

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Современные методы преобразования параметров движения микрометеороидов совершенствуются в направлении бесконтактного получения информации взамен регистрации путем взаимодействия с мишенью. Цель статьи – продемонстрировать возможность создания преобразователей параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем с точностью измерений не хуже реализованных контактных методов.

Материалы и методы. Предлагаются новые методы реализации устройств, основанные на бесконтактном исследовании параметров движения объектов, а также анализируется их погрешность и достоверность измерений.

Результаты. Показано, что при различных характеристиках выбранных радиоэлементов и геометрических параметров устройства можно варьировать необходимыми значениями погрешностей измерений и вероятностью получения информации.

Выводы. Предложен метод уменьшения погрешности измерений, вносимый методической погрешностью, за счет введения дополнительных элементов в предлагаемое устройство.

Ключевые слова: микрометеороид, погрешность измерений, достоверность, бесконтактные методы.

Е. А. Shchelokov

A METHOD OF MEASUREMENT PRECISION AND INDEX VALIDITY IMPROVEMENT FOR AN OPTOELECTRONIC CONVERTER OF MICROMETEOROIDS MOTION PARAMETERS

Abstract.

Background. Modern methods of converting the motion parameters of micrometeoroids move in the direction of non-contact information acquisition, instead of recording by interacting with the target. The purpose of the article is to demonstrate the possibility of creating converters of motion parameters of micrometeoroids based on optical systems with measurement accuracy no worse than implemented contact methods.

Materials and methods. New methods are proposed for the implementation of devices, based on a contactless study of the parameters of motion of objects, and their error and measurement reliability are analyzed.

Results. Article is shown that for various characteristics of the selected radio elements and geometric parameters of the device, it is possible to vary the necessary values of the measurement errors and the probability of obtaining information.

Conclusion. A method for reducing the measurement error introduced by the methodological error due to the introduction of additional elements in the proposed device is proposed.

Keywords: micrometeoroid, measurement inaccuracy, reliability, contactless methods.

Введение

В работе авторов [1] была построена математическая модель движения микрометеороидов при пересечении «световых плоскостей» с рядом допущений:

- 1) отсутствует факт влияния свойства переотражения лазерного излучения от различных типов поверхности;
- 2) не рассмотрены возможные погрешности в полученных результатах измерения.

Рассмотрим случай, когда устройство основано на переотражениях лазерного луча от зеркальных поверхностей, при котором частицы одновременно пролетают через «световую плоскость» (плоскость, которая образуется в результате многократного переотражения лазерного луча от двух параллельных зеркальных поверхностей (рис. 1)), но одна пролетает в начале хода луча (до первого переотражения), а вторая – в конце хода луча (после последнего переотражения, перед попаданием на светочувствительный элемент).

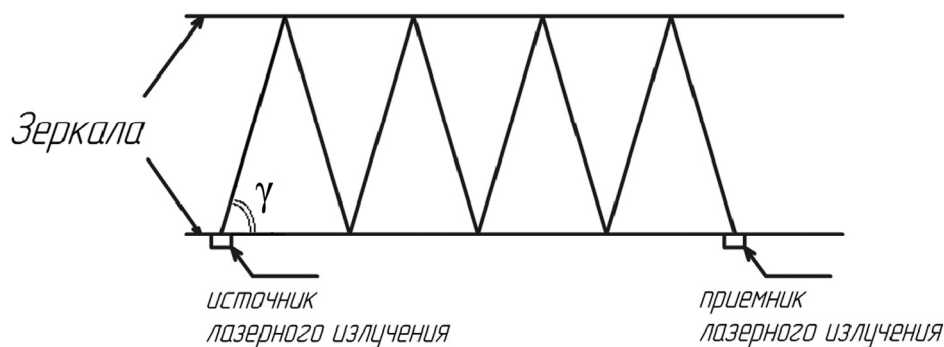


Рис. 1. Траектория движения лазерного луча

Получаем, что факт пролета через «световую плоскость» частицы, переместившейся возле светочувствительного элемента, будет зафиксирован достоверно. При этом частица, пролетевшая в начале хода луча, будет зафиксирована только после пропадания сигнала на светочувствительном элементе, а значит, будет зависеть от расстояния, которое пройдено лучом до момента его приема фотодиодом. В рассматриваемом случае время, пройденное лучом до фиксации факта пролета частицы, будет определяться следующим образом:

$$\Delta t = \frac{h}{c} \frac{n}{\sin(\gamma)}, \quad (1)$$

где Δt – измеряемое время; H – расстояние между зеркалами; γ – начальный угол хода луча; n – количество переотражений; c – скорость света.

В качестве примера вносимой погрешности для удобства расчетов примем $\gamma = 89,9^\circ$, количество переотражений 100, а расстояние между зеркальными поверхностями 0,1 м. В приведенном случае, подставив значения в (1), получим отклонение во времени измерений факта пролета частицы в $\Delta t \approx 33$ нс (что превышает на три порядка необходимое значение быстродействия, указанное в [2]). То есть сам метод ограничивает возможности получения информации о направлении движения и скорости, но допускает анализ фактов пролета частицы с незначительным временем отклонения.

Рассмотрим случай, когда устройство основано на сочетании светодиодных и фотодиодных матриц, при котором частицы одновременно пролетают через «световую плоскость», но одна пролетает в начале хода луча (в непосредственной близости к светодиодам), а вторая – в конце хода луча (перед попаданием на светочувствительный элемент).

Получаем, что частица, пролетевшая возле светочувствительного элемента, будет зафиксирована достоверно. При этом частица, пролетевшая в начале хода луча, будет зафиксирована только после пропадания сигнала на светочувствительном элементе, а значит, будет зависть от расстояния, которое пройдено лучом до момента его попадания на чувствительный элемент. В рассматриваемом случае время, пройденное лучом до получения факта пролета частицы, будет определяться как

$$\Delta t = \frac{H}{c}. \quad (2)$$

Введем допущение, что расстояние между излучателем и приемником $H = 0,1$ м. В приведенном случае, подставив значение в (2), получим максимальное отклонение во времени измерений факта пролета частицы в $\Delta t \approx 330$ пс. В сравнении с предыдущим методом погрешность ниже, однако она все так же не позволяет достоверно получать информацию о параметрах движения микрометеороидов.

В обоих случаях получаем невозможность измерения скорости и направления движения, т.е. невозможность реализации поставленной задачи.

1. Методы увеличения точности измерений

Для увеличения точности измерений можно воспользоваться следующими вариантами исполнения устройства:

1. Для увеличения точности измерений времени преобразования методом переотражения от зеркальных поверхностей достаточно установить дополнительную «световую плоскость», отличающуюся направлением движения лазера. В таком случае можно получить систему из двух уравнений, исходя из которых легко получить достоверное значение времени пересечения световой плоскости исследуемым объектом:

$$T1 = t + \frac{H}{\sin(\gamma)} \frac{n_1}{c}; \quad (3)$$

$$T2 = t + \frac{\frac{H}{\sin(\gamma)}(n - n_1)}{c}. \quad (4)$$

где n_1 – количество переотражений в одной «световой плоскости»; t – действительное время пролета частицы; $T1, T2$ – время пролета объекта, полученное устройством.

Решая систему уравнений (3), (4) с двумя неизвестными, получаем

$$T2 = \frac{T2 + T1 - \frac{nH}{c \cdot \sin(\gamma)}}{2}. \quad (5)$$

2. Для увеличения точности измерений времени фиксации факта пролета объекта методом, основанным на светодиодных-фотодиодных матрицах, достаточно установить дополнительную «световую плоскость», отличающуюся направлением излучения (противонаправлено первоначальной «световой плоскости»). В таком случае будут получены два результата измерения:

$$T1 = t + \frac{l}{c}; \quad (6)$$

$$T2 = t + \frac{H - l}{c}, \quad (7)$$

где l – расстояние, на котором пролетела частица до первой плоскости.

Решая систему уравнений (6), (7) с двумя неизвестными, получаем

$$t = \frac{T2 + T1 - \frac{H}{c}}{2}. \quad (8)$$

Как видно, для обоих методов (уравнения (5), (8)) существует возможность устранить влияние погрешности метода, однако при этом усложняется конструкция устройства.

2. Инструментальная погрешность

Устранив влияние методической погрешности, введя дополнительные элементы в устройства, мы увеличиваем неточность измерений. Данная неточность связана с инструментальной погрешностью, которая зависит от быстродействия каждого элемента предлагаемого устройства.

Таким образом, проведя анализ современных вычислительных устройств и других элементов устройства, которые могут привести к инструментальной погрешности, получили результаты, приведенные в табл. 1 (в данной таблице приведены наиболее подходящие радиоэлементы для устройства, обеспечивающие максимальное быстродействие).

Как видно из табл. 1, наибольшую погрешность вносит светочувствительный элемент (фотодиод). Поскольку его быстродействие составляет 100 пс, соответственно вносимая погрешность будет определяться внесением соответствующей погрешности в каждое измерение в размере 200 пс, что

необходимо учитывать при получении каждой временной отметки факта пролета объекта. Так как быстродействие компаратора выше быстродействия фотодиода, его можно не учитывать.

Таблица 1

Быстродействие радиоэлектронных компонентов

Наименование	Производитель	Быстродействие	Источник
Процессор «Эльбрус-8С»	Объединенная приборостроительная корпорация (Россия)	4 пс	[3]
Фотодиод PD24-005-NS	ООО «АИБИ» (Россия)	100 пс	[4]
Компаратор НМС675LP3Е	Analog device	85 пс	[5]

Дополнительно вносится погрешность обработки микропроцессором, которая составляет 4 пс за такт, что составляет 2 % от необходимого быстродействия для получения времени факта пролета частиц размером 10 мкм (в соответствии с поставленной целью в [2]). Данную погрешность необходимо учитывать в результатах измерений.

Однако учитывая возможную деградацию компонентов, невозможно учесть случайные погрешности, которые будут возникать со временем. Данную погрешность невозможно отразить в результатах измерений.

3. Вероятность обнаружения исследуемых объектов

Поскольку заранее такие параметры, как функция корреляции и плотность распределения вероятности, неизвестны, то оценка вероятности пролета микрометеороида непосредственно через элемент «световой плоскости» может быть получена лишь после проведения измерений опытным путем. Для предварительной оценки необходимого числа отсчетов можно допустить, что исследуемые объекты пролетают через устройство со случайными координатами пересечения плоскостей устройства. Для таких объектов плотность распределения определена методом статистических испытаний Монте-Карло путем компьютерного моделирования процесса измерений.

Для каждого из углов первоначального положения лазера γ было построено множество моделей (для измерений от 10 до 10000 точек), в каждом из которых вычислялось количество попаданий частицы непосредственно в элемент «световой плоскости» относительно частиц, попавших в плоскость устройства (N). Приняв допущение, что вероятность обнаружения объекта одинакова для каждого звена «световой плоскости», получим следующие условия:

$$y(x) = \begin{cases} x \cdot \tan(\gamma), & 0 < x < \frac{h}{\tan(\gamma)}, \\ 2h - x \cdot \tan(\gamma), & \frac{h}{\tan(\gamma)} < x < 2 \frac{h}{\tan(\gamma)}, \end{cases} \quad (9)$$

где h – расстояние между зеркалами; γ – начальный угол наклона лазерного излучения; x, y – координаты пересечения «световой плоскости».

На рис. 2 изображен фрагмент полученной световой плоскости для ($y = \arctan\left(\frac{h}{5 \cdot 10^{-6}}\right)$ и $h = 0,1$).

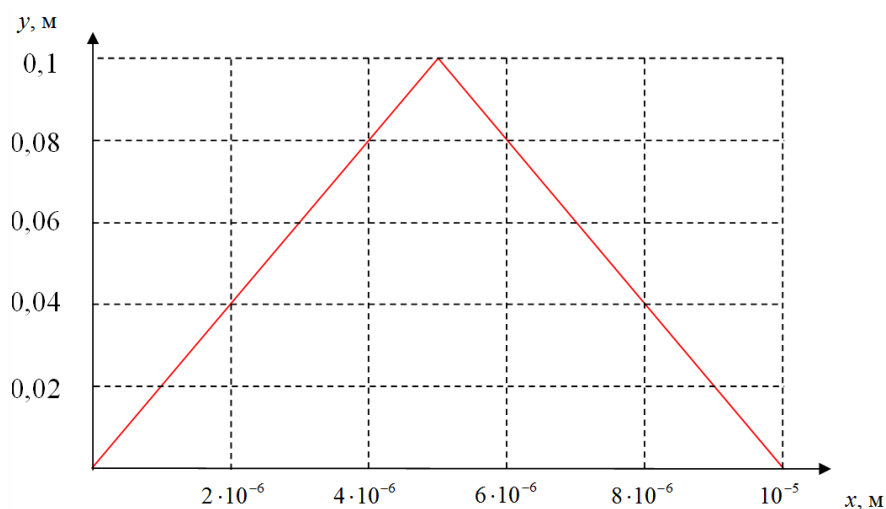


Рис. 2. Фрагмент световой плоскости в увеличенном размере

По соответствующему алгоритму был задан массив из множества точек (от 10 до 10000) в различных случайных координатах, а также сопоставлено уравнение кривой «световой плоскости» и положения полученных точек с учетом того, что пересечением считалось положение точек, соответствующее действительному значению с допускаемым отклонением в половину размера исследуемого объекта (5 мкм).

В результате из полученных случайным образом координат точек был сформирован график и получены значения вероятности соответствия факта пролета частицы и факта ее регистрации для различных значений первоначального угла положения лазера (рис. 3).

Заключение

Исследованы различные виды погрешностей, оказывающие влияние на результаты измерений оптоэлектронными преобразователями параметров движения микрометеороидов.

Предложен метод, позволяющий устранить методическую погрешность.

Рассмотрена и предложена современная электронная компонентная база, позволяющая достигнуть наибольшего быстродействия оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов, позволяющая достичь инструментальной погрешности в 2 %.

Показано, что при различном значении угла наклона лазера вероятность достоверной регистрации факта пролета объекта варьируется (при этом произведен расчет необходимого угла для получения 100 % вероятности обнаружения объектов размером более 10 мкм и получено значение 89,97136°).

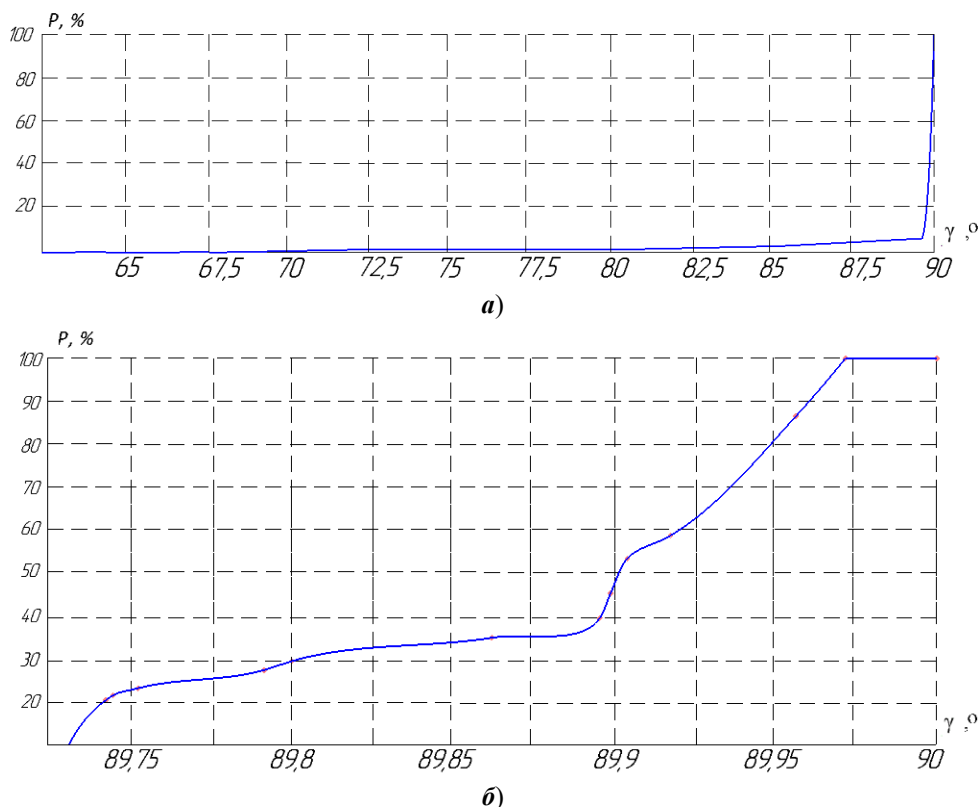


Рис. 3. График зависимости вероятности фиксации факта пролета исследуемого объекта через «световую плоскость»:
а – для значений углов менее 89°; **б** – для значения углов, близких к 90°

Библиографический список

1. Щелоков, Е. А. Метод и устройство для оценивания параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем / Е. А. Щелоков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 56. – С. 131–135.
2. Щелоков, Е. А. Бесконтактное определение параметров движения микрометеороидов на основе лазерных систем / Е. А. Щелоков, А. А. Кулешова // Наукоемкие технологии. – 2017. – № 6. – С. 28–31.
3. Tadviser.ru. Эльбрус-8С / МЦСТ. – URL: <http://www.tadviser.ru/index.php/> Продукт:Эльбрус-8С (дата обращения: 05.04.2020).
4. ООО «АИБИ», Быстродействующий фотодиод PD24-005-HS / ООО «АИБИ». – URL: http://www.ibsg.ru/PDF_Data/PD24-005-HS_RU.pdf (дата обращения: 05.04.2020).
5. Analog Devices, Быстродействующие компараторы (Задержка распространения <100 нс) / Analog Devices. – URL: <https://www.analog.com/ru/products/analog-functions/comparators/high-speed-comparators-less-than-100ns-propagation-delay.html> (дата обращения: 05.04.2020).

References

1. Shhelokov E. A. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University]. 2016, no. 56, pp. 131–135. [In Russian]

2. Shhelokov E. A., Kuleshova A. A. *Naukoemkie tehnologii* [Science intensive technologies]. 2017, no. 6, pp. 28–31. [In Russian]
3. *Tadviser.ru. Jel'brus-8S*. MCST. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:Jel'brus-8S> (accessed 05.04.2020).
4. *ООО «АИБИ», Bystrodejstvujushhij fotodiod PD24-005-HS* [LLC “AIBI”, High-speed photodiode PD24-005-HS]. ООО «АИБИ». Available at: http://www.ibsg.ru/PDF_Data/PD24-005-HS_RU.pdf (accessed 05.04.2020). [In Russian]
5. *Analog Devices, Bystrodejstvujushhie komparatory (Zaderzhka rasprostraneniya <100 ns)* [Analog Devices, High-speed comparators (Propagation delay <100ns)]. Analog Devices. Available at: <https://www.analog.com/ru/products/analog-functions/comparators/high-speed-comparators-less-than-100ns-propagation-delay.html> (accessed 05.04.2020). [In Russian]

Щелоков Евгений Алексеевич
аспирант, Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева (Россия,
г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

Shchelokov Evgeniy Alekseevich
Postgraduate student, Samara National
Research University (34 Moskovskoye
highway, Samara, Russia)

E-mail: Riddick41666@mail.ru

Образец цитирования:

Щелоков, Е. А. Метод повышения точности измерений и показателей достоверности измерений оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов / Е. А. Щелоков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 78–85. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-8.