

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. АБДУРАХИМОВ, М. С. КАРЕВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vka@mil.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований изменения характеристик оптических датчиков системы управления движением космического аппарата, вызванного внешними деструктивными воздействиями интенсивного светового излучения. Дано аналитическое описание зависимостей характеристик датчика, определяющих точность удержания углового положения космического аппарата, от изменения оптических параметров его элементов, что позволяет определить предельно допустимые уровни воздействующих факторов. Обоснован выбор объекта экспериментальных исследований и представлена его конструктивно-функциональная схема. Сформулированы задачи экспериментального исследования, представлена методика проведения эксперимента, а также приведены графики зависимости выходного управляющего сигнала от углового положения, построенные по результатам эксперимента и моделирования.

Ключевые слова: *космический аппарат, система управления движением, оптические датчики, лазерное излучение*

Введение. Функционирование космического аппарата (КА) сопровождается воздействием факторов различной физической природы [1], в частности, на оптические элементы (ОЭ) бортовых систем (БС) действуют лазерное излучение [2—5], а также микрометеорные потоки и частицы космического мусора.

В результате долгого (сопоставимого со сроком активного существования КА) или разового (мгновенного, по сравнению со сроком активного существования КА) воздействия вышеперечисленных факторов на поверхностях внешних элементов аппаратуры КА, в частности оптических датчиках (ОД) системы управления движением (СУД), образуются дефекты поверхностей, для описания которых используется понятие типового дефекта оптического элемента. В результате снижается надежность функционирования СУД, от которой зависят работоспособность КА и надежность функционирования его систем. Исследования последствий воздействия лазерного излучения актуальны вследствие требований по увеличению сроков активного существования КА (до 10—15 лет), повышению качества решаемых его аппаратурой задач и точности стабилизации КА.

Важной характеристикой ОД является передаточная функция, определяющая зависимость выходного сигнала датчика от знака и величины угла отклонения оптической оси ОД от направления на ориентир. Получение значений этой характеристики после воздействия и определение предельно допустимых уровней воздействующего фактора является актуальной задачей. Однако проводить эксперименты на функционирующем КА не представляется возможным, поэтому исследования [6—9], направленные на определение влияния возникающих повреждений элементов оптического тракта датчика на его передаточную функцию, необходимо выполнять на Земле, в условиях, приближенных к условиям космического пространства.

Аналитическое описание характеристик оптического датчика. На современных КА используются различные ОД, в которых поток излучения преобразуется в управляющий

электрический сигнал, величина которого зависит от конструктивного исполнения приемного оптического тракта.

Как было показано в [7], по типу входной апертуры выделяются датчики:

— с торцевым типом апертуры, в которых весь поток излучения проходит через одну и ту же поврежденную поверхность внешней линзы или защитного стекла;

— с цилиндрическим типом апертуры, в которых поток излучения проходит через различные поверхности элементов датчика, поврежденных в разной степени, а затем фокусируется к приемнику излучения через общий элемент оптического тракта.

На рис. 1 представлена конструктивно-функциональная схема ОД с цилиндрическим типом апертуры, содержащая пять основных составных частей (1 — зеркальная пирамида; 2 — плоское зеркало; 3 — защитное окно; 4 — сканирующее зеркало; 5 — объектив), которые направляют поток излучения к чувствительному элементу. Этот чувствительный элемент на схеме не указан, обозначено только направление сфокусированного луча F (в сторону преобразователя оптического сигнала в электрический).

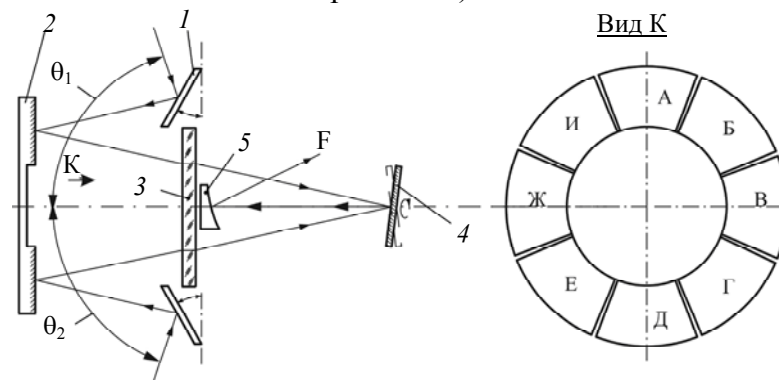


Рис. 1

Элементы 1 и 2 используются на ОД с цилиндрической апертурой, в то время как элементы 3 и 4 — на обоих типах датчиков. Датчики с цилиндрическим типом апертуры представляют наибольший интерес для исследования, так как повреждения их элементов приводят не только к снижению амплитуды управляющего сигнала, но и к нарушению его симметричности относительно направления на центр Земли.

Изменение свойств поверхностей ОД, обозначенных на рис. 1 буквами А—И, а также поверхности защитного окна 3 приведет к возникновению в СУД КА ошибок при определении направления на источник излучения, в результате чего будет нарушен режим углового движения КА. Критичность этих ошибок возрастает с увеличением высоты над поверхностью Земли, поскольку суммарный линейный угол $\theta = \theta_1 + \theta_2$, под которым с борта КА видна Земля, уменьшается [6, 10, 11].

Под воздействием лазерного излучения на поверхностях элементов 1—3 возникают типовые дефекты, которые приводят к образованию зон поглощения и рассеяния. В датчиках с торцевой апертурой поток излучения, проходящий через каждую точку поврежденной поверхности, участвует в формировании обоих сравниваемых потоков, поэтому все дефекты поверхности ОЭ одинаково сказываются на их величине, что, в свою очередь, ведет к снижению величины управляющего сигнала U_0 (рис. 2, а). В датчиках с цилиндрическим типом входной апертуры лучи, участвующие в формировании сравниваемых потоков излучения, проходят через участки поверхности ОЭ, различающиеся степенью повреждения. Поэтому повреждение ОЭ датчиков рассматриваемого типа ведет к различному изменению сравниваемых потоков излучения и возникновению постоянной составляющей ошибки Ψ (рис. 2, б).

Угловая характеристика исправного датчика с цилиндрическим типом апертуры может быть выражена через фактический угол отклонения поврежденного датчика при помощи

соотношения, учитывающего изменение характеристик как внешних, так и внутренних оптических элементов датчика

$$\varphi_i = \varphi_d \tau_r \frac{\tau^+ + \tau^-}{2} + a_k \tau_r (\tau^+ - \tau^-), \quad (1)$$

где φ_d — угол отклонения поврежденного датчика, τ_r — коэффициент направленного пропускания защитного окна (см. рис. 1, 3), τ^+, τ^- — средние значения коэффициентов зеркального отражения элементов оптической системы датчика, по которым к чувствительным элементам поступают световые потоки, характеризующие положительное и отрицательное отклонение оси датчика от направления на источник излучения соответственно, a_k — коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные особенности и условия функционирования датчика.

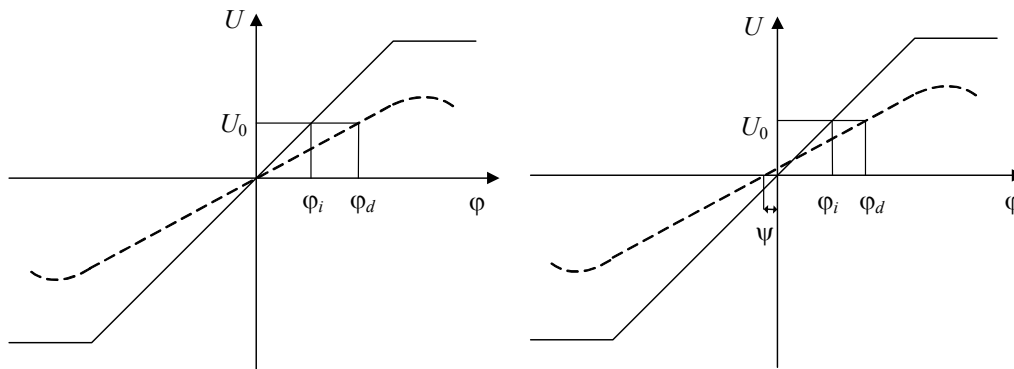


Рис. 2

Объект исследований и задачи эксперимента. В качестве объекта экспериментальных исследований выбран имеющий цилиндрический тип апертуры разновысотный инфракрасный построитель местной вертикали (ИК ПМВ), предназначенный для использования в СУД КА, движущихся по низким (до 2000 км) круговым и эллиптическим орбитам. Основные характеристики ИК ПМВ представлены ниже.

Мгновенное поле зрения, ...°	3
Коэффициент преобразования (уточняется для каждого датчика на заводе-изготовителе)	0,3—0,6
Мгновенное поле зрения канала подавления помехи от Солнца, ...°	4
Гарантийный ресурс изделия, ч.....	1000
Точность определения углового положения по направлению на Землю, мин.....	30
Зона линейности изменения управляющего сигнала, ...°	±2

Принцип работы ИК ПМВ подробно описан в работах [12, 13] и в рамках настоящей статьи не рассматривается.

Задачей экспериментального исследования является определение зависимости:

- 1) оптических характеристик элементов датчика от степени повреждения элементов;
- 2) характеристик датчика от оптических характеристик его элементов.

На первом этапе экспериментальных исследований коэффициент отражения зеркальных элементов датчика уменьшался путем поочередного нанесения на их поверхности непрозрачных и рассеивающих ИК-излучение покрытий, а также проводились измерения оптических характеристик этих элементов. Тем самым имитировалось частичное повреждение элемента в результате воздействия.

Дальнейшие исследования проводились на экспериментальном стенде, предназначенном для настройки и контроля функционирования ИК ПМВ. В состав стенда входят три блока, установленных на общее основание. Также в состав стенда входит имитатор ИК-излучения,

состоящий из блоков имитации и питания. Блок имитации представляет собой цилиндрический колпак, внутри которого по периметру расположены нагревательные элементы. Перед проведением эксперимента этот блок устанавливается на датчик и фиксируется соответствующими зажимами. При подаче питания на имитатор поток ИК-излучения от нагревательных элементов, отражаясь от зеркал, фокусируется оптической схемой датчика и поступает к чувствительному элементу, где преобразуется в управляющий сигнал, величина которого регистрируется при помощи измерительного блока. Таким образом имитируется ИК-излучение Земли.

При проведении эксперимента были приняты следующие допущения:

1) рассматриваемый ИК ПМВ предназначен для определения углового отклонения КА от центра Земли и формирования управляющих сигналов по двум взаимно перпендикулярным каналам крена и тангажа. Поскольку формируемые управляющие сигналы по обоим каналам обрабатываются электрической схемой ОД одинаково, результаты измерений при одинаковых повреждениях будут аналогичными. Поэтому все измерения проводятся по одному каналу крена, что обеспечивает уменьшение количества измерений без потери точности;

2) исследуемый датчик оснащен механизмом подстройки угла конуса сканирования θ в зависимости от высоты полета КА. При подготовке и отработке методики проведения эксперимента установлено, что при небольших (до 1°) углах отклонения от вертикали происходит автоматическая подстройка угла конуса сканирования, это приводит к изменению условий эксперимента и возникновению дополнительной погрешности. С целью проведения измерений при одинаковых условиях механизм автоматической подстройки был отключен.

В ходе эксперимента по методике [6] регистрировалась величина управляющего сигнала датчика, в составе которого имеются поврежденные ОЭ, оптические характеристики которых известны. Результаты измерений (при $\tau^- = 0,2$), а также значения управляющего сигнала исправного датчика при различных углах отклонения представлены в таблице.

Опыт	Угол отклонения на источник излучения, ...°						
	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0
	Величина управляющего сигнала исправного датчика, В						
	-1,03	-0,86	-0,71	-0,54	-0,39	-0,2	0
	Величина управляющего сигнала поврежденного датчика, В						
1	-0,59	-0,50	-0,30	-0,20	-0,11	-0,05	0,07
2	-0,62	-0,46	-0,38	-0,20	-0,15	-0,04	0,05
3	-0,65	-0,50	-0,40	-0,26	-0,12	-0,05	0,05
4	-0,54	-0,40	-0,33	-0,22	-0,14	-0,06	0,07
5	-0,55	-0,43	-0,35	-0,22	-0,15	-0,06	0,05

С использованием математического аппарата теории вероятности и математической статистики [14, 16] полученные данные были обработаны по малой выборке. Согласно центральной предельной теореме теории вероятности, принята гипотеза о нормальном (гауссовом) распределении случайной величины, задана доверительная вероятность $P=0,95$, построена гистограмма распределения плотности частоты появления погрешности [14—16], подтвердившая гипотезу о гауссовом распределении.

По полученным экспериментальным значениям построена зависимость выходного напряжения от угла отклонения датчика (рис. 3; 1 — для исправного, 2 и 3 — поврежденного датчика). Зависимость 2 построена по результатам моделирования ($\tau_r=0,99$; $\tau^+=0,995$; $\tau^-=0,2$; $a_d=0,2$), 3 — по экспериментальным данным.

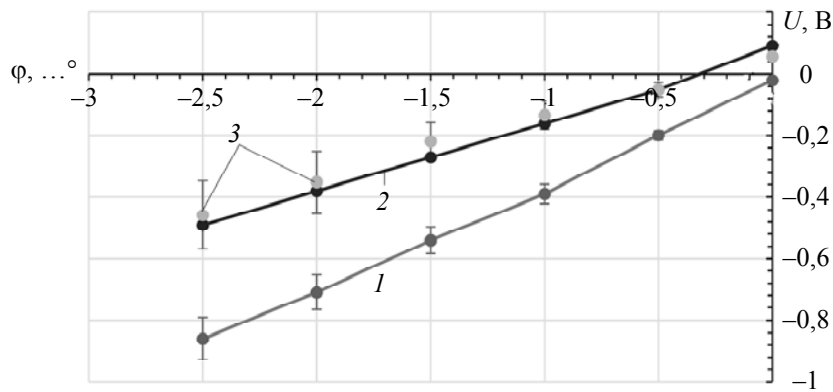


Рис. 3

Заключение. Полученные в статье результаты позволяют определить влияние воздействия лазерного излучения на величину выходного управляющего сигнала ОД. Эти данные, в свою очередь, позволят определить ошибку углового положения КА, возникающую в СУД, и в дальнейшем оценить точность удержания углового положения перспективных КА. По результатам анализа экспериментальных зависимостей сделан вывод, что вследствие воздействия лазерного излучения произойдет ухудшение значений оптических характеристик элементов датчика, в системе управления движением возникнет ошибка определения углового положения. Как видно из рис. 3, при отклонении поврежденного датчика на $2,5^\circ$ управляющий сигнал соответствует отклонению исправного датчика на $1,5^\circ$; кроме того, изменение оптических характеристик в разной степени поврежденных элементов датчика приведет к возникновению постоянной составляющей ошибки ($\Psi = 0,36^\circ$), обусловленной разницей поступающих по разным каналам потоков излучения. Анализ требований, предъявляемых к системам ориентации и стабилизации функционирующих КА ДЗЗ (точность удержания углового положения КА в дежурном режиме не более $\pm 90'$, в процессе выполнения поставленной задачи — не более $\pm 7'$ по каналам тангажа и крена), позволяет сделать вывод, что при наличии в составе системы поврежденного ОД КА не сможет должным образом выполнить поставленную задачу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахимов А. А., Денисов А. М., Мосин Д. А. Основные условия и принципы функционирования космических аппаратов. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 86 с.
2. Батт Ю. Воздействие китайских лазерных дальномеров на фотоспутники // *Science and Global Security*. 2009. № 17. С. 20—35.
3. Талипов Н. Х. Влияние воздействия мощного импульсного лазерного ИК-излучения на электрофизические свойства гетероэпитаксиальных слоев CD HG TE // *Изв. вузов. Физика*. Томск: НИИ ТГУ, 2012. № 12. С. 3—14.
4. Атаманюк В. М., Володин О. В., Дяченко И. В. и др. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники / Под ред. Н.С. Захарова. Сергиев Посад: ЦФТИ МО РФ, 2004. 176 с.
5. Сахаров М. В., Средин В. Г., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В. Трехмерная математическая модель воздействия лазерного излучения на матричный фотоприемник на основе HG XCD 1-XTE // *Изв. вузов. Физика*. Томск: НИИ ТГУ, 2013. № 9-2. С. 3—14.
6. Никольский В. В., Абдурахимов А. А., Карев М. С. Методика экспериментального исследования характеристик оптических элементов датчиков системы управления движением космического аппарата в условиях воздействия факторов космического пространства // Сб. ст. III Всерос. НПК „Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники“. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. С. 233—238.
7. Бакулин В. Н. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 304 с.
8. Кузнецов В. В. Планирование измерительного эксперимента. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006. 96 с.

9. Абдурахимов А. А. Моделирование изменения характеристик оптических датчиков ориентации космических аппаратов при высокоскоростном воздействии микрочастиц // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 9. С. 41—46.
10. Дзитоев А. М., Лановок Е. В., Ханков С. И. Тепловые режимы космических объектов / Под ред. М. М. Пенькова. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 172 с.
11. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. Бортовые системы управления космическими аппаратами. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
12. Попов В. И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 84 с.
13. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.
14. Лебедев Е. Л. Основы метрологии. СПб: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2007. 115 с.
15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высш. школа, 2001. 575 с.
16. Никитин В. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных. Самара, ГТУ. 2016. 64 с.

Сведения об авторах

- Алексей Александрович Абдурахимов** — д-р техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского;
E-mail: vka@mil.ru
- Михаил Сергеевич Карев** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, отдел № 12;
E-mail: m.karefff@yandex.ru

Поступила в редакцию
09.01.18 г.

Ссылка для цитирования: Абдурахимов А. А., Карев М. С. Изменение характеристик оптических датчиков системы управления движением космического аппарата при воздействии лазерного излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 342—347.

CHANGES IN CHARACTERISTICS OF OPTICAL SENSORS OF THE CONTROL SYSTEM OF THE MOTION OF A SPACE APPARATUS UNDER THE IMPACT OF LASER RADIATION**A. A. Abdurahimov, M. S. Karev**

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: vka@mil.ru

Results of pilot studies of changing the characteristics of optical sensors of the spacecraft movement control system under the impact of external destructive influences of thermal and mechanical nature are presented. An analytical description is derived for dependencies of the sensor characteristics determining the accuracy of the retention of the angular position of the spacecraft irrespective of the change in optical parameters of its elements, which allows to determine the maximum permissible levels of the influencing factors. The choice of the object of experimental research is substantiated and its constructive-functional scheme is presented. The problems of experimental research are formulated, the experimental procedure is presented, and the graphs of the output control signal versus the angular position are plotted based on the results of the experiments and simulations.

Keywords: spacecraft, spacecraft movement control system, optical sensors, laser radiation

Data on authors

- Aleksey A. Abdurahimov** — Dr. Sci., Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; E-mail: vka@mil.ru
- Mikhail S. Karev** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy;
E-mail: m.karefff@yandex.ru

For citation: Abdurahimov A. A., Karev M. S. Changes in characteristics of optical sensors of the control system of the motion of a space apparatus under the impact of laser radiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 342—347 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-342-347