

УДК 621.397.001

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗА ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ

А.В. Денисов, Д.А. Капитонов, А.С. Курников

АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация
Адрес для переписки: www.denisoff@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.05.19, принята к печати 01.07.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Денисов А.В., Капитонов Д.А., Курников А.С. Построение трехмерного образа искусственного космического объекта методом лазерной локации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 783–789 doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789

Аннотация

Предмет исследования. Разработан новый метод для построения «карты глубины» искусственного космического объекта. Проанализированы методы построения трехмерного образа искусственного космического объекта лазерным локатором и представлены основные результаты экспериментального исследования. За основу разработки взяты методы телевизионной локации. Первый метод разработан в «Научно-исследовательском институте телевидения» (Россия, Санкт-Петербург) и предложен П.С. Варгинным. Метод позволяет получить «карту глубины» удаленного искусственного космического объекта за двойное время пролета одного импульса света от точки наблюдения до объекта. Второй метод применяется в импульсной системе определения дальности и основан на работе flash-лидара. Система облучает интересующую область космического пространства, где предположительно находится объект наблюдения, отраженный сигнал от объекта сначала фиксируется фотодиодом и производится оценка дистанции до объекта. Затем по определенному количеству точек строится трехмерный образ объекта. Третий метод реализуется многоимпульсной системой телевизионного лазерного локатора и основан на использовании многоимпульсной подсветки для исследования объекта наблюдения. За счет этого удастся существенно увеличить разрешение по глубине до 10–50 мм и уменьшить пиковую мощность излучения лазера. **Метод.** На основе существующих методов с целью увеличения энергии оптического сигнала предложен новый метод многоимпульсной подсветки искусственного космического объекта, основанный на использовании матрицы прибора с зарядовой связью в режиме сверхмалого времени накопления (до 200 нс). Метод дает возможность оперативного высокоточного измерения углового разрешения (0,25 угл. мин.), дальности до цели (100–2000 м) и построения «карты глубины». **Основные результаты.** Разработан макет лазерной системы, состоящий из телевизионной камеры на основе прибора с зарядовой связью с разрешением 752×582 пиксела и кадровой частотой 50 Гц, а также лазерного диода с минимальной длительностью импульса 40 нс и частотой повторения импульсов 1 кГц. Управление и синхронизация лазера производится с помощью программируемой логической интегральной схемы, установленной в телевизионной камере, что обеспечивает синхронность работы камеры и излучающего лазера. Система позволяет реализовать взаимные соотношения точности измерения дистанции, угловое и временное разрешение. Моделирование показало, что погрешность измерений на малых дистанциях не превышает 20 мм, а на дистанции 2000 м не превышает 160 мм. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют определить характеристики телевизионной лазерной системы, необходимые для решения задачи локации искусственных космических объектов на дальности от 100 до 2000 м. Анализ исследований показывает, что современные лазеры нацелены на работу в спектральном диапазоне 1,54–1,57 мкм, что значительно снижает коэффициент полезного действия телевизионной лазерной системы от 2 до 10 раз. Для улучшения тактико-технических свойств в целях инспекции космоса необходимо реализовывать лазерные системы с длинами волн 0,86–1,06 мкм.

Ключевые слова

искусственный космический объект, космический аппарат, телевизионный лазерный локатор, оптико-электронный комплекс

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789

THREE-DIMENSIONAL IMAGE CREATION FOR ARTIFICIAL SPACE OBJECT BY LASER RANGING

A.V. Denisov, D.A. Kapitonov, A.S. Kurnikov

JSC Television Scientific Research Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation
Corresponding author: www.denisoff@mail.ru

Article info

Received 28.05.19, accepted 01.07.19

Article in Russian

For citation: Denisov A.V., Kapitonov D.A., Kurnikov A.S. Three-dimensional image creation for artificial space object by laser ranging. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 783–789 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-783-789

Abstract

Subject of Research. The paper presents a novel method for creation of an artificial space object “depth map”. The analysis of methods for creation of three-dimensional image of an artificial space object by laser locator is performed and the experimental study results are presented. The following television location methods form the basis for development. The first method of television location proposed by P. S. Vargin was developed in “Television Scientific Research Institute” (St. Petersburg, Russia). The method provides for creation of a “depth map” for remote artificial space object in a double flight time of one light pulse from the observation point to the object. The second method is used in the pulse range determination system and is based on flash-lidar performance. This system irradiates the space area of interest where the object of observation is supposed to be located; the reflected signal from the object is first recorded by a photodiode and the distance to the object is estimated. Then the object three-dimensional image is built on a certain number of points. The third method is a multi-pulse system of television laser locator based on the use of multi-pulse illumination for the study of the object under observation. Thus, it is possible to increase significantly the resolution in depth up to 10–50 mm and reduce the peak power of the laser radiation. **Method.** A novel method of multi-pulse illumination of an artificial space object is proposed on the basis of the considered methods in order to increase the energy of the optical signal. The method is based on the use of the charge-coupled device matrix in the mode of ultra-short accumulation time (up to 200 ns). This method enables rapid high-precision measurement of angular resolution (0.25 ang. min), range to the target (100–2000 m) and a “depth map” creation. **Main Results.** A laser system model was developed consisting of a television camera based on the charge-coupled device with a resolution of 752×582 pixels, a frame frequency of 50 Hz, and a laser diode with minimum pulse duration of 40 ns and a pulse repetition rate of 1 kHz. Control and synchronization of the laser is carried out by FPGA installed in the television camera ensuring the synchronization of the camera and the emitting laser. The system gives the possibility to realize interchangeable relations of distance measurement accuracy, angular and time resolution. The simulation has showed that the measurement error at small distances is less than 20 mm, and at a distance of 2000 m is less than 160 mm. **Practical Relevance.** The obtained results determine the characteristics of the television laser system necessary to solve the location problem for artificial space objects at a range from 100 m to 2000 m. Analysis of studies shows that modern lasers are aimed at operating in the spectral range of 1.54–1.57 μm, that reduces significantly the efficiency of the television laser system from 2 to 10 times. Therefore, it is necessary to implement laser systems with wavelengths of 0.86–1.06 microns to improve the tactical and technical properties for space inspection.

Keywords

artificial space object, spacecraft, television laser radar, optical-electronic complex

Введение

Поиск и исследование объектов в космосе имеет важное прикладное значение как для нужд специальных служб, так и для оценки загруженности действующих орбит. Проблема выявления недействующих космических аппаратов, списанных в связи с истечением срока эксплуатации, поиск иностранных спутников в разведывательных целях, а также выявление различного вида космического мусора является одним из приоритетных направлений по разработке и исследованию научно-технического потенциала в части применения телевизионных лазерных систем. Работа лазерной системы основана на импульсном методе и была впервые предложена русским ученым д.ф.-м.н. Лебедевым А.А. в 1936 г. Метод заключается в облучении заданного пространства короткими импульсами световой энергии и в синхронизированном приеме сигналов, отраженных от объекта наблюдения. Данный метод позволяет «вырезать» по глубине из окружающего пространства участки, представляющие интерес, и резко уменьшить зависимость от внешних условий наблюдения [1].

Импульсный метод наблюдения основан на трех известных свойствах электромагнитных волн [2]:

- 1) способности отражаться от любых значимых объектов, кроме космической пыли. Это связано с тем, что идентификация происходит по блику интересующего объекта;
- 2) использование узконаправленного лазерного луча, с помощью которого производится инспекция космического пространства, что позволяет сфокусироваться на объекте наблюдения. Это направление определяется по расположению оси оптической системы, формирующей лазерное излучение, где коэффициент направленного действия и диаметр фотоприемного устройства определяется следующей формулой:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S,$$

где G — коэффициент направленного действия; π — математическая константа; S — фиктивная площадь фотоприемного устройства, м²; λ — длина волны излучения, мкм;

- 3) способности лазерного излучения распространяться с постоянной скоростью. Это дает возможность определять дальность до искусственного космического объекта. Так, при импульсном методе используется следующее известное соотношение:

$$L = \frac{ct_H}{2},$$

где L — расстояние до искусственного космического объекта, км; c — скорость распространения излучения, км/с; t_H — время прохождения импульса до объекта и обратно, с.

Существенным достоинством использования телевизионного лазерного локатора в составе оптико-электронного комплекса является возможность оперативного высокоточного измерения углового разрешения (не более 0,25 угл. мин.) и дальности до цели (до 2000 м) при сравнительно небольших его габаритах. Рассмотрим варианты построения трехмерного изображения методами телевизионной лазерной локации.

Метод телевизионной локации для построения «карты глубины»

Метод телевизионной лазерной локации, разработанный в АО «НИИ телевидения» (Россия, Санкт-Петербург) [3], позволяет получить «карту глубины» удаленного искусственного космического объекта за двойное время пролета одного импульса света от точки наблюдения до объекта. Разрешение по углу изображения «карты глубины» при этом ограничено лишь разрешением телевизионного (фото) датчика, а разрешение по глубине для искусственных космических объектов измеряется сантиметрами. На рис. 1 приведена функциональная схема телевизионного лазерного локатора (где φ, ψ — угловые координаты точки поверхности трехмерного объекта (начало координат, излучатель и приемник находятся в одной точке), $A(t)$ — форма импульсного лазерного излучения, $K(t)$ — выбранный закон модуляции, $R(\varphi, \psi)$ — координата дальности точки поверхности объекта, $U_1(\varphi, \psi)$ — первое записанное изображение, $U_2(\varphi, \psi)$ — второе записанное изображение, $B(x, y)$ — формируемая «карта глубины» объекта наблюдения).

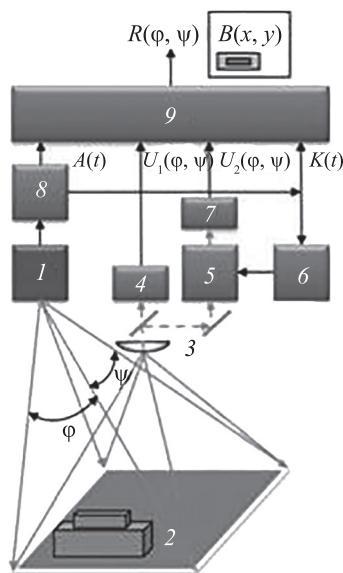


Рис. 1. Функциональная схема телевизионного лазерного локатора

Источник света 1 широким пучком подсвечивает поверхность 2 трехмерного объекта короткими импульсами излучения. Отраженное от поверхности излучение поступает через оптическую систему 3, состоящую из объектива и разделяющей поток излучения пары зеркал, на два фотодатчика (приемника излучения). Датчик 4, например, фотоприемная матрица, формирует на своем выходе пропорционально экспозиции излучения, прошедшего через полупрозрачное зеркало, на каждый из ее сенселей, обычное изображение объекта. Другой датчик 5, например, электронно-оптический преобразователь (ЭОП), используя излучение, отраженное от пары зеркал, также формирует на своем выходе (экране) изображение. Однако изображение на экране ЭОП необычное, поскольку во время прихода отраженного от объекта излучения ЭОП быстро меняет (модулирует) свое усиление при воздействии сигнала блока управления 6. Например, при линейном увеличении усиления ЭОП в процессе приема излучения дальние точки однородно окрашенной поверхности объекта на экране ЭОП будут выглядеть более яркими по сравнению с ближними, поскольку импульс света от них приходит позже, когда усиление ЭОП уже сильно увеличилось. Необычность изображения на экране ЭОП обусловлена одновременным воздействием двух факторов на его формирование: тона раскраски и рельефа поверхности объекта наблюдения. Яркость элемента изображения определяется как коэффициентом отражения импульса света от элемента поверхности объекта, так и запаздыванием прихода этого импульса на приемник пропорционально удаленности элемента поверхности. Подчеркнем, что запаздывание влияет на яркость элемента изображения в основном из-за модуляции усиления ЭОП и незначительно из-за уменьшения энергии света приходящего на приемник пропорционально квадрату расстояния до элемента объекта.

Изображение с экрана ЭОП репродуцируется сочлененным с ним фотодатчиком 7, например, фотоприемной матрицей, обеспечивающей его последующую развертку. Момент излучения импульса света источника подсветки фиксируется специальным быстродействующим одноэлементным фотодатчиком 8, сигнал которого запускает счетчик времени задержки начала формирования сигнала модуляции ЭОП. Система формирования карты глубины рельефа поверхности объекта наблюдения 9 обеспечивает поэлементное вычисление отношения сигналов соответствующих элементов фотодатчиков 7 и 4. Полученная матрица отношений с учетом формы импульсов излучения подсветки и закона модуляции усиления ЭОП служит основой для формирования «карты глубины» — $B(x, y)$ удаленного объекта наблюдения.

С использованием телевизионного лазерного локатора появляется возможность синтеза цветного объемного изображения объекта наблюдения. При этом исходная информация о цвете элементов объекта кодируется как обычно тремя R (красная), G (зеленая) и B (синяя) компонентами полного изображения, а информация о дальности этих элементов дополнительной компонентой дальности — D . D -компоненту в литературе по обработке изображений принято называть «картой глубины» [4].

Импульсная система определения дальности

Одним из вариантов построения трехмерного образа искусственного космического объекта является система flash-лидара [5]. Следует выделить следующие характеристики такой системы:

— комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП)-сенсор реализован на вертикальных лавинных фотодиодах;

— кадровая частота составляет 60 Гц;

— разрешение — 688×384 пикселей;

— ИК-лазер с пиковой мощностью равной 1,2 кВт;

— ширина импульсного лазера составляет менее 50 нс;

— частота повторения импульсов лазера — 6 кГц;

— разрешение по глубине составляет 10 см;

— диапазон рабочих дистанций до объекта исследования составляет от 1 до 250 м.

Лазер облучает интересующую область космоса, в пределах которой, возможно, находится объект. При нахождении объекта поиска отраженный сигнал от искусственного космического объекта фиксируется фотодиодом и фиксируется оценка дистанции до заданного объекта. Затем лазер излучает очередной импульс с учетом полученных данных, и отраженный в этот момент сигнал фиксируется на фотоприемнике телевизионной камеры, таким образом, вырабатывается информация о дальности до объекта наблюдения. Полученные кадры обрабатываются, далее на их основе восстанавливается трехмерный образ искусственного космического объекта. На рис. 2 представлена структурная схема flash-лидара, где ТВК — телевизионная камера.

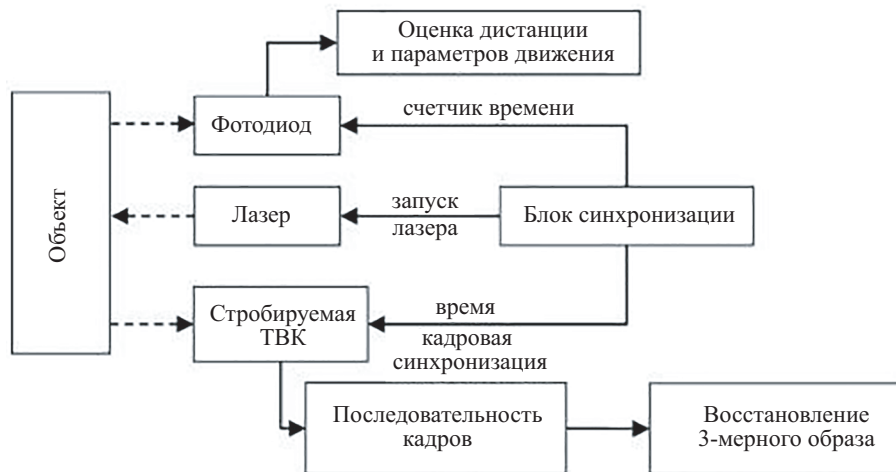


Рис. 2. Структурная схема flash-лидара

Данное решение имеет такие преимущества, как: отсутствие механических движущихся частей, малые габариты и высокая скорость сканирования в сравнении систем с механическим сканированием [6]. В недостатки же можно отнести небольшое разрешение по глубине, связанное с длительностью излученного импульса, также недостатком является большая мощность излучения лазера. Тем не менее данное решение является наиболее перспективным для построения трехмерного изображения без сканирования. Стоит отметить, что в нескольких миссиях НАСА использовала данную систему с предельной дальностью работы около 3000 м, но в них использовались специально спроектированные фотоприемники с разрешением 128×128 пиксела [7, 8].

Многоимпульсная система телевизионного лазерного локатора

Отличием многоимпульсного метода от импульсного является использование многоимпульсной подсветки для исследования объекта наблюдения. За счет этого удается существенно увеличивать разрешение по глубине до 10–50 мм и уменьшать пиковую мощность излучения лазера [9, 10]. Принцип формирования трехмерного изображения представлен на рис. 3, где МПЗС — матрица прибора с зарядовой связью, R — оценка дистанции до объекта в текущее время, D — временной отрезок между двумя кадрами, $E(r)$ — текущий отклик, r — дистанция.

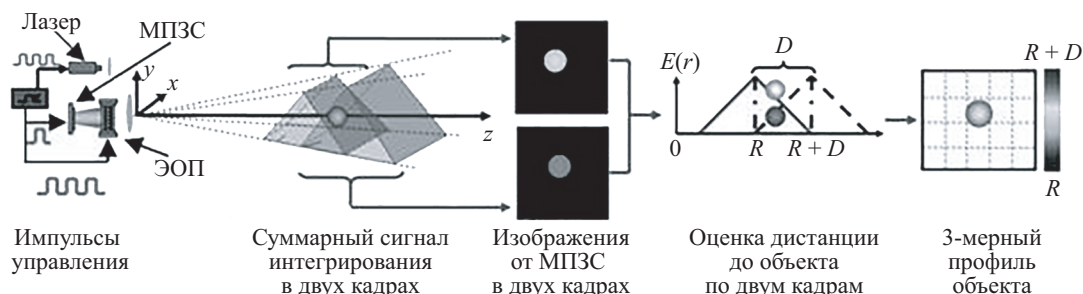


Рис. 3. Принцип работы многоимпульсной телевизионной системы для формирования трехмерного изображения

В данной системе для реализации малых времен (10–200 нс) накопления используется оптико-электронный преобразователь, при этом недостатком применения преобразователя является малый ресурс его работы, а также малая устойчивость к световым перегрузкам [11].

В АО «НИИ телевидения» был реализован макет многоимпульсной телевизионной системы (рис. 4) с использованием многоимпульсной подсветки с учетом использования в ней прибора с зарядовой связью со строчным переносом в режиме сверхмалого времени накопления [12]. В макете использована телевизионная камера (разработка АО «НИИ телевидения»), лазерный диод SPL LL90_3 с минимальной длительностью импульса 40 нс с частотой повторения импульсов 1 кГц и оптическая система.

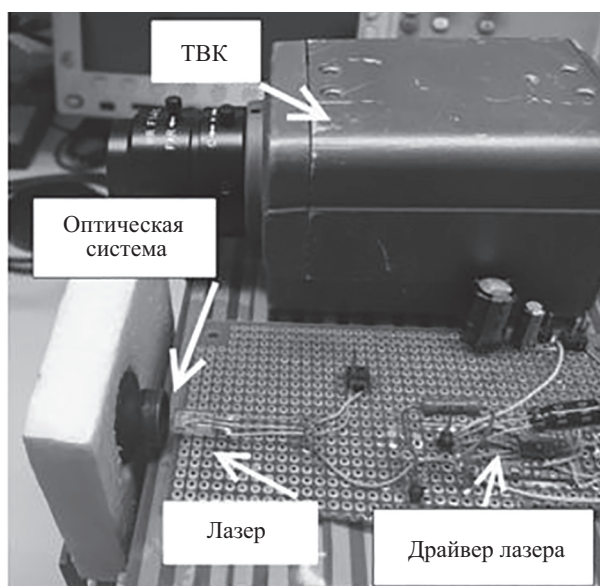


Рис. 4. Макет телевизионной лазерной системы

Управление и синхронизация лазера производится с помощью программируемой логической интегральной схемы, установленной в телевизионной камере, ее производительности достаточно для обеспечения синхронной работы камеры и излучающего лазера. Производить обработку кадров, полученных с помощью данной системы можно в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) (если обрабатывать часть кадра с интересующим объектом), а также кадры можно отправлять на электронно-вычислительную машину посредством платы видео-захвата. Полученные сотрудниками АО «НИИ телевидения» осциллограммы импульсов управления лазером и импульсов управления накоплением приведены на рис. 5.

Стоит отметить, что во время экспериментов происходило искажение формы для сигналов малой длительности, но данный недостаток был устранен путем объединения всех блоков в единый комплекс, представленный на рис. 4.

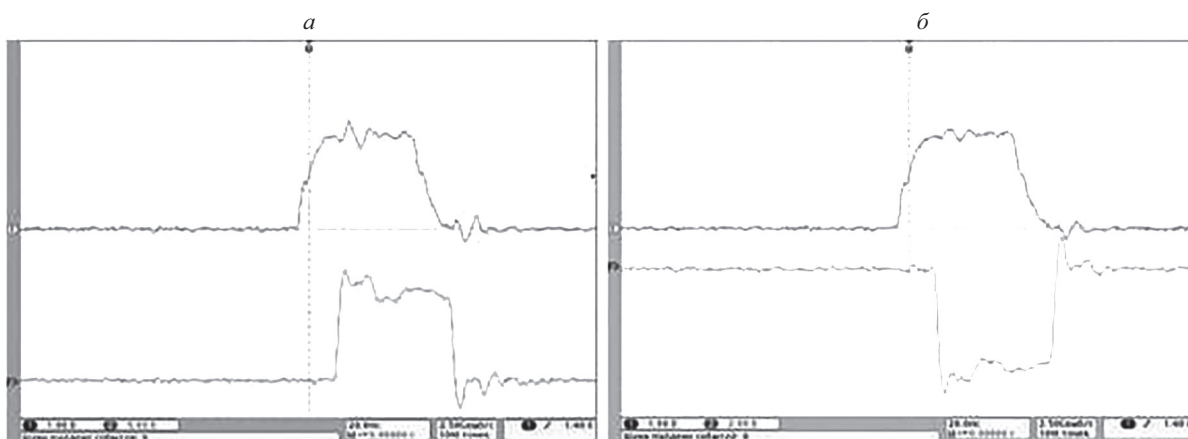


Рис. 5. Осциллограмма импульса управления лазером из камеры — верхняя (а), импульса лазера — нижняя (а), осциллограмма импульса накопления из камеры — верхняя (б), импульса накопления на входе прибора с зарядной связью — нижняя (б)

Трехмерное изображение объекта

Разработкой специального программного обеспечения для обработки результатов моделирования и получения «карты глубины» исходного изображения занимаются ВУЗы и ведущие организации-разработчики, имеющие опыт выполнения составных частей научно-исследовательских работ (СЧ НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР) по данной тематике. Это Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург), АО «НИИ телевидения», а также АО «ЛОМО» (Россия, Санкт-Петербург). Результаты моделирования представлены на рис. 6 [13, 14].

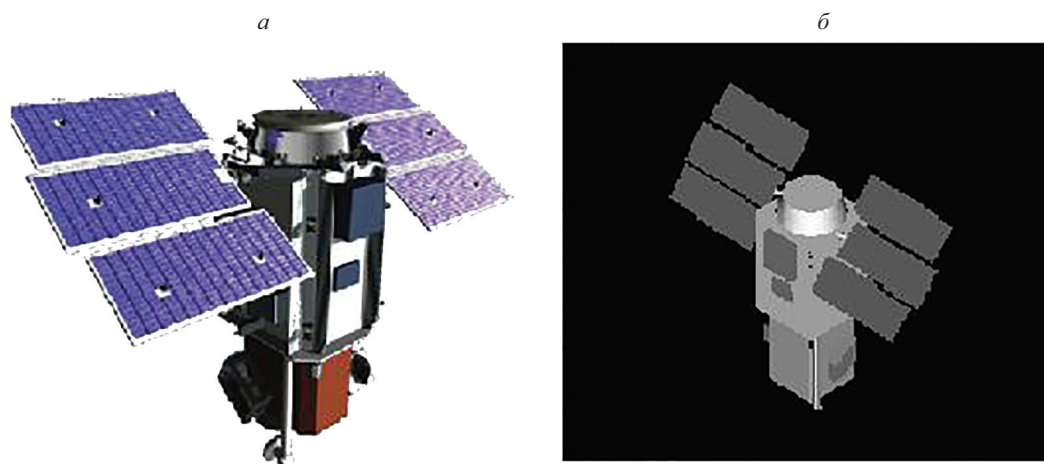


Рис. 6. Корпус исходного изображения космического аппарата (а) и его компьютерная трехмерная модель (б) (масштаб изготовленной модели объекта 1:100)

Заключение

Поиск и регистрация искусственных космических объектов является сложной энергозатратной задачей для разработчика. На сегодняшний день телевизионные лазерные системы функционируют в диапазоне измерения от 0,5 до 2000 м с погрешностью на дальности: 100–2000 м — не более 0,3 м и 0,5–100 м — не более 0,05 м.

Как показывает практика, в зависимости от формы исследуемого объекта методы измерения могут быть основаны на различных сочетаниях классификационных признаков. Для достижения поставленных целей необходимо разрабатывать системы, обладающие высокой помехозащищенностью, позволяющие измерять параметры механических колебаний сложной формы на значительных расстояниях до объекта исследования, обеспечивать высокое соотношение сигнал/шум, а также осуществлять анализ выходного сигнала фотоприемника в частном диапазоне выше области низкочастотных шумов фотоприемника и лазера. На сегодняшний день АО «НИИ телевидения» активно ведет работы по наращиванию научно-технического потенциала в области лазерных систем.

Литература

1. Голицын А.А., Сейфи Н.А. Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприемника со строчным переносом // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 11. С. 1040–1047. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1040-1047
2. Ставров А.А., Поздняков М.Г. Импульсные лазерные дальнометры для оптико-локационных систем // Доклады БГУИР. 2003. Т. 1. № 2. С. 59–65.
3. Варгин П.С. Способ определения пространственной формы объектов. АС СССР № 174185, RU1840824C. Бюл. 2012. № 15, SU 1 840 824 A1.
4. Варгин П.С. Объемное телевидение – символ XXI века. Broadcasting. 2011. № 4–8.
5. Hirose Y., Koyama S., Ishii M., Saitou S., Takemoto M., Nose Y., Inoue A., Sakata Y., Sugiura Y., Kabe T., Usuda M., Kasuga S., Mori M., Odagawa A., Tanaka T. A 250 m direct time-of-flight ranging system based on a synthesis of sub-ranging images and a vertical avalanche photo-diodes (VAPD) CMOS image sensor // Sensors. 2018. V. 18, N 11. P. 3642. doi: 10.3390/s18113642
6. Roback V.E., Amzajerdian F., Bulyshev A.E., Brewster P.F., Barnes B.W. 3D flash lidar performance in flight testing on the morpheus autonomous, rocket-propelled lander to a lunar-like hazard field // Proceedings of SPIE. 2016. V. 9832, P. 983209. doi: 10.1117/12.2223916
7. Amzajerdian F., Vanek M., Petway L., Pierrottet D., Busch G., Bulyshev A. Utilization of 3D imaging flash lidar technology for autonomous safe landing on planetary bodies // Proceedings of SPIE. 2010. V. 7608, P. 760828. doi: 10.1117/12.843324
8. Amzajerdian F., Roback V.E., Brewster P.F., Hines G.D., Bulyshev A. Imaging flash lidar for autonomous safe landing and spacecraft proximity operation // Proc. AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2016.
9. Xinwei W., Youfu L., Yan Z. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging // Optics Express. 2015. V. 23. N 6. P. 7820–7831. doi: 10.1364/OE.23.007820
10. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing // Proceedings of SPIE. 2014. V. 9260, P. 92604L. doi: 10.1117/12.2074906
11. Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К., Манцетов А.А., Козлов В.В., Рычажников А.Е., Баранов П.С., Иванова А.В. Управление режимом накопления в твердотельных фотоприемниках // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 11. С. 84–92.
12. Баранов П.С., Курников А.С. Макет многоимпульсной активной телевизионной системы для построения трехмерного образа объекта // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 5. С. 25–30.
13. Иванов В.Г., Каменев А.А. Оценивание дальности обнаружения космических объектов бортовой многоспектральной оптико-электронной аппаратурой с матричными фотоприемными устройствами смотрящего типа // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 14–22.
14. Логунов С.В., Олейников М.И. Особенности фотометрических наблюдений искусственных спутников Земли наземными оптическими средствами // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 70–77.

Авторы

Денисов Андрей Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1355-3056, www.denisoff@mail.ru

Капитонов Дмитрий Алексеевич — инженер, АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-4246-5466, 295demon@mail.ru

Курников Александр Сергеевич — инженер, АО «НИИ телевидения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9236-671X, kurnikov93@inbox.ru

References

1. Golitsyn A.A., Seyfi N.A. Active-pulse observation method using CCD photodetector with interline transfer. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 11, pp. 1040–1047. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1040-1047
2. Stavrov A.A., Pozdniakov M.G. Pulse laser rangefinders for optic location systems. *Doklady BGUIR*, 2003, vol. 1, no. 2, pp. 59–65. (in Russian)
3. Vargin P.S. Method of determining object space form. *Patent RU1840824C*, 2012. (in Russian)
4. Vargin P.S. Volumetric television is a symbol of the 21st century. *Broadcasting*, 2011, no. 4–8. (in Russian)
5. Hirose Y., Koyama S., Ishii M., Saitou S., Takemoto M., Nose Y., Inoue A., Sakata Y., Sugiura Y., Kabe T., Usuda M., Kasuga S., Mori M., Odagawa A., Tanaka T. A 250 m direct time-of-flight ranging system based on a synthesis of sub-ranging images and a vertical avalanche photo-diodes (VAPD) CMOS image sensor. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 11, pp. 3642. doi: 10.3390/s18113642
6. Roback V.E., Amzajerdian F., Bulyshev A.E., Brewster P.F., Barnes B.W. 3D flash lidar performance in flight testing on the morpheus autonomous, rocket-propelled lander to a lunar-like hazard field. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9832, pp. 983209. doi: 10.1117/12.2223916
7. Amzajerdian F., Vanek M., Petway L., Pierrottet D., Busch G., Bulyshev A. Utilization of 3D imaging flash lidar technology for autonomous safe landing on planetary bodies. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7608, pp. 760828. doi: 10.1117/12.843324
8. Amzajerdian F., Roback V.E., Brewster P.F., Hines G.D., Bulyshev A. Imaging flash lidar for autonomous safe landing and spacecraft proximity operation. *Proc. AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2016*.
9. Xinwei W., Youfu L., Yan Z. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 6, pp. 7820–7831. doi: 10.1364/OE.23.007820
10. Wang X., Cao Y., Cui W., Liu X., Fan S., Zhou Y., Li Y. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9260, pp. 92604L. doi: 10.1117/12.2074906
11. Umbitaliev A.A., Tsytulin A.K., Mantsvetov A.A., Rychazhnikov A.E., Baranov P.S., Ivanova A.V., Kozlov V.V. Controlling the accumulation regime in solid-state photodetectors. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 11, pp. 738–743. doi: 10.1364/JOT.79.000738
12. Baranov P.S., Kurnikov A.S. Multi-pulse active television system model for 3D imaging. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2018, no. 5, pp. 25–30. (in Russian)
13. Ivanov V.G., Kamenev A.A. Estimation of space objects detection range by the onboard multi-spectral optical-electronic equipment with staring photodetectors. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2016, no. 3, pp. 14–22. (in Russian)
14. Logunov S.V., Oleinikov M.I. Peculiarities of photometric observations of artificial earth satellites by ground optical means. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2018, no. 2, pp. 70–77. (in Russian)

Authors

Andrey V. Denisov — PhD, Senior scientific researcher, JSC Television Scientific Research Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1355-3056, www.denisoff@mail.ru

Dmitry A. Kapitonov — engineer, JSC Television Scientific Research Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4246-5466, 295demon@mail.ru

Alexander S. Kurnikov — engineer, JSC Television Scientific Research Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9236-671X, kurnikov93@inbox.ru