

**Научная аппаратура для исследования высокоскоростных микрочастиц
(обзор)***К. Е. Воронов, А. М. Телегин, Цзян Лисян, Цзяо Цзилун*

Описана конструкция научной аппаратуры для регистрации высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) ионизационного типа. Приведено описание оригинальной конструкции электродов для сбора ионов в датчиках высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа. Приведены результаты испытаний научной аппаратуры на ускорители высокоскоростных микрочастиц с оптическим каналом синхронизации для устранения ложного срабатывания цифрового компаратора от помех, вызванных схемами управления ускорителя.

Ключевые слова: микрометеороиды, космический мусор, регистрация, научная аппаратура.

Ссылка: Воронов К. Е., Телегин А. М., Цзян Лисян, Цзяо Цзилун // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 594.

Reference: K. E. Voronov, A. M. Telegin, Jiang Lixiang, and Jiao Jilong, Usp. Prikl. Fiz. **7** (6), 594 (2019).

Введение

В околоземном космическом пространстве находится большое число твердых частиц, различающиеся своим происхождением и параметрами. К ним относятся микрометеороиды и частицы космического мусора [1–3], при этом скорости таких микрочастиц доходят до десятков км/с.

При соударении таких высокоскоростных микрочастиц с поверхностью космического аппарата (КА) наблюдаются различные эффекты, оказывающие негативное, а часто и разрушительное влияние на функционирование космических аппаратов [4–11]:

- поверхностная эрозия и деградация, приводящая к изменению тепловых, оптических или электрических свойств;
- пробивание космических стенок, приводящее к структурным повреждениям внутренних подсистем:
 - разрыв кабелей или тросов;
 - короткие замыкания;
 - повреждение CCD-матриц;
 - полное разрушение космического аппарата;
 - электромагнитные помехи;
 - стимуляция электроразряда при наличии поверхностного заряда на КА;
 - световое излучение.

В тоже время эти эффекты могут быть использованы при изготовлении датчиков для регистрации высокоскоростного воздействия

Воронов Константин Евгеньевич¹, директор института космического приборостроения, доцент, к.т.н.

Телегин Алексей Михайлович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Цзян Лисян², профессор.

Цзяо Цзилун², старший инженер.

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет).

Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34.

E-mail: voronov.ke@ssau.ru; talex85@mail.ru

² Пекинский институт инженерии космического пространства.

Китай, г. Пекин, район Хайдянь, улица Ю-И, № 104.

E-mail: rs_liu1@sina.com

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2019 г.

© Воронов К. Е., Телегин А. М., Цзян Лисян, Цзяо Цзилун, 2019

микрочастиц на КА, что позволяет фиксировать момент их возникновения на космическом аппарате, а значит, предсказать причины возможной деградации элементов поверхности, выхода из строя приборов и систем, начала разрушения КА.

Изучением процессов при высокоскоростном столкновении занимались и занимаются ученые и инженеры всего мира. Здесь переплетаются такие области науки, как физика взрыва, физика твердого тела, квантовая механика, оптика и многие другие дисциплины. Для высокоскоростного воздействия характерно краткосрочность, точечное воздействие и сложность постановки повторяемого эксперимента.

С точки зрения регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора), исследователей интересует в основном масса, скорость и их элементный состав. Масса и ско-

рость (кинетическая энергия) интересны в явлениях пробивания экранов космических аппаратов, деградации элементов поверхности. Исходя из величины скорости микрочастицы, можно предсказать характер ее происхождения [10], а именно, от 7 до 11 км/с – это космический мусор, от 11 до 72 км/с – это микрометеороиды. Элементный состав необходим для более точного определения происхождения высокоскоростной микрочастицы.

При высокоскоростном ударе микрочастицы по мишени в виде полубесконечной преграды происходит процесс ионнообразования и выброс плазмы в окружающее пространство, распространения ударных волн в мишени, выброс нейтрального газа, образование кратера, излучения радио и оптических волн в окружающее пространство, что отражено на рис. 1. Все эти эффекты широко используются для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора.

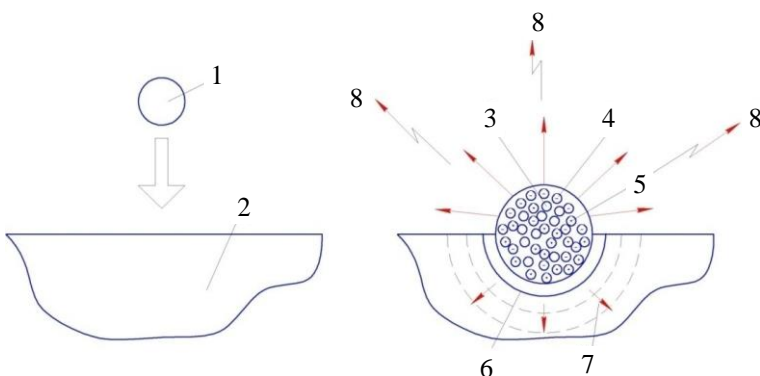


Рис. 1. Физические эффекты при высокоскоростном ударе: слева представлен момент до удара, справа момент удара: 1 – микрочастица, 2 – мишень, 3 – нейтральный газ, 4 – электроны, 5 – ионы, 6 – кратер, 7 – ударные волны, 8 – электромагнитное излучение (оптическое и радио).

Описание научной аппаратуры

В Институте космического приборостроения Самарского университета выполнена разработка и изготовлена научная аппаратура,

предназначенная для регистрации и исследования параметров высокоскоростных микрочастиц с использованием ионизационного принципа измерения. Её внешний вид и структурная схема представлены на рис. 2–4.



Рис. 2. Фотография научной аппаратуры в вакуумной камере ускорителя микрочастиц.



Рис. 3. 3D-модель научной аппаратуры.

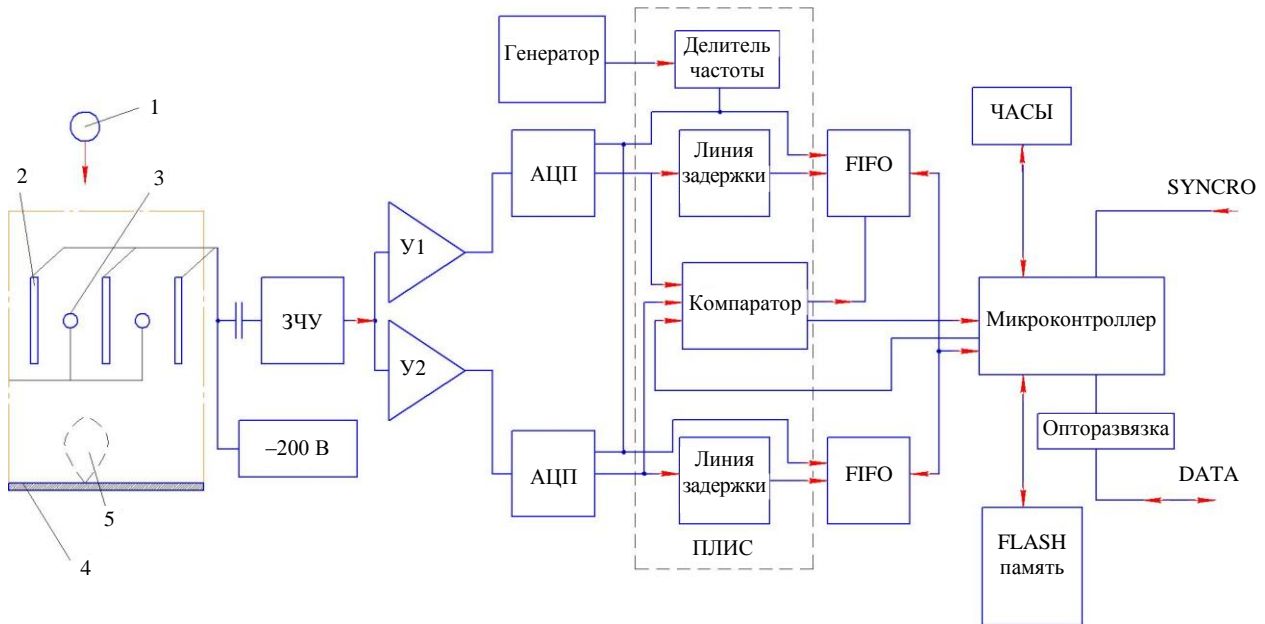


Рис. 4. Структурная схема измерительного модуля научной аппаратуры: 1 – микрочастица; 2 – измерительный электрод; 3 – электрод с 0 потенциалом; 4 – мишень; 5 – образовавшаяся после удара плазма; ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель; У – усилитель.

В основе ионизационного метода измерения физических параметров микрочастиц при высокоскоростном ударе лежит явление образования и эмиссии заряженных частиц (ионов, электронов) вещества ударника и мишени [12, 13].

Рассмотрим более подробно конструкцию измерительного модуля научной аппаратуры, опустив рассмотрение принципа работы служебных модулей (модуля формирования высокого и низкого напряжений.)

Измерительный модуль научной аппаратуры состоит из двух блоков: первичного преобразователя (приемника ионов) и блока обработки. В первичном преобразователе происходит процесс ионообразования, сбор ионов и усиление принимаемого сигнала.

В космическом пространстве микрометеороиды и частицы космического мусора в большинстве случаев имеют некоторый поверхностный заряд, который появляется вследствие воздействия на них факторов космического пространства (электронов, протонов, фотоэмиссионных процессов на поверхности и т. д.). Поэтому при пролете заряженной микрочастицы 1 через измерительные электроды 2 на эти электроды наводится заряд, пропорциональный заряду и скорости частицы.

Приемник ионов преобразует наведенный заряд в импульс тока. Форму импульса тока

можно рассчитать с использованием теоремы Шокли-Рамо [14]:

$$i_k(t) = Q(\vec{V} \vec{E}_k),$$

где \vec{E}_k – эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд Q в момент времени t , рассчитанная по следующей схеме: заряд удалён, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0, $(\vec{V} \vec{E}_k)$ – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

Проведенное численное моделирование [15] процесса пролета микрочастицы через приемник ионов показало, что форма наведенного импульса может быть как в виде «одногогорбого» импульса, так и в виде «двугорбого» импульса. «Двугорбый» появляется, когда микрочастица пролетает близко к электроду с нулевым потенциалом.

После пролета измерительных электродов микрочастица ударяется в мишень 4, при этом в зоне контакта микрочастицы и мишени происходит образование положительно заряженных ионов и электронов 5. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды 2 через фильтр подается напряжение порядка минус 200 В. В результате влия-

ния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, сигнал с которых усиливается с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ). Выход ЗЧУ подключен к двум разным каналам усиления для того, чтобы имелась возможность одновременно проводить измерения малых и больших сигналов. Сигналы в каждом из каналов оцифровываются с помощью АЦП конвейерного типа и записываются в FIFO-память, из которой информация считывается микроконтроллером. Для определения момента удара микрочастицы в мишень (появления сигнала на выходе ЗЧУ) используется цифровой компаратор, выполненной на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Порог срабатывания цифрового компаратора регулируется с использованием микроконтроллера. На ПЛИС также реализована задержка сигнала между АЦП и FIFO для того, чтобы цифровой компаратор успел сработать и зафиксировать предысторию сигнала перед его срабатыванием.

В качестве системы электродов в первичном преобразователе – приемнике ионов – обычно используют металлические нити или пластины [11]. Согласно [11], система электродов, выполненная из нитей, обладает высокой прозрачностью для пролета высокоскоростной микрочастицы, но малой эффективностью сбора ионов за счет небольшой поверхности металлической нити. Пластины облают хорошим коэффициентом сбора ионов, но большой собственной емкостью, что приводит к снижению коэффициента усиления приемного тракта.

Особенностью нашей разработки является новая конструкция системы электродов приемника ионов (см. рис. 5), которая сочетает преимущества обоих типов электродов (нитей и пластин). Измерительный электрод выполняется из пластины, а электрод с нулевым потенциалом выполняется в виде нити. Анализ конструкции показал, что входная емкость приемника ионов уменьшилась примерно на 20 %, причем без уменьшения площади и эффективности сбора ионов. В нашей конструкции металлические нити выполнены из вольфрама, а пластины изготовлены из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита с закороченными между собой обкладками;

ширина каждой пластины – 6 мм, толщина – 1 мм и длина – 192 мм.



Рис. 5. Система электродов научной аппаратуры.

Описание и обсуждение результатов эксперимента

Связь между конкретными параметрами высокоскоростных микрочастиц и регистрируемым прибором параметрами устанавливается в результате проведения калибровочных испытаний. Подобные испытания обычно производятся на ускорителях высокоскоростных микрочастиц и более подробно методика эксперимента рассмотрена в работах [13, 16, 17].

В нашем ускорителе использовались микрочастицы ПАП-1 с размерами от 1 до 5 мкм. Ускоритель состоит из инжектора частиц, электростатического ускорителя, электродинамического ускорителя и вакуумной камеры. В инжекторе микрочастицы заряжаются до некоторого положительного заряда, далее под действием постоянного электрического поля микрочастица ускоряется и влетает в электродинамический ускоритель, где происходит дополнительное ускорение частицы под действием переменного электрического поля. Для каждой микрочастицы в электродинамическом ускорителе формируется индивидуальный закон управления ускорителя.

При работе научной аппаратуры на входе ЗЧУ наводятся импульсные помехи, связанные с переключением ускоряющего напряжения (10–15 кВ) в ускорителе микрочастиц. Для предотвращения случайного срабатывания модуля измерения по помеховому сигналу ис-

пользуется сигнал синхронизации, передаваемый по оптоволокну с системы управления ускорителя. Данный сигнал блокирует работу измерительной части научной аппаратуры на время работы переключателей напряжения.

Для представления экспериментальных данных в наглядном виде была написана программа, скриншоты которой представлены на рис. 6. Программа отображает записанные импульсы напряжения в графическом виде.

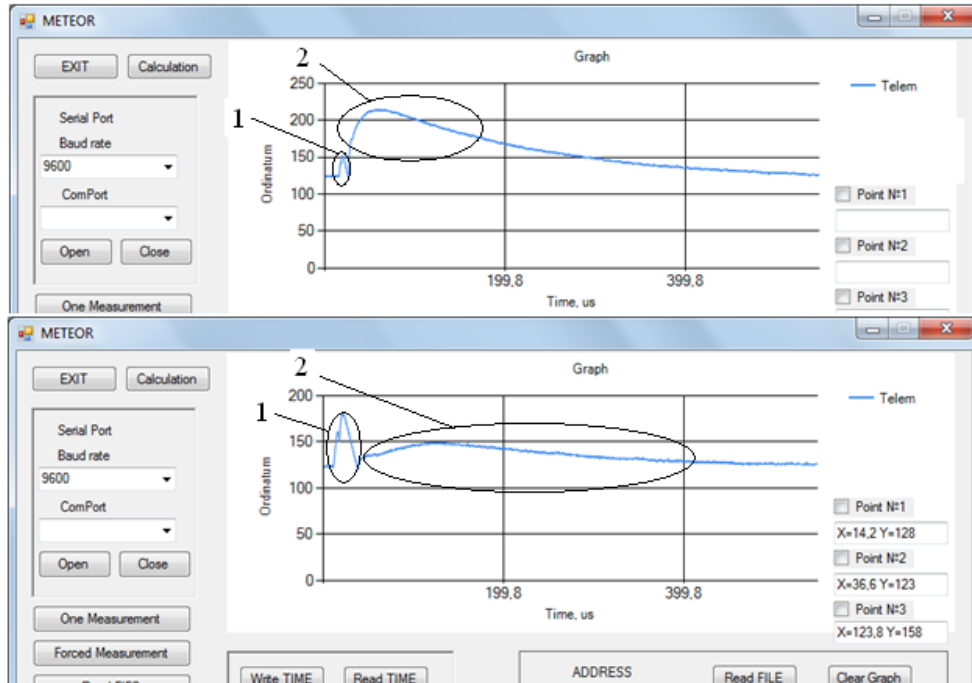


Рис. 6. Скриншоты программы: 1 – наведенный импульс; 2 – ионизации импульс.

Согласно полученным данным (рис. 6), сигнал от высокоскоростной микрочастицы состоит из наведенного (1) и ионизационного (2) импульсов. Была зарегистрирована «одногорбая» и «двугорбая» форма наведенного импульса, что согласуется с проведенными ранее расчетами [15].

Скорость микрочастицы оценивалась по длительности наведенного импульса. Общее количество образовавшихся ионов пропорционально площади под кривой ионизационного импульса согласно [16]:

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{\max}} U[i] \Delta T,$$

где i – номер отсчета; $U[i]$ – значение i -отсчета; ΔT – шаг дискретизации; N_{\max} – максимальное количество отсчетов.

Массу микрочастиц можно оценить согласно данным, полученных с ускорителя микрочастиц, согласно [16]:

$$m = \rho \frac{4\pi}{3} \left(\frac{3\varepsilon\varepsilon_0 E_n}{\rho Q/m} \right)^3,$$

где ρ – априори известная или заданная плотность микрочастицы; ε – диэлектрическая проницаемость материала частицы, $E_n = 2 \times 10^9$ В/м – поверхностная напряженность электрического поля; Q/m – отношение заряда микрочастицы к его массе, измеряется согласно методике, приведенной в работе [16].

Была проведена серия экспериментов с мишенями из различного материала (медь, нержавеющая сталь и АМГ-6).

Часто для установления связи между параметрами ускоренной микрочастицы и суммарным зарядом ионов используется простая формула [11]:

$$Q^+ = C_1 m^\alpha V^\beta,$$

где $\alpha = 0,9 \pm 0,1$, β , C_1 – постоянные, зависящие от свойств материала мишени, ударника и конструкции ионизационного детектора; m , V – масса и скорость частицы при ударе соответственно.

Результаты исследования и полученные расчетные соотношения приведены на рис. 7.

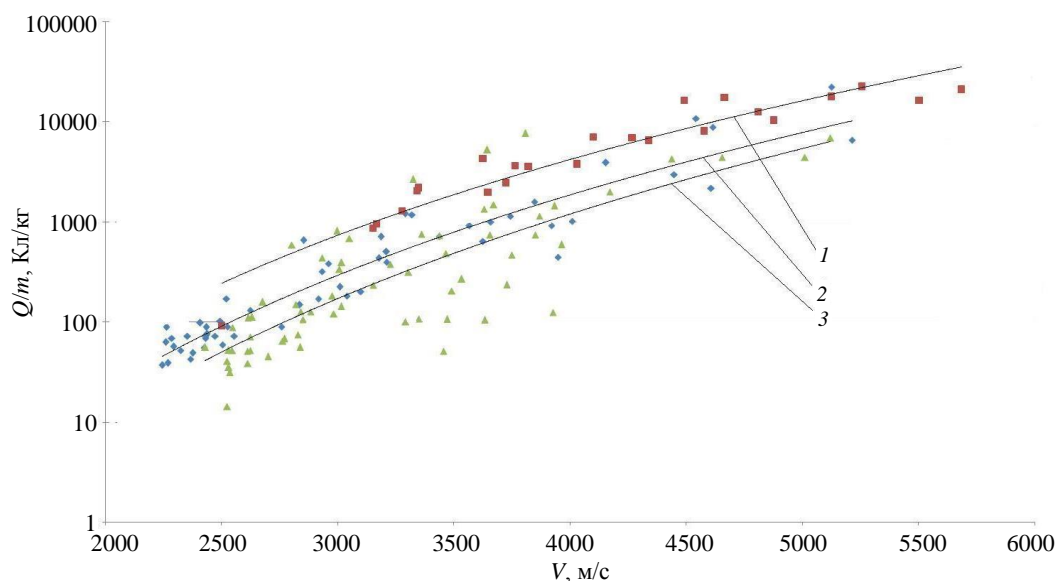


Рис. 7. Графики зависимости Q^+/m от V : 1 – мишень из меди, отношение общего заряда собранных ионов к массе микрочастицы $Q^+/m = 6 \times 10^{-19} \times V^{6,08}$; 2 – мишень из нержавеющей стали ЭИ878М, $Q^+/m = 1 \times 10^{-20} \times V^{6,48}$; 3 – мишень из АМГ6, $Q^+/m = 6 \times 10^{-22} \times V^{6,75}$.

Заключение

Анализ полученных данных показал, что разработанная комбинированная система электродов для датчиков ионизационного типа позволяет сохранить большую площадь сбора ионов и при этом снизить входную емкость научной аппаратуры.

При более высокой плотности материала мишени наблюдается более высокое давление во фронте ударной волны, более высокая температура и большая степень ионизации материала мишени и ударника в зоне удара (кратера). Основную долю ионов составляют ионы материала мишени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райкунов Г. Г. Космический мусор. В 2-х кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Novikov L. S., Baranov D. G., Gagarin Y. F., Dergachev V. A., Samokhina M. S., Voronina E. N. // Advances in Space Research. Vol. 59. No. 12. P. 3003.
3. Телегин А. М. // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 1. С. 32.
4. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. – М.: Техносфера, 2015.
5. Вениаминов С. С., Червонов А. М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.: ИКИ РАН, 2012.

6. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. – М.: ИКИ РАН, 2013.

7. Новиков Л. С. Основы экологии космического пространства. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006.

8. Gerhard Drolshagen // Advances in Space Research. 2008. Vol. 41. P. 1123.

9. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2009.

10. Shu T. Lai, Edmond Murad // Journal of spacecraft and rockets. 2002. Vol. 39. No. 1. P. 106.

11. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. – Самара, 2005.

12. Воронов К. Е., Телегин А. М., Цзян Лисян, Цзяо Цзилун // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 5. С. 148.

13. Телегин А. М. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 6. С. 618.

14. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции. – М.: Наука, 1970.

15. Телегин А. М. / Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (Самара, 2018). С. 54–55.

16. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52. No. 4. P. 595.

17. Piyakov A. V., Rodin D. V., Rodina M. A., Телегин А. М., Kondratev S. N. / International Conference on Information Technology and Nanotechnology. CEUR Workshop Proceedings (Самара 2018). Vol. 2212. P. 158–164.

Scientific equipment for the study of high-speed microparticles (a review)

K. E. Voronov¹, A. M. Telegin¹, Jiang Lixiang², and Jiao Jilong²

¹ Samara University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia
E-mail: voronov.ke@ssau.ru; talex85@mail.ru

² Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering
104 Yu-I st., Beijing, China
E-mail: rs_liu1@sina.com

Received November 7, 2019

The design of scientific equipment for registration of high-speed microparticles (micrometeoroids and space debris particles) of ionization type is described. The description of the original design of electrodes for collecting ions in sensors of high-speed microparticles of ionization type is given. The results of tests of scientific equipment on accelerators of high-speed microparticles with an optical synchronization channel for elimination of false operation of the digital comparator from the noise caused by control circuits of the accelerator are given.

Keywords: micrometeorites, space debris, registration, scientific equipment.

REFERENCES

1. G. G. Raikunov, *Space debris. In 2 books. Book 1. Methods of observation and space debris models* (FIZMATLIT, Moscow, 2014) [in Russian].
2. L. S. Novikov, D. G. Baranov, Y. F. Gagarin, V. A. Der-gachev, M. S. Samokhina, and E. N. Voronina, *Advances in Space Research*. **59** (12), 3003 (2017).
3. A. M. Telegin, *Aerospace Instrumentation*, No. 1, 32 (2016).
4. A. I. Belous, V. A. Solodukha, and S. V. Shvedov, *Space electronics. In 2 books* (Technosphere, Moscow, 2015) [in Russian].
5. S. S. Veniaminov and A. M. Chervonov, *Space debris – a threat to humanity* (IKI RAN, Moscow, 2012) [in Russian].
6. A. I. Nazarenko, *Modeling space debris* (IKI RAN, Moscow, 2013) [in Russian].
7. L. S. Novikov, *Basics of the ecology of outer space. Textbook* (University Book, Moscow, 2006) [in Russian].
8. Gerhard Drolshagen, *Advances in Space Research*. **41**, 1123 (2008).
9. L. S. Novikov, *The impact of particulate matter of natural and artificial origin on spacecraft: Textbook* (University Book, Moscow, 2009) [in Russian].
10. Shu T. Lai and Edmond Murad, *Journal of spacecraft and rockets* **39** (1), 106 (2002).
11. N. D. Semkin, K. E. Voronov, and L. S. Novikov, *Registration of dust and gas particles in laboratory and space conditions* (SSAU, Samara, 2005) [in Russian].
12. K. E. Voronov, A. M. Telegin, Jiang Lixiang, and Jiao Jilong, *Instruments and experimental technique*, No. 5, 148 (2019).
13. A. M. Telegin, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (6), 618 (2016).
14. G. M. Gershtein, *Modeling fields by electrostatic induction* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
15. A. M. Telegin, in *Actual problems of radio electronics and telecommunications: materials of the All-Russian scientific and technical conference* (Samara, 2018). pp. 54–55.
16. N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. V. Piyakov, and I. V. Piyakov, *Instruments and Experimental Techniques* **52** (4), 595 (2009).
17. A. V. Piyakov, D. V. Rodin, M. A. Rodina, A. M. Telegin, and S. N. Kondratev, in *Proc. International Conference on Information Technology and Nanotechnology. CEUR Workshop Proceedings* (Samara, 2018). Vol. 2212, pp. 158–164.