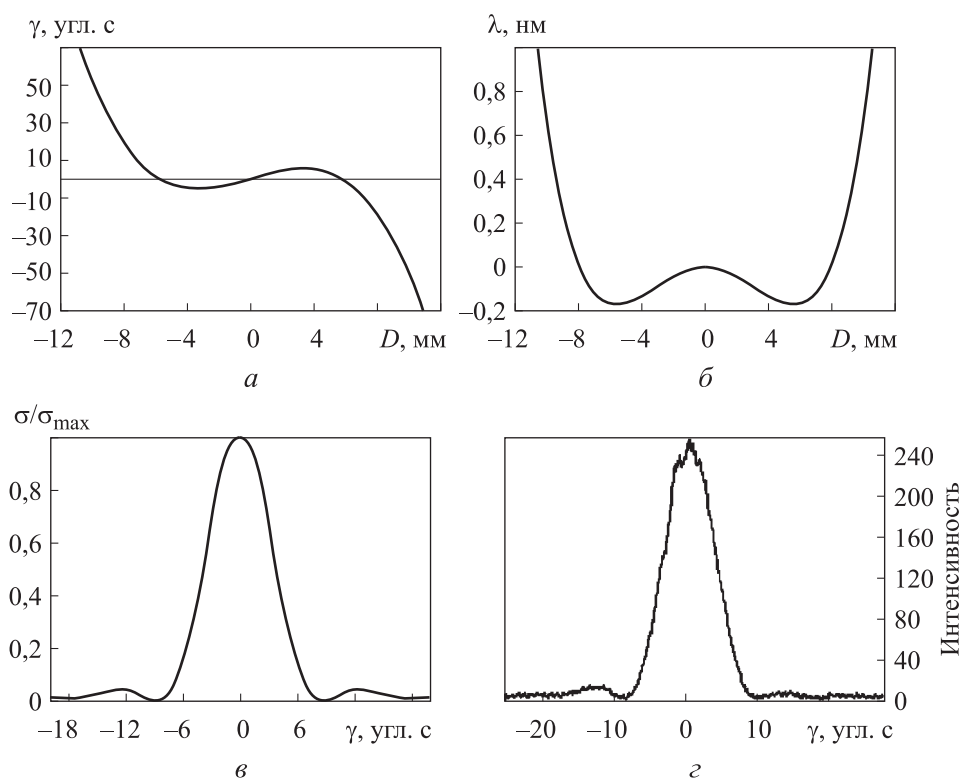


Рис. 3. Угловые aberrации в выходном зрачке (а) и волновые aberrации (б), расчетная дифракционная картина РСС в нормальных климатических условиях (в) и измеренная дифракционная картина спутника «Блиц-М» (з)

РСС в космических условиях существенно отличается от той, что наблюдается в нормальных климатических условиях: более узкий центральный максимум и увеличенный первый максимум на угле aberrации. Однако «неоптимальная» дифракционная картина в лабораторных условиях позволила измерить ЭДВП на установке, схема которой показана на рис. 2.

Результаты эксперимента. Результаты эксперимента с диафрагмами в виде оправы с отверстиями различного диаметра приведены на рис. 4, результаты эксперимента с дисками различного диаметра — на рис. 5. Центры диафрагм и дисков совпадали с оптической осью РСС. Размеры отверстия диафрагмы и диска изменялись в пределах 5...30 мм. Диафрагма и диск располагались между РСС и объективом (см. рис. 2).

Зависимость ЭПР на оси дифракционной картины от диаметра отверстия диафрагмы приведена на рис. 6, а, зависимость положения первого минимума от диаметра отверстия — на рис. 6, б. Для сравнения на рис. 6, а показано, как изменяется ЭПР УО с алюминиевым покрытием

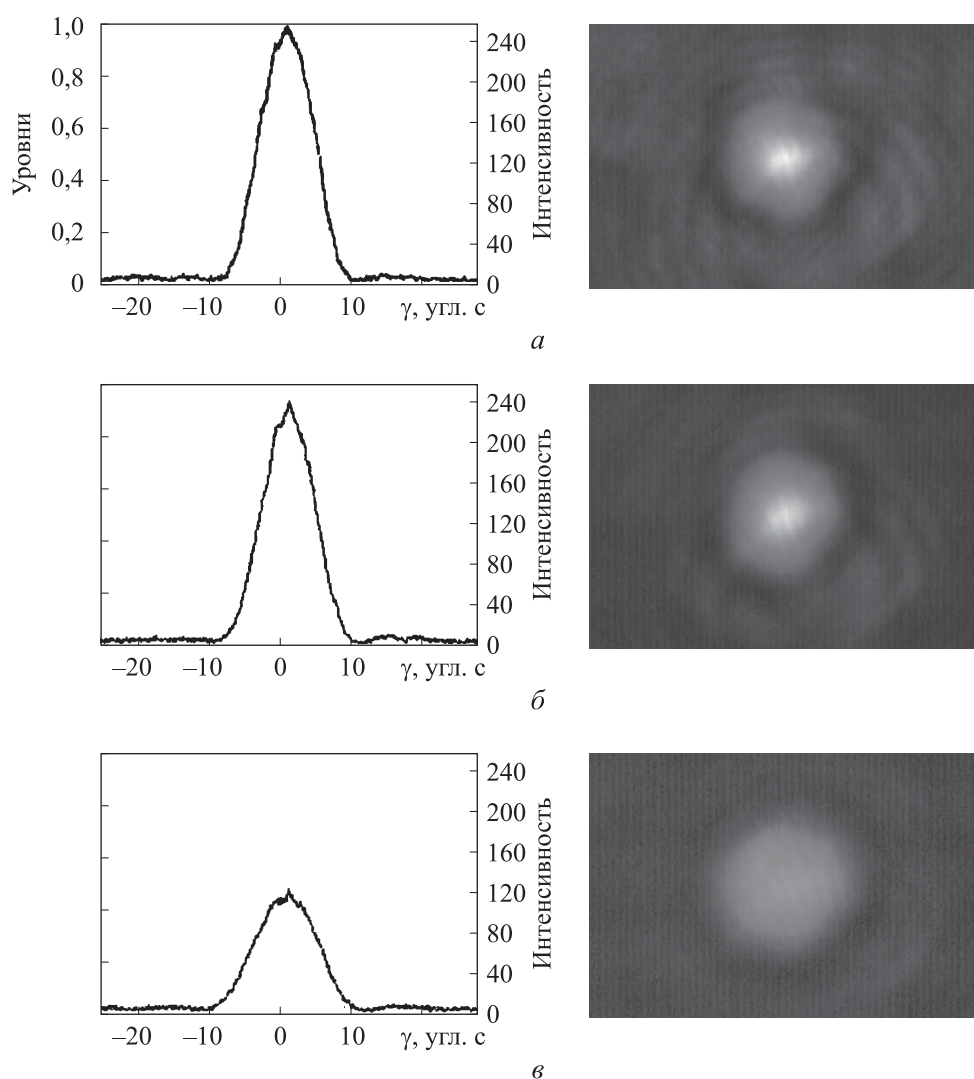


Рис. 4. Дифракционные картины при расположении диафрагм с отверстиями различного диаметра на оси РСС и регистрируемые видеокамерой:
a — 20 мм, $\sigma = 0,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2$; *б* — 16 мм, $\sigma = 0,74 \cdot 10^6 \text{ м}^2$; *в* — 12 мм, $\sigma = 0,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2$

граней при расположении перед ним диафрагмы с отверстиями различного диаметра. По оси ординат отложены функции σ / σ_{\max} . Для УО эта функция примерно совпадает с теоретической: $\sigma / \sigma_{\max} = S^2 / S_{\max}^2$, где S — площадь отверстия диафрагмы; S_{\max} — площадь апертуры УО (в эксперименте диаметр апертуры 27 мм).

Весьма показательно, что при уменьшении диаметра отверстия диафрагмы, расположенной перед РСС, вплоть до значения 18 мм (см. рис. 4, б) значения облученности на оси дифракционной картины

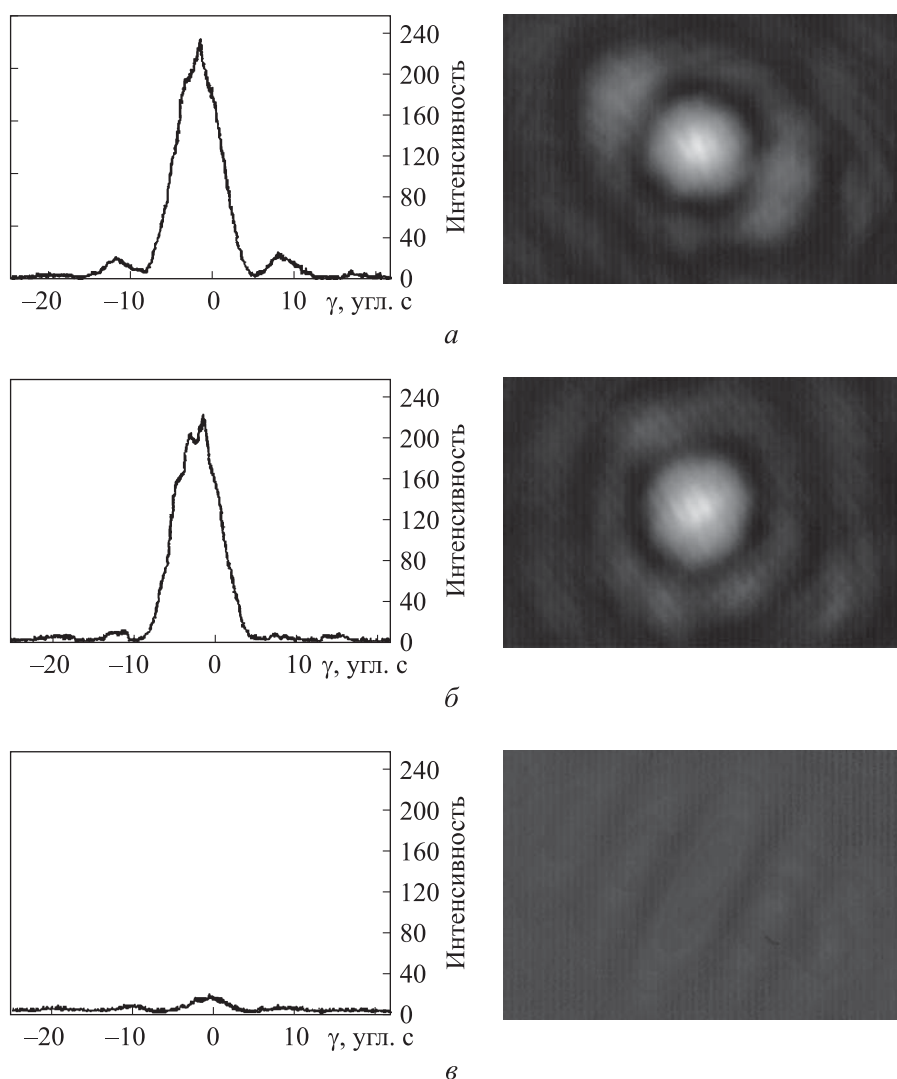


Рис. 5. Дифракционные картины при расположении дисков различного диаметра на оси РСС и регистрируемые видеокамерой:
a — 5 мм, $\sigma = 0,78 \cdot 10^6 \text{ м}^2$; *б* — 10 мм, $\sigma = 0,73 \cdot 10^6 \text{ м}^2$; *в* — 20 мм, $\sigma = 0,06 \cdot 10^6 \text{ м}^2$

РСС и, соответственно, ЭПР не изменяются. Это связано с тем, что РСС формирует отраженный дифракционный пучок, размеры которого (ЭДВП) равны примерно 18 мм, как следует из расчета S_{ef} по графику волновых aberrаций. При дальнейшем уменьшении отверстия диафрагмы дифракционная картина начинает резко изменяться и на оси пучка ЭПР уменьшается.

Согласно данным на рис. 5, относящимся к влиянию диска на оси РСС, при диаметре диска 20 мм дифракционная картина полностью

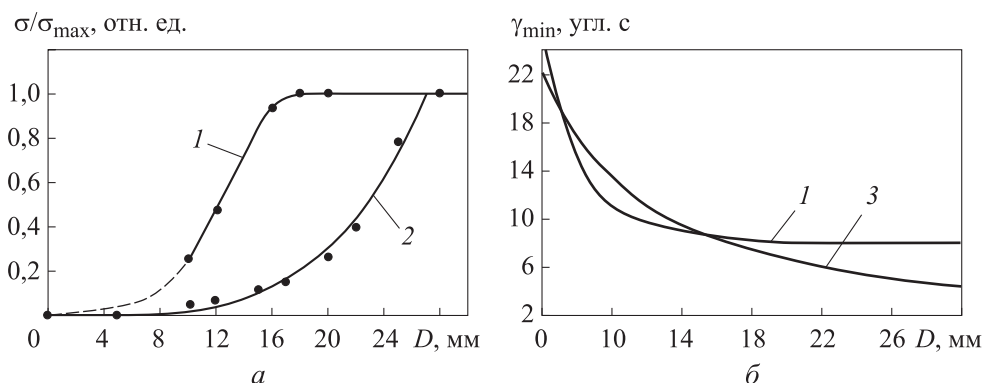


Рис. 6. Зависимости ЭПР на оси дифракционной картины от диаметра отверстия диафрагмы (а) и положения первого минимума дифракционной картины от диаметра отверстия диафрагмы (б)
 1 — РСС; 2 — УО; 3 — дифракция Фраунгофера $1,22\lambda / D$

разрушается, т. е. периферийные лучи не формируют дифракционную картину отраженного излучения, в том числе для углов аберрации $6 \dots 10''$ спутников на высоте орбиты $1000 \dots 2000$ км.

Кроме описанного выше эксперимента, проведен численный эксперимент в программе *Zetax* для РСС с теми же оптическими параметрами и набором диафрагм. Расчетное распределение интенсивности для отраженного излучения от РСС, которое совпадает с экспериментальным при отсутствии диафрагм (см. рис. 4), приведено на рис. 3. Аналогично картине, наблюдаемой в эксперименте, при размещении виртуальных диафрагм с диаметром отверстия меньше ЭДВП (18 мм) наблюдалось снижение интенсивности в центре картины и смещение положения минимума. Это означает, что при проектировании РСС одним из способов определения апертуры ЭДВП является расчет зависимости ЭПР на оси картины от диаметра диафрагмы, аналогично показанной на рис. 6. Начало «полочки» на этом графике для определенного диаметра отверстия означает, что его размер превосходит размер ЭДВП.

Измеренное на специальной метрологической установке (см. рис. 2) значение ЭПР на оси РСС опытного образца спутника «Блиц-М» составляет $0,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, с этим значением совпадает расчетное значение ЭПР, полученное по (1) при ЭДВП = 18 мм и $\tau = 0,6$.

При одинаковых значениях диаметра отверстия и диска суммарное значение ЭПР совпадает с ЭПР при отсутствии диафрагмы и диска в соответствии с принципом Бабинне.

Зависимость углового положения первого минимума по формуле $1,22\lambda/D$, соответствующей дифракции Фраунгофера на круглом отверстии [15], приведена на рис. 6. В случае РСС эта функция отличается вследствие волновых aberrаций — отклонения волновой поверхности отраженного излучения от плоскости.

Заключение. Согласно результатам эксперимента, дифракционная картина определяется центральной зоной РСС, где волновые aberrации меньше некоторого предела, соответствующего дифракции Френеля с действующими первыми зонами. Рассчитанный из графика волновых aberrаций ЭДВП и диаметр диафрагмы, при уменьшении которого начинается резкое изменение дифракционной картины, совпадают. Это дает основание полагать формулу (1) приемлемой для оценки ЭПР стеклянных спутников типа «Блиц». В то же время определение размера диафрагмы, при котором начинает изменяться дифракционная картина, можно использовать в качестве экспериментального способа вычисления значения ЭДВП и оптимизации конструкции РСС для получения максимума ЭПР в направлении угла aberrации спутника.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Васильев В.П., Ненадович В.Д., Мурашкин В.В. и др. Термодформации стеклянного сферического спутника. *Оптика и спектроскопия*, 2016, т. 121, № 3, с. 497–503. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0030403416090233>
- [3] 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>
- [4] Соколов А.Л., Акентьев А.С., Ненадович В.Д. Космические ретрорефлекторные системы. *Светотехника*, 2017, № 4, с. 19–23.
- [5] 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.
- [6] Shargorodsky V.D., Vasiliev V.P., Belov M.S., et al. Spherical glass target microsatellite. *Proc. of 15th Int. Workshop on Laser Ranging*, 2006, pp. 566–570.
- [7] Murashkin V., Nenadovich V., Sokolov A., et al. [The Preliminary results of ground tests over the ring array]. Abstract. *ILRS Technical Workshop 2019*. October 21–25, 2019, Stuttgart, Germany.
- [8] Соколов А.Л., Акентьев А.С., Першин А.В. и др. Ретрорефлекторная сферическая система. Патент РФ 2616439. Заявл. 20.02.2016, опубл. 14.04.2017.

- [9] Degnan J.J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review. In: Contributions of space geodesy to geodynamics: technology. Wiley, 1993, pp. 133–162.
- [10] 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>
- [11] Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика. М., ФИЗМАТЛИТ, 2019.
- [12] Шаргородский В.Д., Косенко В.Е., Садовников М.А. и др. Лазерный ГЛОНАСС. *Вестник СибГАУ*, 2013, № 6, с. 50–55.
- [13] Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М., Сов. радио, 1974.
- [14] Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. 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).

Акентьев Александр Сергеевич — канд. техн. наук, начальник отдела 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).

Фокина Анна Александровна — техник АО «НПК «СПП» (Российская Федерация, 111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 53).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Соколов А.Л., Акентьев А.С., Меренкова Ю.И. и др. Экспериментальное исследование дифракционной картины излучения, отраженного от ретрорефлекторного сферического стеклянного спутника. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 1 (142), с. 32–43.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-32-43>

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DIFFRACTION PATTERN
OF RADIATION REFLECTED FROM THE RETROREFLECTOR
SPHERICAL GLASS SATELLITE**

A.L. Sokolov

alsokolov@bk.ru

A.S. Akentyev

alexander.akentev@gmail.com

Yu.I. Merenkova

heeyjulie@mail.ru

A.A. Fokina

anna.fokina.mai@gmail.com

JSC “SPC “PSI”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents experimental research of the diffraction patterns of radiation reflected from the retroreflector spherical system of glass geodesic passive satellites of the Blitz-type created at the JSC “SPC “PSI”. The Blitz-type satellites are used in the interests of the GLONASS for high-precision laser ranging and are a set of concentric layers with different refractive indices. The purpose of the study was to determine based on the experiment data the effective beam diameter forming the reflected radiation diffraction pattern in the far zone, which value was required to calculate the satellite energy parameter, i.e., the effective scattering surface. The effective beam diameter dimension for the indicated retroreflector spherical system was determined experimentally by installing various diaphragms that limited the radiation beam size. It is shown that alterations in the diffraction pattern in the far field started, when the diaphragm opening was smaller than the effective diameter. Experimental and calculated values of the satellite’s equivalent scattering surface were comparatively analyzed. According to the experimental results, the diffraction pattern is determined by the central zone of the retroreflector spherical system, where wave aberrations are less than a certain limit corresponding to the Fresnel diffraction with several active first zones

Keywords

Satellite laser ranging, retroreflector spherical system, equivalent scattering surface, exit pupil, diffraction pattern, wave aberrations

Received 25.04.2022

Accepted 23.08.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] 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.).
- [2] Vasiliev 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>
- [3] Akentyev A.S., Vasiliev V.P., Sadovnikov M.A., et al. Retroreflector spherical satellite. *Opt. Spectrosc.*, 2015, vol. 119, no. 4, pp. 589–593.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X15100045>
- [4] Sokolov A.L., Akentyev A.S., Nenadovich V.D. Space retroreflector arrays. *Light Eng.*, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 18–23.
- [5] 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.).

- [6] Shargorodsky V.D., Vasiliev V.P., Belov M.S., et al. Spherical glass target microsatellite. *Proc. of 15th Int. Workshop on Laser Ranging*, 2006, pp. 566–570.
- [7] Murashkin V., Nenadovich V., Sokolov A., et al. [The Preliminary results of ground tests over the ring array]. Abstract. *ILRS Technical Workshop 2019*. October 21–25, 2019, Stuttgart, Germany.
- [8] Sokolov A.L., Akentyev A.S., Pershin A.V., et al. Retroreflektornaya sfericheskaya sistema [Retroreflective spherical system]. Patent RU 2616439. Appl. 20.02.2016, publ. 14.04.2017 (in Russ.).
- [9] Degnan J.J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review. In: *Contributions of space geodesy to geodynamics: technology*. Wiley, 1993, pp. 133–162.
- [10] 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>
- [11] Ishchenko E.F., Sokolov A.L. *Polyarizatsionnaya optika [Polarization optics]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2019.
- [12] Shargorodskiy V.D., Kosenko V.E., Sadovnikov M.A., et al. Laser GLONASS. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6, pp. 50–55 (in Russ.).
- [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*. Pergamon Press, 1959.

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

Akentyev A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the 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).

Fokina A.A. — Technician, JSC “SPC “PSI” (Aviamotornaya ul. 53, Moscow, 111024 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sokolov A.L., Akentyev A.S., Merenkova Yu.I., et al. Experimental research of the diffraction pattern of radiation reflected from the retroreflector spherical glass satellite. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 1 (142), pp. 32–43 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-1-32-43>