

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МИНИАТЮРИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Р. В. Белый, А. С. Мовляв

Рассматриваются перспективные технологии миниатюризации космических аппаратов, которые в обозримом будущем могут быть использованы в спутниках дистанционного зондирования Земли. Приводятся примеры снижения массы оптических элементов зарубежных космических аппаратов Hubble и IKONOS. Предложены характеристики главных зеркал различных оптических систем и основных оптических материалов. Рассматриваются исследования по разработке зеркал из нетрадиционных для оптики материалов. Анализ показал, что применение микро- и нанотехнологий позволяет уменьшить массу космических аппаратов в разы, а также сократить стоимость разработки и эксплуатации таких спутников, особенно за счет использования уникальных возможностей наноматериалов. Отмечаются также и недостатки миниатюризации производства в финансовой и временной части и нецелесообразности использования сверхмалых космических аппаратов для решения всех существующих в настоящее время задач ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: снижение массы, перспективные технологии дистанционного зондирования Земли, оптические материалы, карбид кремния.

Важнейшей тенденцией в области развития современной космической техники является миниатюризация всех ее компонентов и систем. Благодаря внедрению передовых технологий миниатюризации становится возможным значительное уменьшение массы, объема космического аппарата (КА) и расхода топлива, что обеспечивает снижение затрат на каждый пуск и открывает новые возможности для космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Миниатюризация позволяет создавать космические аппараты массой в десятки и менее килограмм, которые способны выполнять задачи, решаемые в недавнем прошлом только многотонными аппаратами.

Программы разработки новых технологий снижения массы и габаритов перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли можно разделить на два направления:

- снижение массы целевой аппаратуры и, в том числе, массы оптических элементов телескопа;
- уменьшение массы и габаритов обеспечивающих подсистем космических аппаратов (миниатюризация элементной базы).

Снижение массы оптических элементов космических аппаратов. Значительную долю массы космического аппарата составляет масса оптической системы, особенно для систем высокого разрешения, где требуется большая апертура. Например, зеркало диаметром 2,4 м на космическом телескопе Hubble, совместном проекте National Aeronautics and Space Administration (NASA) и European Space Agency (ESA), весит 826 кг. Для тяжелых зеркал, зеркал композиционного типа (имеющих пористую или ячеистую структуру), а также других типов зеркал, форма которых поддерживается за счет жестко-

сти конструкции, масса зеркала m пропорциональна четвертой степени его диаметра D :

$$m = C_m D_m^4,$$

где C_m – постоянная, зависящая от технологии, по которой выполнено зеркало, кг/м⁴.

Данные расчеты справедливы для простых пассивных зеркал и не учитывают опорные элементы конструкции и любые другие компоненты оптической системы.

Технология, по которой выполнено зеркало, может быть описана с помощью постоянного коэффициента массы. Этот коэффициент может быть точно определен по известным данным массы и диаметра существующих зеркал. Он зависит от типа зеркала и ограничений по жесткости. Масса главного зеркала оптической системы КА IKONOS, разработанного компанией Lockheed Martin, диаметром 0,7 м составляет 13,4 кг. Данное зеркало имеет пористую конструкцию, и его коэффициент массы составляет 56 кг/м⁴; для сравнения зеркало сплошного типа имеет расчетный коэффициент массы около 1000 кг/м⁴. Некоторые характерные данные приведены в табл. 1 [1].

Зеркала оптических систем КА Hubble и IKONOS выглядят высокотехнологичными по сравнению со сплошным зеркалом. Различия в коэффициенте C_m могут быть связаны с технологией производства зеркала (например, облегченная конструкция с полостями), с заданным коэффициентом остаточной деформации или зависеть от типа опорной конструкции. Сравнительные характеристики оптических материалов, используемых при производстве телескопов КА, приведены в табл. 2 [2].

Таблица 1

Характеристики главных зеркал различных оптических систем

Зеркало	Диаметр, м	Масса, кг	Коэффициент массы (C_m), кг/м ⁴	Удельная плотность, кг/м ²
Сплошное	1	1000	1000	1273
Космический телескоп Hubble, NASA/ESA	2,4	826	25	183
KA IKONOS, Lockheed Martin	0,7	13,4	56	35
IRIS, Япония	0,7	8,2	34	21,3
ATLID, ESA/Япония	0,63	6	38	19,2
HSO, ESA	3,5	300	2	31,2

Таблица 2

Характеристики основных оптических материалов

Тип	Удельная плотность, г/см ³	Модуль Юнга (упругости), ГПа	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ /К	Удельная теплопроводность, Вт/мК	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Ultra low expansion (ULE) glass	2,20	68	< 0,03	1,31	776
Pyrex	2,23	64	3,2	1,3	726
Zerodur	2,53	92	< 0,05	1,46	821
Borofloat	2,23	63	3,2	1,1	830
Silica	2,20	73	0,52	1,38	703
Silicon carbide (SiC)	3,05	466	2,37	240	660
Углеродное волокно SiC (C/SiC)	2,65	250	1,8	130	700

Анализ позволяет сделать вывод о том, что для увеличения апертуры телескопа необходимо существенное усовершенствование технологий производства зеркал, что повлечет за собой снижение коэффициента C_m и, следовательно, массы оптической системы, большая часть которой приходится на зеркала. С другой стороны, большая масса главного зеркала является причиной поиска новых подходов к построению систем формирования изображения, возможно, нетрадиционного типа.

В США ведутся исследования, направленные на разработку зеркал из нетрадиционных для оптики материалов: металлов, композиционных материалов и сплавов. В качестве материалов используется бериллий, алюминиевые сплавы и кремний. Из известных материалов бериллий обладает наибольшей жесткостью и наименьшей плотностью, что позволяет создавать из него легкие зеркала с высокой степенью жесткости. Однако из-за недостаточных теплофизических свойств и высокой стоимости производства он сегодня уступил первенство карбиду кремния. Этот материал значительно дешевле, обладает достаточными жесткостью, удельной плотностью и прекрасными теплофизическими характеристиками. Удельная плотность зеркал, созданных из этого материала, в зависимости от рабочей области длин волн составляет 35 – 45 кг/м² [3].

Группа исследователей из Национальных лабораторий Сандия (Sandia National Laboratories) разра-

ботала пьезоэлектрическую полимерную оптику, которая позволит создавать зеркала для космических телескопов недостижимого для современного уровня развития технологий диаметра и минимальной массы. Учеными создано несколько новых видов полимерных пленок, отличающихся высокими пьезоэлектрическими свойствами: форма и размер пленки зависит от прикладываемого электрического напряжения, что позволяет управлять свойствами оптической поверхности: формой, кривизной, фокусным расстоянием объектива, а также компенсировать возникающие искажения поверхности.

Новые материалы позволяют создавать телескопы с зеркалом большого диаметра, а значит, и гораздо большей разрешающей способностью, чем существующие сегодня, и при этом эффективно управляемые и, таким образом, свободные от помех.

Разработанные в Сандии полимеры имеют гораздо больший срок эксплуатации в условиях открытого космоса, чем известные ранее. Быстрая деградация оптических и пьезоэлектрических свойств являлась основным препятствием для использования ранее созданных полимеров в качестве материала для зеркал орбитальных телескопов.

В университете штата Аризона создано небольшое зеркало, которое является прообразом легких адаптивных зеркал для будущих больших космических телескопов и для КА наблюдения за поверхностью Земли [4]. Возможно, такое зеркало будет ис-

пользовано в проекте космического телескопа нового поколения Next Generation Space Telescope (NGST).

Диаметр данного демонстрационного зеркала – 50 см, а весит оно всего 1 кг. Оно представляет собой подвижную стеклянную сферическую подложку толщиной 1 мм, покрытую алюминиевой пленкой. Форма стеклянной подложки может меняться с помощью управляемых компьютером крошечных приводов весом 5 г каждый (31 такой привод распределен по всей поверхности зеркала). Вся эта конструкция крепится на легком каркасе из углеродного волокна. В настоящее время ведутся работы по созданию прототипа зеркала для будущего телескопа NGST, диаметр которого составляет 2 м.

Влияние микро- и нанотехнологий на развитие космических систем ДЗЗ. Фундаментальные исследования и практические работы в области создания микро- и наносистем по спектру их применения получили значительный размах во многих ведущих зарубежных странах. Переход к массовому применению микро- и нанотехнологий при разработке и создании космических систем различного целевого назначения, в том числе средств ДЗЗ, на базе позволит в полной мере реализовать основные преимущества малых и сверхмалых КА [5]:

- сокращение сроков создания КА с 8–10 до 2–3 лет;
- снижение стоимости эксплуатации на 20–30 % в год;
- оперативность восполнения орбитальной группировки КА из-за малых сроков изготовления КА и их подготовки к запуску;
- сокращение потерь в случае отказов КА;
- существенное снижение затрат на выведение КА.

В целях создания перспективных систем на базе сверхмалых КА основные усилия разработчиков направлены на решение ряда научно-технических и технологических проблем, основными из которых являются следующие:

- разработка базовых элементов систем энергообеспечения перспективных КА: высокоэнергетических первичных источников тока, аккумуляторов и батарей, аппаратуры регулирования и контроля;
- поиск перспективных конструктивно-технологических решений и технологических процессов производства элементов систем энергообеспечения;
- создание системы контрольно-измерительных приборов нового поколения;
- разработка технологий радиоэлектронных устройств нового поколения на основе тонкопленочных гибридных интегральных микросхем;
- поддержание и развитие микроэлектронной базы;
- создание новых конструкционных материалов;
- обеспечение стойкости малых КА к воздействию факторов космического пространства;

– разработка новых технологий в области оптики, систем связи, способов передачи, приема и обработки больших массивов информации.

Значительное влияние на облик перспективных КА окажут технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Миниатюрность изделий МЭМС обуславливает такие исключительно важные с точки зрения применения в космической технике свойства изделий, как портативность, высокий срок службы, низкое потребление энергии, простота в обслуживании и замене [6–9].

Применение МЭМС позволяет приблизительно на порядок уменьшить размеры, массу и потребление энергии космических систем. В качестве примеров успешного применения МЭМС в космической технике можно упомянуть кремниевые гироскопы, акселерометры, датчики давления, клапаны, микроисточники энергии, системы химического и биологического анализа, высокочастотные, оптические и механические фильтры и высокочастотные ключи. Приводы и двигатели, созданные по технологии МЭМС, будут способны обеспечить значительные силы и крутящие моменты и заменят обычные механизмы.

Одним из «прорывных направлений» фундаментальной науки являются исследования в области нанотехнологий. С успехами в этой области связывается возможность повышения критически важных параметров изделий высокотехнологических отраслей промышленности, в том числе ракетно-космической.

Особое место в нанотехнологии отводится наноматериалам. Наноразмерные структуры конструкционных материалов открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости при достаточно высокой пластичности. Повышение пластичности керамики и интерметаллидов открывает большие перспективы для их использования в перспективных конструкциях ракетно-космической техники.

Таким образом, снижение массы объектов техники является положительной и необходимой тенденцией. Однако, при переходе определенного порога в сторону миниатюризации технический объект может потерять свою функциональность, показатели эффективности и надежности. На каждом этапе развития технологий существует свой предел миниатюризации. Кроме того, разработка новых устройств, технологий, материалов требует затрат – финансовых и временных. Поэтому использование сверхмалых КА для решения всех существующих в настоящее время задач нельзя признать целесообразным. Следует

учитывать то, что на орбитах уже существуют космические системы дистанционного зондирования Земли, успешно выполняющие целевые задачи. В дальнейшем эти системы будут работать еще длительное время. Принудительная замена современных систем на перспективные вряд ли может быть финансово оправдана [10]. Главным условием рационального применения сверхмалых КА является применение их в первую очередь для тех задач, которые в настоящее время либо не решаются в космосе, либо решаются неэффективно.

Литература

1. A Feasibility Study of Micro-Satellites for Earth Observation : The 15th Annual/USU Conference on Small Satellites / Joshua S. Levi, Peter D. Washabaugh. – Текст : электронный // Utah State University's Libraries : сайт. – 2001. – P. 1 – 13. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1976&context=smallsat>. – Дата публикации : апрель 2001.
2. Kramer J. Herbert. Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors / Herbert J. Kramer. – Текст : электронный // Earth Observation History of Technology Introduction. – Verlag, Berlin, 1994. – P. 5 – 190. – DOI : 10.1007/978-3-642-97678-0.
3. Новые технологии в Космической оптике / Г. Т. Петровский, Ю. А. Гоголев, С. В. Любарский // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 40-летию первого полета человека в космос : доклад ВНИИ
4. «ГОИ им. С.И. Вавилова». – Санкт-Петербург, 2001. – С. 24 – 26.
5. NGST mirror system demonstrator from the University of Arizona / James H. Burge, Scott T. DeRigne, James Roger P. Angel [et al.] // Optical Manufacturing and Testing IV : Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4451. – P. 27 – 38.
6. Анализ тенденций микроминиатюризации космических средств/ В. И. Лукьященко, В. К. Саульский, О. Ю. Казанцев [и др] / Материалы конференции VI Международного форума «Высокие технологии XXI века». – Москва : Российский Фонд развития высоких технологий, 2005. – С. 151 – 158.
7. Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies / National Academy of Sciences. – Washington, DC : National Academies Press, 2003. – 243 p.
8. MEMS: Powerhouse for Growth in Sensors, Actuators, and Control Systems. – 2nd edition. – California, United States : Frost & Sullivan, 2001. – 221 p.
9. Microengineering aerospace systems / Henry Helvajian ; The Aerospace Corporation. – Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. – 707 p.
10. Rai-Choudhury P. MEMS & MOEMS: technology and applications / P. Rai-Choudhury. – Bellingham WA : SPIE, 2000. – 520 p. – DOI : 10.1117/3.2265068.
11. Перспективы развития космических систем на базе микротехнологий / В. И. Лукьященко, С. В. Стреш, Е. В. Трошин // Материалы конференции VI Международного форума «Высокие технологии XXI века». – Москва : Российский Фонд развития высоких технологий, 2005. – С. 163.

Поступила в редакцию 29.12.2020

Руслан Владимирович Белый, аспирант, e-mail: whiterus77@gmail.com, т. 8 (901) 511-33-00. (ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

Алексей Станиславович Мовляв, кандидат технических наук, главный специалист, e-mail: a.movlyav@yandex.ru, т. 8 (903) 724-53-76. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ANALYSIS OF PROMISING TECHNOLOGIES THAT CAN BE USED TO REDUCE SIZE OF REMOTE SENSING SATELLITES

R. V. Belyy, A. S. Movlyav

The article considers advanced technologies of spacecraft miniaturization that may be used for development of the Earth remote sensing satellites in the foreseeable future. The article contains examples of mass reduction of optical elements integrated on the Hubble and IKONOS foreign spacecraft. The characteristics of main reflectors of various optical systems and main optical materials are suggested. The research works aimed at the development of reflectors made of materials that are not traditional for optics are considered. The analysis has shown that the application of micro- and nanotechnologies allows achieving a several times reduction of spacecraft mass and cuts down the costs of development and operation of such satellites, particularly due to the use of unique properties of nanomaterials. The article also describes the disadvantages of miniaturization of production from the point of view of financial and time factors, as well as impracticality of using ultra-small spacecraft for addressing all currently existing tasks of the rocket and space industry.

Key words: mass reduction, advanced Earth remote sensing technologies, optical materials, silicon carbide.

References

1. A Feasibility Study of Micro-Satellites for Earth Observation : The 15th Annual/USU Conference on Small Satellites / Joshua S. Levi, Peter D. Washabaugh. – Text : electronic // Utah State University's Libraries : website. – 2001. – P. 1 – 13. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1976&context=smallsat>. – Publication date : April 2001.

2. Kramer J. Herbert. Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors / Herbert J. Kramer. – Text : electronic // Earth Observation History of Technology Introduction. – Verlag, Berlin, 1994. – P. 5 – 190. – DOI : 10.1007/978-3-642-97678-0.
3. New technologies in space optics / G. T. Petrovskii, Iu. A. Gogolev, S. V. Lyubarskii // The jubilee research and practice conference dedicated to the 40th anniversary of the first human space flight : report by Vavilov State Optical Institute. – St. Petersburg, 2001. – Pp. 24 – 26.
4. NGST mirror system demonstrator from the University of Arizona / James H. Burge, Scott T. DeRigne, James Roger P. Angel [et al.] // Optical Manufacturing and Testing IV : Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4451. – Pp. 27 – 38.
5. Analysis of trends in microminiaturization of space applications / V. I. Lukiashchenko, V. K. Saulskii, O. Iu. Kazantsev [et al] / Conference proceedings of the 6th International forum ‘High technologies of the XXI century’. – Moscow : Russian Foundation for High Technologies Development, 2005. – Pp. 151– 158.
6. Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies / National Academy of Sciences. – Washington, DC : National Academies Press, 2003. – 243 p.
7. MEMS: Powerhouse for Growth in Sensors, Actuators, and Control Systems. – 2nd edition. – California, United States : Frost & Sullivan, 2001. – 221 p.
8. Microengineering aerospace systems / Henry Helvajian; The Aerospace Corporation. – Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. – 707 p.
9. Rai-Choudhury P. MEMS & MOEMS: technology and applications / P. Rai-Choudhury. – Bellingham WA : SPIE, 2000. – 520 p. – DOI : 10.1117/3.2265068.
10. Prospects of development of micro technology-based space systems / V. I. Lukiashchenko, S. V. Strezh, E. V. Troshin // Conference proceedings of the 6th International forum ‘High technologies of the XXI century’. – Moscow : Russian Foundation for High Technologies Development, 2005. – 163 p.

Ruslan Vladimirovich Belyi, Ph. D. Student, e-mail: whiterus77@gmail.com, tel.: +7 (901) 511-33-00.
(Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Moscow Aviation Institute (National Research University)»).

Aleksei Stanislavovich Movlyav, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Specialist,
e-mail: a.movlyav@yandex.ru, tel.: +7 (903) 724-53-76.
(JC «VNIIEM Corporation»).