

В.Е. Махов, А.А. Закутаев, В.В. Ширококов

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ СВЕТОВОГО ПОЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В работе рассмотрены варианты построения систем технического зрения для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на основе оптико-электронной системы регистрации светового поля. Представлены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие возможности оптико-электронных систем регистрации светового поля по определению характеристик мало-размерных дефектов плоской поверхности.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, световое поле, система технического зрения, регистрация дефектов.

V.E. Mahov, A.A. Zakutaev, V.V. Shirobokov

THE ANALYSIS OF PERSPECTIVE APPLICATION OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF LIGHT-FIELD REGISTRATION IN DESIGNING THE COSMIC APPARATUS FOR THE REMOTE SENCING OF THE EARTH

The paper considers a variant of constructing a system of technical vision of a spacecraft for remote sensing of the Earth based on an optical-electronic system for recording a light field. The results of experimental studies of the capabilities of optical-electronic systems for detecting a light field on the characteristics of small-sized defects of a plane surface are presented.

Keywords: optical-electronic systems, light field, technical vision system, registration.

Введение

Повышение засоренности околоземного космического пространства привело к увеличению количества столкновений действующих космических аппаратов (КА) с космическим мусором (КМ). В настоящее время единственным способом предотвращения подобного рода столкновений является маневрирование КА. Для обеспечения своевременного совершения маневра КА траектории движения больших фрагментов КМ постоянно отслеживают. Существенным недостатком такого подхода является ограниченность возможностей существующих КА по совершению маневра.

Разработка и внедрение новых технологий создания ракетно-космической техники в области миниатюризации привели к тому, что некоторые элементы аппаратуры КА стали более чувствительными к воздействию вредных факторов открытого космического пространства, в том числе мелких фрагментов КМ. Основным эффектом внешнего воздействия является постепенная деградация характеристик аппаратуры, а также невозможность установления причин в случае ее внезапного отказа. Использование средств защиты КА от воздействия КМ до конца не решаются, поскольку фрагменты КМ с линейными размерами менее 5 см в настоящее время устойчиво не отслеживаются.

В связи с этим, в настоящее время актуальным вопросом обеспечения жизнедеятельности КА является необходимость создания технических систем, способных осуществлять контроль целостности различных поверхностей КА, а также количественного оценивания степени их деградации.

Исследования

Достижения в области роботостроения позволяют рассматривать в ближайшей перспективе возможность создания космических робототехнических комплексов (КРТК) [1]. При этом спектр задач, которые могут быть решены с помощью робототехники, достаточно широк, в том числе определение объектов и параметров КМ [2]. Очевидно, одной из основных составляющих целевой аппаратуры КРТК будет система технического зрения (СТЗ).

В зависимости от конструктивных особенностей конкретного варианта построения КРТК, СТЗ может внести существенный вклад в решение следующих задач [3]:

- визуальный контроль целостности внешних элементов конструкции КА;
- оперативная оценка степени повреждения в случае столкновения с фрагментами КМ или возникновения отказа;
- накопление статистических данных о состоянии элементов конструкции КА для оценки степени их деградации;
- решение задач мониторинга околоспутникового пространства.

Основными требованиями к СТЗ при этом будет обеспечение получения изображения той или иной поверхности с разрешающей способностью, позволяющей обнаруживать и оценивать размеры дефектов как можно меньших размеров.

При формировании технического облика оптико-электронной системы (ОЭС) в составе подобной СТЗ могут быть использованы научно-методический задел и практический опыт создания автоматизированных бесконтактных измерительных средств размерного контроля изделий и их конструктивных элементов, которые уже используются в разных отраслях промышленности. Вместе с тем, следует учитывать ряд особенностей, связанных с условиями применения СТЗ в составе КРТК:

- динамика ракурсов и условий освещенности наблюдаемых поверхностей;
- различные отражательно-излучательные характеристики материалов наблюдаемых поверхностей;
- минимальные массогабаритные характеристики ОЭС.

Исходя из вышеприведенных условий, наиболее оптимальным вариантом выбора базовых элементов будет линзовая ОЭС видимого диапазона с матричным твердотельным фотоприемным устройством (ФПУ). Однако при решении задачи обнаружения дефектов как можно меньшего размера можно столкнуться с определенными противоречиями. Например, возможное разрешение некоторых твердотельных матричных ФПУ может превышать разрешающую способность проектирующих объективов ОЭС. При этом, максимальная точность измерений геометрических параметров может быть достигнута при точной фокусировке на контролируемый объект, а также минимальных абберационных искажений оптического тракта и устранения ряда других динамических эффектов. Указанные особенности создают трудности применения СТЗ с учетом предъявляемых требований.

В ряде случаев задача идентификации малоразмерных объектов может быть решена путем применения специальных алгоритмов обработки полученных СТЗ изображений [4–6]. Для выделения и оценки различных дефектов используются адаптивные алгоритмы технического зрения, которые позволяют реализовать автоматизированную систему контроля на базе компьютерных технологий [7].

Одним из перспективных направлений повышения линейного разрешения и обеспечения отображения объектов по глубине пространства СТЗ является применение ОЭС, основанных на принципе регистрации волнового фронта (световое поле) [8]. В настоящее время известно, что свойства регистрации светового поля могут быть

успешно использованы для определения геометрических свойств, таких, как расстояние и ориентации, геометрия и качество поверхности [9]. Основной особенностью ОЭС, регистрирующих световое поле (СП), является возможность получения информации о локализованных геометрических особенностях поверхности объекта контроля одновременно некоторой совокупностью фоточувствительных элементов матричного ФПУ в виде четырех измерений различных цветов и интенсивностей. Это достигается путем введения дополнительного массива микролинз перед матричным ФПУ, которые регистрируют пространственное и угловое изменение хода лучей от объекта контроля.

Поскольку основные проблемы контроля поверхностей КА заключаются в недостаточной и неопределенной резкости получаемых изображений, с одной стороны, с другой – малой контрастности зон деформаций в изображении. Поэтому основной задачей при разработке ОЭС СТЗ является обеспечение оптимального сочетания глубины резко изображаемого пространства (ГРИП), эффективно высокого разрешения и выделения контраста дефектных областей.

На рис. 1 представлена физическая модель регистрации поверхности ОЭС светового поля. Исходное информационное поле (I_0) формируется путем взаимодействия пучков лучей осветительной системы (L_0) с контролируемым объектом.



Рис. 1. Физическая и информационная модель ОЭС регистрации светового поля

Оптическая система регистратора (объектив, апертурная диафрагма, массив микролинз) формирует файлы с информационной структурой 3D изображения. Массив микролинз и матрица ФД представляют собой упорядоченную гетеродинную оптическую структуру [10], обеспечивают возможность формирования нового изображения путем угловой фильтрации входящих в оптическую систему лучей [11]. Информационное поле 2D изображения (I_{2D}) формируется специальным приложением (LytroDesktop) из информационного поля файла регистратора светового поля 3D (I_{3D}). Доминантные информационные $\{p_i\}$ составляющие контроля дефектов поверхности получают применением известных измерительных алгоритмов.

Метод регистрации СП обладает инвариантностью относительно изменения неконтролируемых условий регистрации изображений, обеспечивая сильные стороны методов морфологического анализа изображений [12].

Для оценивания возможностей и перспектив применения ОЭС регистрации светового поля в СТЗ КРТК на основе ранее проведенных исследований [13] были проведены эксперименты по наблюдению металлической поверхности, имеющей деформации различного характера и размеров. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. На рис. 2 а) и в) представлены изображения контролируемой поверхности, полученных камерой Ricoh GXR (модуль S10) с кольцевым осветителем и цифровой

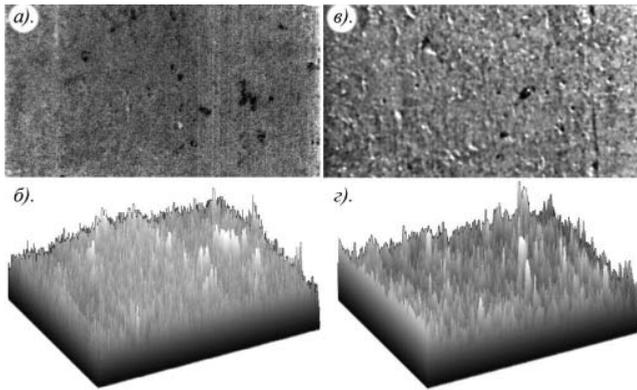


Рис. 2. Фрагмент изображений и распределения освещенности металлической поверхности:
 а), б) сделанного ОЭС камерой сфокусированного изображения;
 в), г) сделанного камерой светового поля

камерой светового поля Lytro Illum соответственно. На рис. 2 б) и в) – трехмерные модели распределения освещенности в этих изображениях.

Из рис. 2 видно, что регистрация поверхности позволяет выявить все дефекты поверхности, имеющие характер вмятин и наростов. После предварительной алгоритмической обработки изображения по распределению освещенности был выявлен ряд зон деформации (дефектов), имеющих различный характер (рис. 3).

Для получения метрологической точности измерения параметров и линейных размеров зон деформации необходимо применять процедуру калибровки оптической системы [14]. Для этого было проведено исследование ГРИП в соответствии с методикой, изложенной в [15], которое показало следующие результаты:

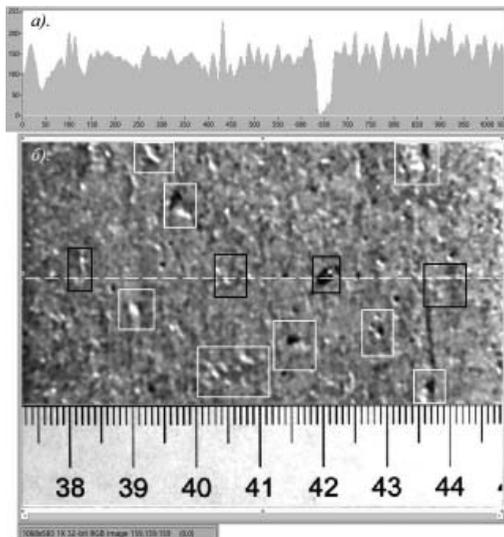


Рис. 3. Деформации поверхности:
 а) распределение освещенности в выделенной линии профиля;
 б) двухмерное изображение поверхности

– зависимость получаемых измерений линейных размеров дефектов поверхности от расстояния от нее до оптической системы в широком диапазоне имеет линейный характер;

– аберрации основной оптической системы оказывают незначительное влияние на результаты масштабного отображения поля зрения и проводимых измерений;

– оптическая система не требует предварительной оптической фокусировки.

Калибровка ОЭС позволяет построить функцию для измерения размеров зон деформации контролируемой поверхности объекта в зависимости от расстояния до ОЭС.

Заключение

ОЭС регистрации светового поля обладают более широкими возможностями контроля параметров целостности поверхности и оценивания характера и размеров дефектов по сравнению с ОЭС регистрации распределения освещенности.

При разработке СТЗ КРТК на основе ОЭС регистрации светового поля может быть использован научно-методический задел разработки принципов регистрации световых полей и практический опыт создания автоматизированных бесконтактных измерительных средств размерного контроля изделий, используемых в разных отраслях промышленности.

Литература

1. *Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Онов В.А.* Обоснование необходимых условий и вариантов применения робототехнических систем и комплексов ликвидации экстремальных ситуаций // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 3 (39). – С. 17–25.

2. *Воейкова А.В.* Проблема космического мусора // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – С. 61–62.

3. *Градовцев А.А., Кондратьев А.С., Лопота А.В.* Средства робототехнического обеспечения функций перспективной космической инфраструктуры // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 1. – С. 111–118.

4. *Махов В.Е.* Алгоритмы вейвлет преобразования для идентификации малоразмерных объектов // Компьютерные измерительные технологии : материалы I Международного симпозиума. – 2015. – С. 283–287.

5. *Махов В.Е.* Алгоритмы идентификации световых объектов // Компьютерные измерительные технологии : материалы I Международного симпозиума. – 2015. – С. 287–290.

6. *Кацан И.Ф., Махов В.Е.* Исследование алгоритмов идентификации малоразмерных объектов // Инновации на транспорте и в машиностроении : материалы IV Международной научно-практической конференции / отв. ред. И.В. Павлов. – 2016. – С. 63–66.

7. *Махов В.Е., Палаев А.Г., Потапов А.И.* Автоматизация контроля качества сварных швов, получаемых по ультразвуковой технологии // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 5. – С. 75–81.

8. *Ng, R.* Digital light field photography : a dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. @ Copyright by Ren Ng. – 2006. – 187 P.

9. Патент фирмы “Apple.Inc., Cupertino, CA(US)” Pub № US 2016/0063691A1 Plenoptic cameras in manufacturing systems (Пленоптическая камера в производственных системах). Filed: Sep. 3, 2014, Pub. Date: Mar. 3, 2016.

10. *Махов В.Е., Певзнер Б.З.* Влияние типа структуры на свойства гетерогенных материалов // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1985. – Т. 21. – № 9. – С. 1599–1607.

11. *Махов В.Е., Потанов А.И.* Анализ эффективности оптического метода контроля капилляров. Теоретические основы оптического контроля капилляров // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 7 (196). – С. 48–56.

12. *Зубюк А.В.* Алгоритм идентификации объектов по изображениям, основанный на разделении гиперплоскостью и нечувствительный к изменению условий освещения и ракурса / А.В. Зубюк, А.Б. Федотов // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. – 2015. – № 6. – С. 49–54.

13. *Maksarov, V.V., Makhov, V.E.* Method for studying shape of cutting tool by light field recorder // *Advances in Engineering Research*. – 2017. – Vol. 133. – P. 452–457.

14. *Dansereau D.G.* Decoding, Calibration and Rectification for Lenselet-Based Plenoptic Cameras / D.G. Dansereau, O. Pizarro, S.B. Williams // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2013. – P. 1027–1034.

15. *Махов В.Е., Репин О.С., Потанов А.И.* Исследование алгоритмов автоматизированной калибровки оптико-электронных измерительных систем с матричными фотоприемниками // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 67–74.

16. *Широбоков В.В., Нечай А.А.* Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2017. – № 1. – С. 88–93.

References

1. *Minakov, E.P., Tarasov, A.G., Onov, V.A.* Obosnovanie neobkhodimykh usloviy i variantov primeneniya robototekhnicheskikh sistem i kompleksov likvidatsii ekstremal'nykh situatsiy // *Nauchno-analiticheskiy zhurnal problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. – 2016. – № 3 (39). – S. 17–25.

2. *Voeykova, A.V.* Problema kosmicheskogo musora // *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. – 2014. – S. 61–62.

3. *Gradovtsev, A.A., Kondrat'ev, A.S., Lopota, A.V.* Sredstva robototekhnicheskogo obezpecheniya funktsiy perspektivnoy kosmicheskoy infrastruktury // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. – 2013. – № 1. – S. 111–118.

4. *Makhov, V.E.* Algoritmy veyvlet preobrazovaniya dlya identifikatsii malorazmernykh ob'ektov // *Komp'yuternye izmeritel'nye tekhnologii : materialy I Mezhdunarodnogo simpoziuma*. – 2015. – S. 283–287.

5. *Makhov, V.E.* Algoritmy identifikatsii svetovykh ob'ektov // *Komp'yuternye izmeritel'nye tekhnologii : materialy I Mezhdunarodnogo simpoziuma*. – 2015. – S. 287–290.

6. *Katsan, I.F., Makhov, V.E.* Issledovanie algoritmov identifikatsii malorazmernykh ob'ektov // *Innovatsii na transporte i v mashinostroenii : materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / otv. red. I.V. Pavlov*. – 2016. – S. 63–66.

7. *Makhov, V.E., Palaev, A.G., Potapov, A.I.* Avtomatizatsiya kontrolya kachestva svarnykh shvov, poluchaemykh po ul'trazvukovoy tekhnologii // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. – 2009. – T. 52. – № 5. – S. 75–81.

8. *Ng, R.* Digital light field photography : a dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. @ Copyright by Ren Ng. – 2006. – 187 P.

9. Патент фирмы “Apple.Inc., Cupertino, CA(US)” Pub № US 2016/0063691A1 Plenoptic cameras in manufacturing systems (Пленоптическая камера в производственных системах). Filed: Sep. 3, 2014, Pub. Date: Mar. 3, 2016.

10. *Makhov, V.E., Pevzner, B.Z.* Vliyanie tipa struktury na svoystva geterogennykh materialov // *Izv. AN SSSR. Neorganicheskie materialy*. – 1985. – T. 21. – № 9. – S. 1599–1607.

11. *Makhov, V.E., Potapov, A.I.* Analiz effektivnosti opticheskogo metoda kontrolya kapillyarov. Teoreticheskie osnovy opticheskogo kontrolya kapillyarov // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem. – 2013. – № 7 (196). – S. 48–56.

12. *Zubyuk, A.V.* Algoritm identifikatsii ob'ektov po izobrazheniyam, osnovanny na razdelenii giperploskost'yu i nechuvstvitel'nyy k izmeneniyu usloviy osveshcheniya i rakursa / A.V. Zubyuk, A.B. Fedotov // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika, astronomiya. – 2015. – № 6. – S. 49–54.

13. *Maksarov, V.V., Makhov, V.E.* Method for studying shape of cutting tool by light field recorder // Advances in Engineering Research. – 2017. – Vol. 133. – P. 452–457.

14. *Dansereau D.G.* Decoding, Calibration and Rectification for Lenselet-Based Plenoptic Cameras / D.G. Dansereau, O. Pizarro, S.B. Williams // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2013. – P. 1027–1034.

15. *Makhov, V.E., Repin, O.S., Potapov, A.I.* Issledovanie algoritmov avtomatizirovannoy kalibrovki optiko-elektronnykh izmeritel'nykh sistem s matrichnymi fotopriemnikami // Kontrol'. Diagnostika. – 2014. – № 8. – S. 67–74.

16. *Shirobokov, V.V., Nechay, A.A.* Algoritm planirovaniya energosberegayushchey parallel'noy obrabotki informatsii s uchedom informatsionnoy vazhnosti i vremeni postupleniya zadach // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya “Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie”. – 2017. – № 1. – S. 88–93.