

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 62-791, 621.373.826, 629.783, 621.384.3

РЕГИСТРАЦИЯ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ПРЕРЫВАНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДАМИ СВЕТОВОЙ ЗАВЕСЫ ИЗ МНОГОКРАТНОГО ПЕРЕОТРАЖЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А.И. Гладышев¹, Е.А. Щелоков², А.М. Телегин³

¹ Секция прикладных проблем при Президиуме РАН
Россия, 119330, г. Москва, пр-т Университетский, 64А

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

³ Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: tolyagladyshev@yandex.ru, riddick41666@mail.ru, talex85@mail.ru

Аннотация. Представлены математическая модель и структурная схема информационно-измерительной системы, построенной на основе эффекта прерывания микрометеороидами световой завесы из многократно переотраженных оптических лучей, сформированных линейкой светодиодов. Дано описание вариантов формирования световой завесы при различных углах хода оптического луча. Определено максимально допустимое расстояние между источником и приемником оптического излучения с учетом расстояния между плоскостями, значения коэффициента отражения зеркальных поверхностей, параметров регистрируемых микрометеороидов и внешних дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: микрометеороиды, информационно-измерительная система, оптические лучи, световая завеса, эффект прерывания

Введение

В работах [1, 2] предложен вариант базовой оптико-электронной информационно-измерительной системы (ИИС) регистрации и контроля параметров движения микрометеороидов, построенной на эффекте прерывания оптических лучей, формирующих плотную световую завесу. В основу системы положена конструкция, которая представляет собой две параллельные светоотражающие плоские поверхности и наборы узконаправленных световых излучателей и фотоприемников.

¹ Гладышев Анатолий Иванович, руководитель организации.

² Щелоков Евгений Алексеевич.

³ Телегин Алексей Михайлович, доцент, старший научный сотрудник.

Система оснащена микроконтроллером, линиями задержек и сумматорами, которые реализуют заданный алгоритм функционирования и производит аналого-цифровое преобразование сигналов с выходов фотоприемников с последующей цифровой обработкой. Светоизлучатели сфокусированы и ориентированы таким образом, чтобы создать зигзагообразный световой рисунок в плоскостях, ориентированных перпендикулярно плоскостям отражающих поверхностей и вектору ожидаемой траектории движения микрометеороидов. Фотоприемники регистрируют в заданных точках наличие и изменение амплитуды сигнала. Достоинством такой ИИС является простота конструкции, высокие надежность и быстродействие. Вместе с тем предложенная ИИС не учитывает ряд особенностей, связанных с ограничениями электронной компонентной базы, а также сложностями создания и особенностями функционирования прецизионных конструкций зеркальных поверхностей, матриц светоизлучающих и фотоприемных устройств [3, 4]. Для определения задач по улучшению потребительских и метрологических качеств системы в статье представлен вариант системы, учитывающий возможные ограничения значения коэффициента отражения зеркальных поверхностей.

Базовая модель системы

В базовой модели устройства ИИС предполагается, что в нее входят только «идеальные» устройства и материалы. В частности, неплоскостность зеркальной поверхности $\gamma=0$, коэффициент отражения $k_{отр}=1$.

Структурная схема базовой системы приведена на рис. 1.

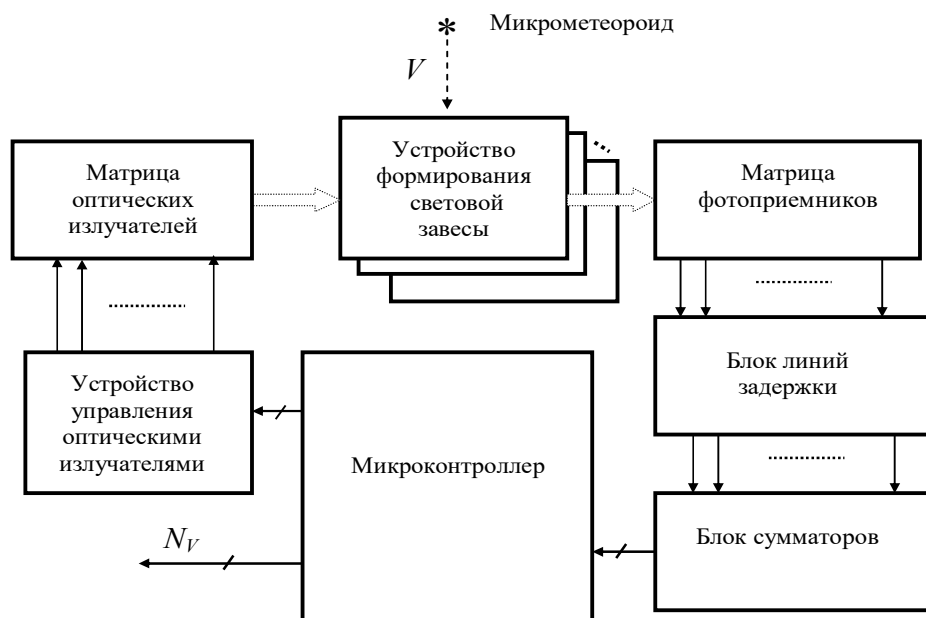


Рис. 1. Структурная схема базовой ИИС

Матрица оптических излучателей состоит из светодиодов с фокусирующей линзой, создающей световую плоскость, которая принимается фотоприемной матрицей. Микрометеороидное тело, пересекая световую завесу, вызывает изменение сигнала на чувствительном элементе, что приводит к изменению напряжения на выходе сумматора, вызванному отличающимся уровнем сигналов

на входе сумматора, поступающих с выходов фотоприемников и линии задержки. Количество завес может варьироваться от одной до n .

Например, для времени пролета объекта через четыре световые завесы примем значения $T_1 - T_4$ соответственно. Используя данные о времени, получим следующие соотношения:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{K - \sin \varphi}{-\cos \varphi} \right), \quad (1)$$

$$V = \frac{L_1}{(T_2 - T_1)} \frac{1}{\cos(\alpha)} = \frac{L_2}{(T_4 - T_3)} \frac{1}{\cos(\varphi + \alpha)}, \quad (2)$$

где α – угол наклона вектора скорости по отношению к плоскости расположения светодиодов, φ – угол наклона плоскостей третьей и четвертой систем, V – модуль проекции вектора скорости, $K = \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_3}$; L_1 , L_2 – расстояние между

соседними параллельными плоскостями (для простоты предлагается брать расстояния равными).

Для определения точных координат фиксации необходимо произвести расчет исходя из временных отметок исследуемого объекта на первой и третьей системе.

Тогда:

$$\Delta l = V(T_3 - T_1) \times \cos(\alpha), \quad (3)$$

где Δl – длина от нормали к плоскости первой системы до точки пересечения исследуемого объекта третьего элемента системы.

Зададимся следующими характеристиками системы: ω – расстояние между параллельными элементами устройства (первой и второй системой и третьей и четвертой).

Исходя из вышеизложенного можно определить координаты пересечения двух световых плоскостей (первой и третьей) по оси расположения систем исследуемыми объектами:

$$\Delta x = (\Delta l - 2\omega) \times \tg(\varphi), \quad (4)$$

$$\Delta x_1 = \Delta x - \Delta l \times \tg(\alpha), \quad (5)$$

где Δx – координата пересечения третьей системы, Δx_1 – координата пересечения первой системы.

Используя полученные данные, можно построить уравнение проекции вектора скорости исследуемых объектов на плоскость расположения фотодиодов устройства:

$$y = \frac{x(\Delta x - \Delta x_1)}{\Delta l} + \Delta x_1. \quad (6)$$

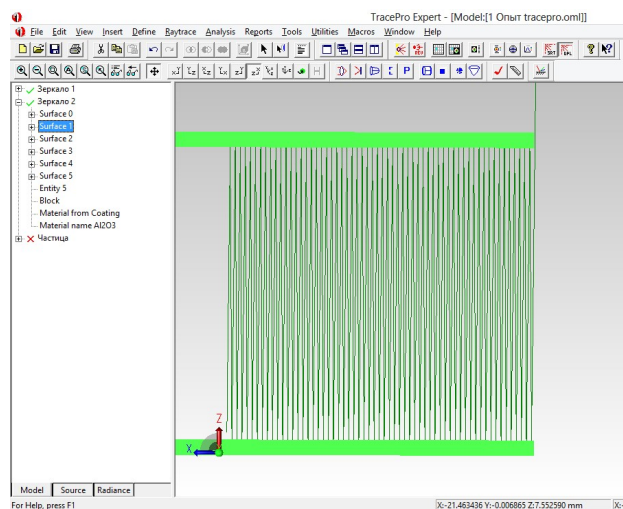
Для определения вектора скорости в пространстве необходимо наличие двух проекций вектора в ортогональных плоскостях. Для этого в систему вводится второй канал с аналогичным расположением рабочих компонентов, при этом смещенных на некоторое расстояние b относительно первого, а также расположенных под углом 90° относительно друг друга.

Таким образом, воспользовавшись известными математическими соотношениями, учитывая уравнения (1)–(6) и аналогичность двух устройств, получаем следующее уравнение движения исследуемого объекта:

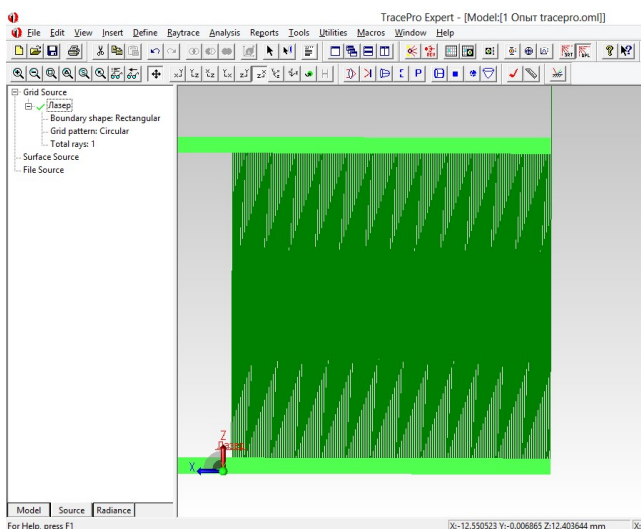
$$\frac{x}{\omega} = \frac{(y - \Delta x_1) \Delta l}{\omega(\Delta x - \Delta x_1)} = \frac{\Delta l_2 (z - \Delta x_3) + b(\Delta x_2 - \Delta x_3)}{\omega(\Delta x_2 - \Delta x_3)}, \quad (7)$$

где Δx_2 – координата пересечения третьей завесы для второго устройства; Δx_3 – координата пересечения первой завесы для второго устройства; Δl_2 – длина от нормали к плоскости первой завесы до точки пересечения исследуемого объекта третьего элемента системы для второго устройства.

Для сравнительного анализа завес была построена модель движения. На рис. 2 *а*, *б* представлены два варианта модели хода остронаправленного оптического луча лазера (идеальный случай), когда отсутствуют факторы, способные оказать влияние на его параметры. В этом случае формируется сплошная световая завеса, длина луча в которой не ограничена.



а



б

Рис. 2. Ход луча: *а* – для угла наклона лазера 89.5°; *б* – для угла наклона лазера 89.9°

Модель ИИС, учитывающая коэффициент отражения зеркал

В процессе исследования модифицированной модели было учтено, что максимально достижимый в настоящее время коэффициент отражения зеркальных поверхностей $k_{omrmax}=0,98$ [3–9]. Как видно из рис. 3, при заданном коэффициенте отражения затухание луча при расстоянии между зеркалами в 10 см и ширине пучка 1 мкм уже после прохода 5-сантиметровой зоны зеркальной поверхности составляет более 99 % (красная зона).

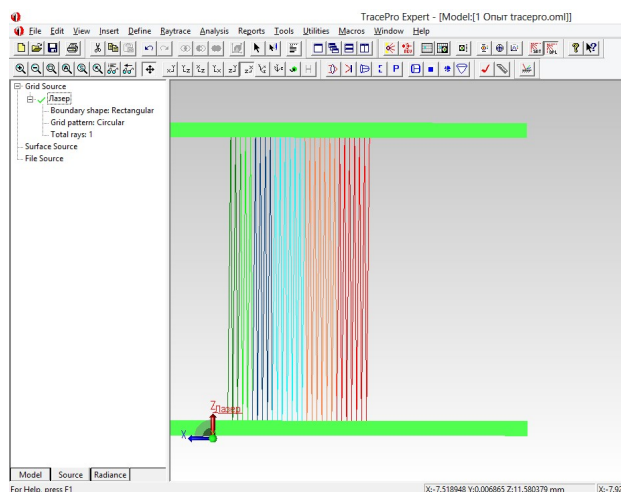


Рис. 3. Модель хода лазерного луча для зеркальных поверхностей с коэффициентом отражения, равным 98 %

Модифицированная система предоставляет возможность увеличить данную область, используя ячеичную структуру формирования световой завесы. Основная идея ячейки заключается в том, что в крайних точках луча, которые еще можно зарегистрировать современной электронной компонентной базой, достаточно устанавливать приемное устройство и продолжать создание световой завесы с помощью дополнительных источников лазерного излучения. На рис. 4 представлена полученная модель хода луча.

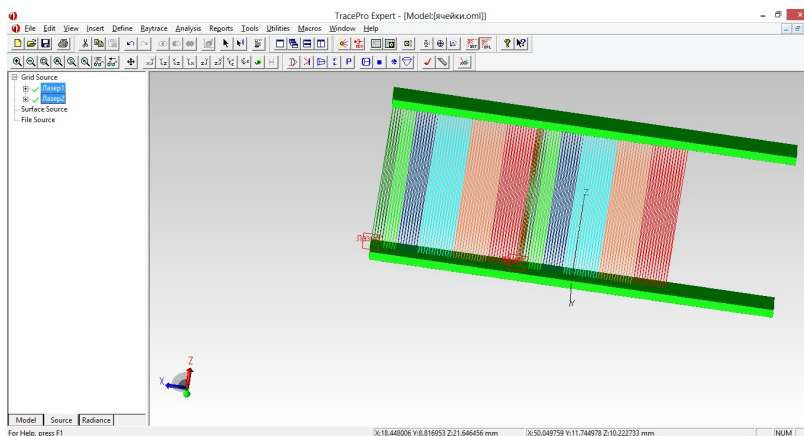


Рис. 4. Применение ячеичной структуры оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов

Для расчета максимальной рабочей зоны ячейки световой завесы необходимо определить угол хода луча с целью получения достоверной информации о факте пролета исследуемых объектов.

Сформируем случайный набор точек, находящихся в одной области со световой плоскостью. Примем за допущение следующие данные: ширина лазерного луча 1 мкм, расстояние между зеркальными поверхностями 0,1 м, размер частицы 10 мкм. Построим график вероятности регистрации факта пролета исследуемых объектов в зависимости от угла хода луча (рис. 5).

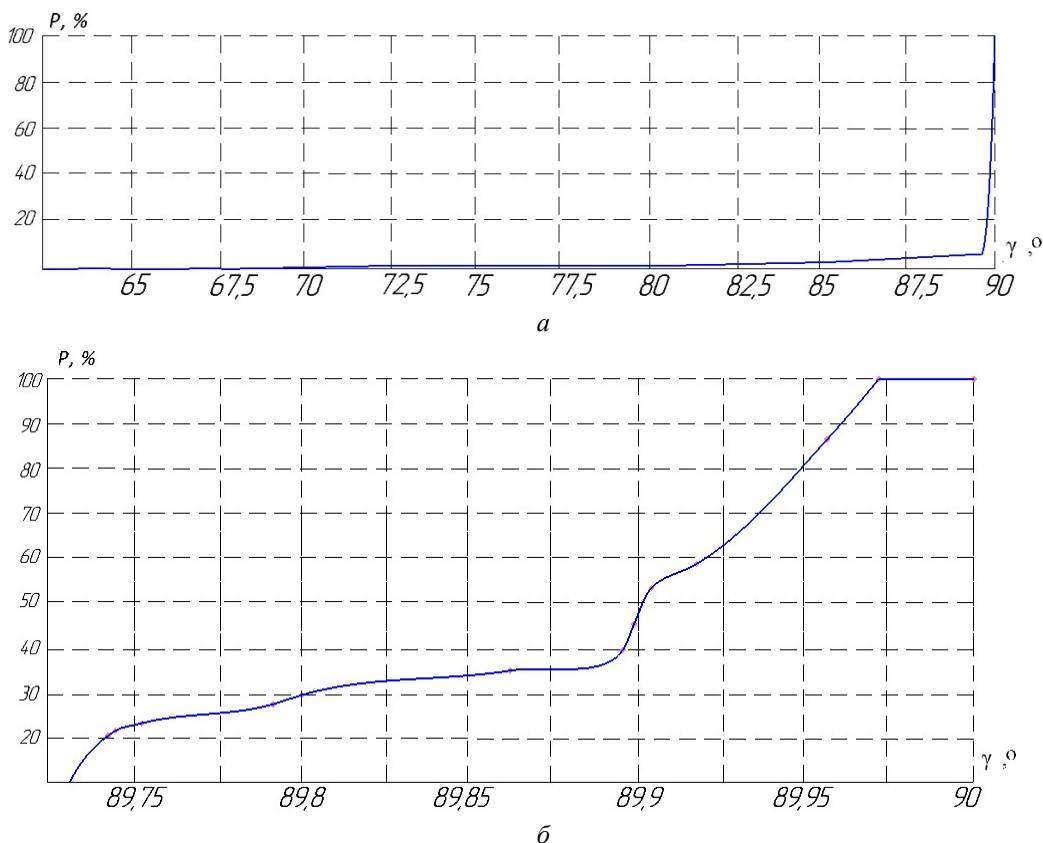


Рис. 5. График зависимости вероятности фиксации факта пролета исследуемого объекта через «световую плоскость»: а – для значений углов менее 89°; б – для значения углов, близких к 90°

Исходя из полученных результатов сформируем таблицу для определения максимальной рабочей зоны одной ячейки «световой завесы», при этом угол хода луча, при котором вероятность обнаружения исследуемых объектов будет составлять менее 25 %, учитываться не будет. Выходные данные представлены в таблице.

Проблемы пылевых частиц в космическом пространстве

Как видно из изложенного, решить проблему неидеальности зеркальных поверхностей возможно, однако кроме коэффициента отражения поверхности в условиях космического пространства существуют такие особенности, как пылевые частицы, которые также могут оседать на поверхности по ходу лазерного луча [8].

Результаты расчетов

Угол хода луча, °	Размер одной зоны (до первого переотражения), м	Максимальная длина рабочей зоны одной ячейки
89,7660000000	0,0004398258	0,0998404583
89,7840000000	0,0004084093	0,0927089147
89,8020000000	0,0003769929	0,0855773893
89,8200000000	0,0003455766	0,0784458808
89,8380000000	0,0003141603	0,0713143879
89,8560000000	0,0002827441	0,0641829089
89,8740000000	0,0002513279	0,0570514427
89,8920000000	0,0002199118	0,0499199877
89,9100000000	0,0001884958	0,0427885426
89,9190000000	0,0001570798	0,0356571059
89,9550000000	0,0001413718	0,0320913903
89,9713521126	0,0000785398	0,0178285420
90,0000000000	0,0000500000	0,0113500000

Для реализации реального случая на поверхности одного из зеркал, на пути луча, была смоделирована частица пыли размером 2 мкм (больше ширины пучка). Полученная модель представлена на рис. 6.

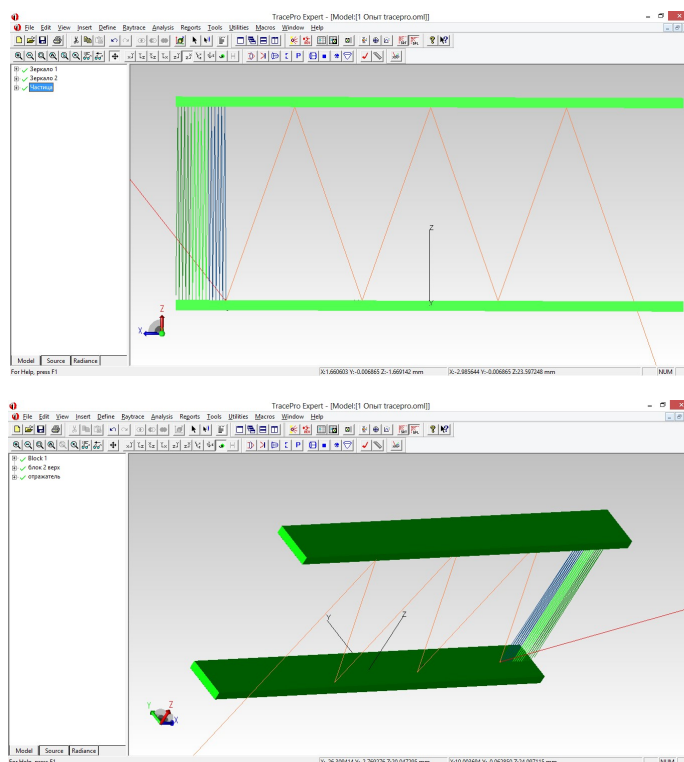


Рис. 6. Ход луча при наличии микрочастиц на поверхности зеркальной поверхности

Как видно из рис. 6, приведен наихудший случай, когда лазерный луч не полностью был поглощен или отражен частицей, а был разделен на 2 луча, один из которых поступил на приемное устройство, но вносил неточности получения данных ввиду отличающегося количества переотражений.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для компенсации погрешности ИИС, вызванной ограниченным значением коэффициента отражения зеркальных поверхностей, структура формирования световой завесы должна быть ячеистой. Кроме того, для повышения точности измерения скорости пылевых микрочастиц (микрометеороидов) необходимо использовать измерительную систему, состоящую из нескольких устройств формирования световых завес.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щелоков Е.А., Кулешова А.А. Бесконтактное определение параметров движения микрометеороидов на основе лазерных систем // Научные технологии. 2017. № 6. С. 28–31.
2. Щелоков Е.А. Метод и устройство для оценивания параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем // Вестник РГРТУ. 2016. № 56. С.131–135.
3. Zhukov A.O., Gladyshev A.I., Prokhorov M.E., Zaverzaev A.A. Processing and Analysis of Optical Non-Coordinate Information on Observed Objects // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Vol. 58, № 3. С. 281–290.
4. Абраменко Е.В., Гладышев А.И., Евенко А.В., Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Метод построения и обоснование основных ТТХ бортового аппаратного комплекса космических аппаратов для решения задач получения, передачи и обработки измерительной информации в оптическом диапазоне длин волн // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2017. № 2 (134). С. 26 – 31.
5. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Конспект лекций под ред. В.П. Вейко. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. 141 с.
6. Тимченко Е.В. Оптика лазеров. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013. 134 с.
7. Гришанов В.Н., Ойнонен А.А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. Т. 32, № 1. С. 24–35.
8. Kalaev M.P., Telegin A.M., Voronov K.E. etc. Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors // Computer Optics 2019. Vol. 43. Issue 5. P. 803–809.
9. Воронов К.Е., Григорьев Д.П., Телегин А.М. Обзор аппаратных средств для регистрации ударов частиц о поверхность космического аппарата (обзор) // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 3. С. 245–265.

Статья поступила в редакцию 19 января 2022 г.

REGISTRATION AND EVALUATION OF MICROMETEOROD PARAMETERS USING THE EFFECT OF MICROMETEOROIDS INTERRUPTING A LIGHT CURTAIN OF MULTIPLE RE-REFLECTED OPTICAL RAYS

A.I. Gladyshev¹, E.A. Shchelokov², A.M. Telegin³

¹ Section of Applied Problems at the Presidium of the RAS
64A, pr. University, Moscow, 119330, Russian Federation

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

³ Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva
34, Moscow highway, Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: tolyagladyshev@yandex.ru, riddick41666@mail.ru, talex85@mail.ru

Abstract. *A mathematical model and a block diagram of an information-measuring system based on the effect of interruption by micrometeoroids of a light curtain of multiple re-reflected optical rays formed by a line of LEDs are presented. The description of options for the formation of a light curtain at different angles of the optical beam is given. The maximum allowable distance between the source and receiver of optical radiation is determined, taking into account the distance between the planes, the reflection coefficient of mirror surfaces, the parameters of the recorded micrometeoroids and external destabilizing factors.*

Keywords: *micrometeoroids, information-measuring system, optical beams, light curtain, interruption effect*

REFERENCES

1. *Shchelokov E.A., Kuleshova A.A.* Non-contact determination of motion parameters of micrometeoroids based on laser systems // High technology. 6. 2017. Pp. 28–31.
2. *Shchelokov E.A.* Method and device for estimating the motion parameters of micrometeoroids based on optical systems // Bulletin of the Russian State Humanitarian University. 2016. 56. Pp. 131–135.
3. *Zhukov A.O., Gladyshev A.I., Prokhorov M.E., Zaverzaev A.A.* Processing and Analysis of Optical Non-Coordinate Information on Observed Objects // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Vol. 58(3). Pp. 281–290.
4. *Abramenko E.V., Gladyshev A.I., Evenenko A.V., Zhukov A.O., Zakharov A.I., Prokhorov M.E.* The method of constructing and substantiating the main performance characteristics of the on-board equipment complex of spacecraft for solving the problems of obtaining, transmitting and processing measurement information in the optical wavelength range // Defense Complex – Scientific and Technical Progress of Russia. 2 (134). Pp. 26–31.
5. *Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D.* The interaction of laser radiation with matter. Lecture notes edited by V.P. Veiko. St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2008. 141 p.
6. *Timchenko E.V.* Laser optics. Samara State Aerospace University, 2013. 134 p.
7. *Grishanov V.N., Oinonen A.A.* Modern laser measuring systems in the production cycle of space technology // Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2012. 32(1). Pp. 24–35.
8. *Kalaev M.P., Telegin A.M., Voronov K.E. etc.* Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors // Computer Optics 2019. Vol. 43. Issue 5. Pp. 803–809.
9. *Voronov K.E., Grigoriev D.P., Telegin A.M.* Review of hardware for registration of particle impacts on the surface of a spacecraft (review) // Uspekhi prikladnoi fiziki. 2021. V. 9(3). Pp. 245–265.

¹ Anatoliy I. Gladyshev.

² Evgeniy A. Shchelokov.

³ Aleksey M. Telegin.