

Л.В. Границкий, А.А. Черемисин, В.А. Бартнев, А.М. Ильных

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Обсуждаются возможности спутниковых систем для обнаружения малых тел в околоземном космическом пространстве и верхней атмосфере Земли при использовании ультрафиолетового диапазона длин волн. Ультрафиолетовый диапазон 200–300 нм дает преимущество, по сравнению с ИК и видимым, в предельной дальности обнаружения объектов заданного размера на фоне освещенной Солнцем поверхности Земли, что связано с высоким контрастом объект-фон в УФ-диапазоне, обусловленным поглощением солнечной радиации озоном верхней атмосферы в полосе Хартли. Представлено описание одной из разработанных систем мониторинга космического мусора в ультрафиолетовом диапазоне.

Проблема мониторинга околоземного космического пространства в настоящее время актуальна. Одним из аспектов этой проблемы является создание спутниковых систем, предназначенных для обнаружения малых тел. Область применения таких систем – выявление в пространстве «космического мусора» [1, 2]; исследование микрометеорных потоков и «мини-комет», состоящих из льда [3, 4], интерес к которым стимулируется их сравнительно недавним открытием и выдвинутыми в связи с этим гипотезами о внеземном происхождении водной оболочки Земли [3] и атмосферного кислорода [5]; дальнейшее заблаговременное обнаружение опасных небесных тел [6].

В Научно-исследовательском физико-техническом институте Красноярского государственного университета при участии Красноярского технического государственного университета велись разработки пассивных оптических систем обнаружения малых тел с бортов космических аппаратов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Ультрафиолетовые системы, так же как и системы видимого и ИК-диапазонов, могут решать задачу обнаружения освещенного Солнцем объекта на фоне космоса и ночной Земли. Но преимущество ультрафиолетового диапазона, по сравнению с ИК и видимым, проявляется в предельной дальности обнаружения объекта заданного размера на фоне освещенной поверхности Земли. Преимущество обусловлено высоким контрастом объект-фон в ультрафиолетовом диапазоне 200–300 нм, что связано с поглощением солнечной радиации атмосферным озоном в полосе Хартли.

На рис. 1 представлена зависимость спектрального коэффициента контраста K_λ от длины волны λ : $K_\lambda = (B_{\lambda 0} - B_{\lambda \Phi})/B_{\lambda \Phi}$, где $B_{\lambda 0}$ – яркость идеально рассеивающего солнечное излучение объекта, а $B_{\lambda \Phi}$ – спектральная яркость совместного фона освещенной Солнцем атмосферы и поверхности Земли. Значения $B_{\lambda 0}$ рассчитывались по формуле $B_{\lambda 0} = \alpha E_\lambda / \pi$, где E_λ – спектральная плотность потока

солнечного излучения на границе атмосферы Земли, α – альbedo объекта, здесь принятое равным 1. Зависимость E_λ [7] от λ также представлена на рис. 1. Метки на кривой указывают процентную долю интегрального потока ультрафиолетового излучения с длиной волны, короче отмеченной, от общего потока солнечной энергии на границе атмосферы. Для построения K_λ использовались данные из работ [8–10]. В видимой части спектра значения K_λ лежат в пределах нескольких единиц. Близкими к представленной получаются зависимости K_λ от λ , построенные по данным исследований, проведенных нами в 1983–1986 гг. с помощью ультрафиолетового телескопа космической астрофизической станции «Астрон» в диапазоне 255÷310 нм; по данным, полученным в 1985–1987 гг. с помощью спектрометра БУФС-1 с борта ИСЗ «Метеор-3» в диапазоне 280÷340 нм [11]; по данным с «Nimbus-G» [12] в области 280÷300 нм; по данным с «Nimbus-7» в диапазоне 300÷340 нм [13].

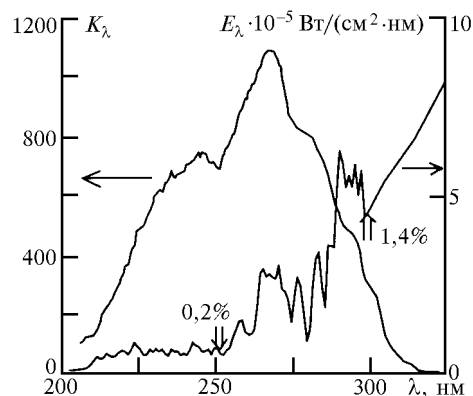


Рис. 1. Спектральный коэффициент контраста K_λ объект-фон в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. E_λ – спектральная плотность потока солнечного излучения на границе атмосферы

Как видно из рис. 1, максимальные значения коэффициента контраста $\sim 10^3$ достигаются в области длин волн 260÷280 нм. Кроме высокого контраста

для повышения дальности обнаружения и снижения времени экспозиции требуется регистрировать возможно большую долю энергии, рассеиваемой объектом. Это, в частности, приводит к требованию достаточной широкополосности системы по спектру. Исходя из этого, можно определить рабочий диапазон длин волн как диапазон 200÷300 нм. При этом среднее значение контраста K_λ , рассчитываемое при использовании интегральных по спектру характеристик потоков излучений, для этого диапазона равно примерно 500.

В выбранном диапазоне кроме высокого коэффициента спектрального контраста наблюдается и достаточно высокая стабильность уровня фона. Согласно данным работы [13] для $\lambda = 302$ нм и результатам проведенных нами исследований с борта АС «Астрон» для $\lambda = 280$ и 273 нм случайные вариации фоновой спектральной яркости оцениваются относительной величиной среднеквадратических отклонений порядка 10% от средних величин соответствующих яркостей.

Системы обнаружения в первую очередь характеризуются предельными дальностями обнаружения тел заданного размера. Предельные дальности L_{\max} при прочих равных условиях определяют величину эффективного зрачка питающей оптики D_3 и, тем самым, габаритно-массовые характеристики всей системы. На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости L_{\max} от D_3 для тел нескольких характерных размеров: $d_3 = 1$ мм – столкновение с частицами такого эффективного диаметра d_3 становится опасным для КА [1]; $d_3 = 10$ см – характерный пороговый размер объектов, поддающихся наземным радиолокационным наблюдениям [2]; 10 м – эффективным характерный диаметр больших космических станций. Альbedo объектов принято равным 0,4.

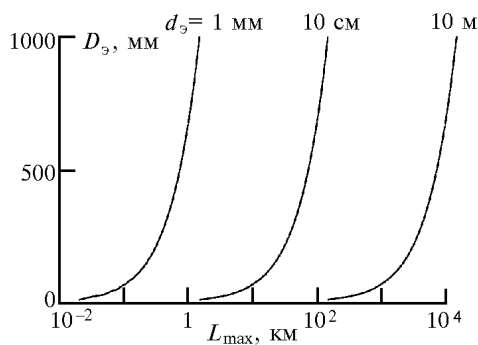


Рис. 2. Предельная дальность L_{\max} обнаружения малых тел в ультрафиолетовом диапазоне в зависимости от диаметра входного зрачка D_3 системы обнаружения и эффективного диаметра мишени объекта d_3 .

В НИФТИ КрГУ были проведены исследования интегральных коэффициентов отражения образцов различных материалов. Использованное значение характерно для группы сильно отражающих образцов. Для группы слабо отражающих образцов характерные значения коэффициентов отражения – 3÷7%.

Низкие значения альbedo в ультрафиолетовом диапазоне имеет и Луна (2–3 %) [10]. Суммарная плотность потока солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне $E_\sigma = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² и интегральная яркость $B_\sigma = 10^{-6}$ Вт/см² · ср. Расчеты проведены для идеализированной системы обнаружения – в диапазоне длин волн 200÷300 нм спектральная чувствительность матричного фотоприемного устройства (МФПУ) полагалась равной постоянной величине, а вне этого диапазона – равной нулю. Светосила объектива D_3/F_3 была принята равной 1/3.

Полагалось, что изображение точечного источника на МФПУ размыто с помощью дефокусировки. Размер пятна расфокусировки был выбран равным 2 × 2 пиксела. Это значение является компромиссным между требованиями увеличения дальности обнаружения и точности определения координат достаточно яркого объекта. Последнее по расчетам требует выбора размера пятна расфокусировки, равного 4 × 4 ÷ 9 × 9 пикселов. Линейный размер пиксела 20 мкм. Критерием обнаружения служило относительное превышение сигнала в ячейках, регистрирующих импульс от объекта, над фоновым уровнем на 40%. Критерий соответствует режиму обнаружения с достаточно большими временами экспозиции τ , такому, что основным фактором, определяющим вероятность ложного обнаружения ($P_{\text{лт}} \sim 0,01$), являются флуктуации фонового сигнала, которые оценивались гауссовским распределением с 10%-й относительной величиной дисперсии от среднего. Как видно из рис. 2, системы, в состав которых входит телескоп со сравнительно небольшим диаметром $D_3 = 200$ мм и сравнительно высокой светосилой $D_3/F_3 = 1/3$, позволяют обнаруживать малые тела на значительных расстояниях.

При наблюдении малых тел, находящихся непосредственно вблизи края освещенной части диска Земли, обнаружение ведется фактически на фоне паразитной засветки, уменьшение уровня которой практически возможно только до некоторого достигнутого технологического предела. Уровень фона засветки можно охарактеризовать эффективной яркостью, которая для каждого объектива составляет вполне определенную долю от яркости самого источника. Для хороших объективов эта доля меньше 1%. Для ультрафиолетового телескопа АС «Астрон», согласно проведенным нами исследованиям, она равна примерно 0,4% [14]. В этих условиях в видимом диапазоне, как и в ультрафиолетовом, возникает значительный контраст объект-фон $\geq 10^2$. Но уровень фона засветки в УФ-диапазоне на несколько порядков меньше, чем в видимом. Согласно оценкам, системы, работающие в ультрафиолетовом диапазоне, могут обеспечивать предельные дальности обнаружения на порядок выше, чем системы, работающие в видимом диапазоне длин волн. Таким образом, преимущество ультрафиолетового диапазона по пре-

дельной дальности обнаружения сохраняется и при наблюдении малых тел, находящихся и вблизи края освещенной части диска Земли.

На рис. 3 представлена обобщенная блок-схема одной из разрабатываемых систем обнаружения малых тел в ультрафиолетовом диапазоне. В состав прибора включены два телескопа. Схемы телескопов приведены на этом же рисунке. Фотография телескопов системы обнаружения приведена на рис. 4.

Широкоугольный телескоп системы Боуэна служит для получения информации обзорного характера, а также в качестве канала грубого гидирования по ярким звездам. Узкопольный телескоп системы

Ричи-Кретьена интересующего нас района пространства. Основные параметры телескопа системы Ричи-Кретьена: поле зрения $1,5^\circ$, диаметр первичного зеркала 200 мм, вторичного – 75 мм, эквивалентное фокусное расстояние 1200 мм, разрешение (по матрице) $10''$, разрешение дифракционное: в центре поля $1,3''$, на краю поля $3,8''$, масса с электроникой 12 кг. Габариты – $\varnothing 250 \times 800$ мм, энергопотребление 15 Вт. Параметры телескопа системы Боуэна: поле зрения 14° , диаметр первичного зеркала 60 мм, диаметр вторичного зеркала 150 мм, эквивалентное фокусное расстояние 115 мм, масса 12 кг, габариты – $\varnothing 200 \times 520$ мм. Покрытие зеркал обоих телескопов – $Al + MgF_2$.

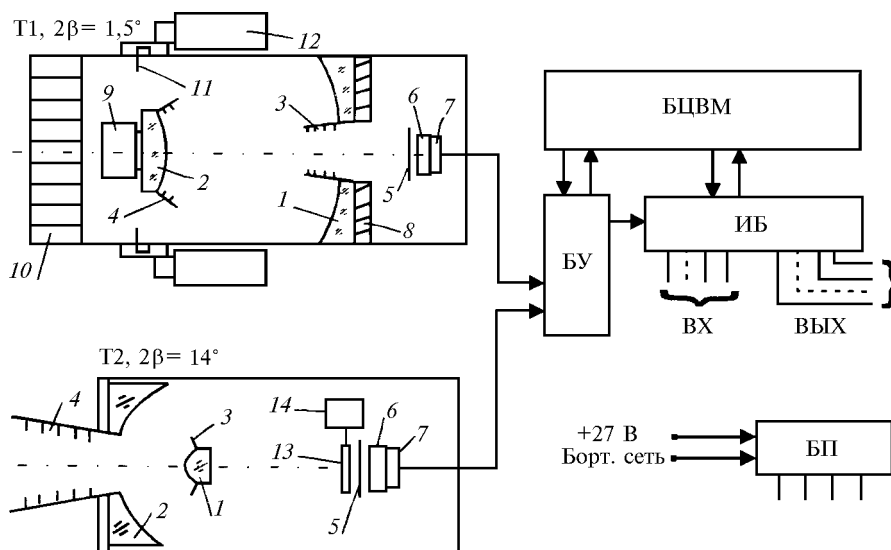


Рис. 3. Обобщенная блок-схема системы обнаружения объектов и схемы входящих в ее состав телескопов: Т1 – телескоп системы Ричи-Кретьена; Т2 – телескоп системы Боуэна; БП – вторичные преобразователи напряжения; БУ – блок электроники управления инструментом и преобразователей сигналов ПЗС-матрицы; ИБ – блок стыковки с бортовой телеметрической системой; БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина; ВХ и ВЫХ – вход и выход на телеметрическую систему КА; 1 – первичное зеркало; 2 – вторичное зеркало; 3 – бленда первичного зеркала; 4 – бленда вторичного зеркала; 5 – дополнительный отсекающий фильтр; 6 – матричное фотоприемное устройство (ПЗС-матрица); 7 – холодильник Пельтье ПЗС-матрицы; 8 – оправа главного зеркала; 9 – узел фокусировки и крепления вторичного зеркала; 10 – сотовая бленда; 11 – ирисовый затвор; 12 – привод ирисового затвора; 13 – затвор; 14 – привод затвора



Рис. 4. Фотография телескопов системы обнаружения малых тел: слева – телескоп системы Боуэна, справа – телескоп системы Ричи-Кретьена

Максимумы чувствительности используемых МФПУ приходятся на длину волны примерно 280 нм. Перед МФПУ дополнительно установлены фильтры, отсекающие излучение с длиной волны более 300 нм. Видеосигнал формируется ПЗС-матрицей (прибором с зарядовой связью).

Выбор ПЗС-матрицы в качестве формирователя видеосигнала обеспечивает:

- широкий динамический диапазон (до нескольких тысяч);
- жесткий растр, нечувствительный к изменениям питающих напряжений, температуры и магнитных полей, обеспечивающий высокую точность измерения координат объектов;
- малое энергопотребление, высокую надежность, малые габариты и массу.

Система рассчитана на работу с матрицами типа 512×512 и 1024×1024 элементов. Для снижения уровня собственных шумов и уменьшения неоднородности темнового тока ПЗС-матрица охлаждается с помощью термоэлектрической батареи-микрохолодильника Пельтье до $-40 \dots -60^\circ\text{C}$. При этом для обеспечения стабильности параметров ПЗС-матрицы эта температура стабилизируется. Термо-

стабилизация позволяет значительно (до двух порядков) повысить чувствительность ПЗС-матрицы.

Блок вторичного преобразования напряжения (см. рис. 3) служит для энергообеспечения всех блоков прибора от бортовой сети и для гальванического разделения необходимых цепей.

Функционирование инструмента осуществляется под управлением бортовой цифровой вычислительной машины. Для этого все блоки системы связаны с БЦВМ магистралью межблокового интерфейса. В постоянной памяти БЦВМ хранятся системные программы: программа начального пуска, программы обмена информацией, программы ввода и вывода на телеметрию, программа обмена информацией с другими блоками, программы обработки технологических сигналов и аварийных ситуаций, а также константы, каталоги звезд и т.п. В оперативной памяти (ОЗУ) хранятся выполняемые программы, промежуточные результаты и оперативная информация от остальных блоков.

Главная функция блока управления – формирование видеосигналов с ПЗС-матрицы и контроля их параметров. Видеосигнал с матрицы усиливается, подавляются шумы коммутации фаз ПЗС. Схемы управления ПЗС-матрицей позволяют изменять параметры накопления видеосигнала, менять режимы развертки. Кроме этого, в функции управления инструментом входят: управление микрохолодильником ПЗС-матрицы и контроль температуры, управление затвором ирисовой диафрагмы и управление некоторыми другими контрольными датчиками инструмента.

Блок сопряжения с бортовыми системами осуществляет функции приема и преобразования команд, поступающих по телеметрии, в форму, доступную для БЦВМ.

Схема обработки изображения при обнаружении освещенного Солнцем объекта на фоне освещенной и ночной поверхности Земли предусматривает следующее. Выделение импульса от точечных объектов происходит на фоне шумов, имеющих мультипликативную составляющую, обусловленную неравномерностью чувствительности ячеек ПЗС-матрицы, включая возможные дефекты отдельных ячеек, дефекты строк и столбцов. Кроме того, присутствуют темновой шум и шум, обусловленный квантовыми флуктуациями сигнала.

Для снятия уровня шумов предусмотрены фильтрация изображения и выравнивание интенсивности сигналов по чувствительности отдельных элементов МФПУ. В случае предельных дальностей обнаружения критерием обнаружения является небольшое превышение сигнала в группе ячеек ПЗС-матрицы над уровнем сигнала ячеек, регистрирующих фоновое излучение. При этом ожидается, что при выдержках более 1 мс основной вклад в суммарную помеху и величину вероятности ложного обнаружения

будут вносить вариации величины яркости фона освещенной Солнцем поверхности Земли.

Алгоритм обнаружения объектов на фоне звездного неба предусматривает также удаление из списка выделенных импульсов списка эталонных звезд, попавших в кадр. Эти звезды выбираются по данным звездного каталога.

На данном этапе разработки предусмотрена передача на Землю полных кадров изображений или их фрагментов, что необходимо для совершенствования методики обработки. Как видно из таблицы параметров информационных потоков, задача обнаружения объектов связана с переработкой большого объема информации.

Размерность матрицы	Число элементов матрицы	Разрядность	Кадр, Мбит	Время передачи одного кадра**, с	Число полных кадров, передаваемых за сеанс***
512 × 512	2,62 · 10 ⁵	8 + 2*	2,5	26	23
1024 × 1024	1,04 · 10 ⁶	8 + 2*	10	103	5

*Служебные разряды.

**При пропускной способности ТМ-системы 100 Кбит/с.

***При длительности сеанса связи 10 мин.

На следующем этапе разработки предполагается, что обработка матричных изображений будет вестись в автономном режиме на борту КА под управлением видеоспецпроцессора.

1. Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Пчелинцев Л.А., Лебедев В.В. Космический мусор. Т. 1. М.: Патриот, 1996. 360 с.
2. Новиков Л.С., Петров Н.Н., Романовский Ю.А. Экологические аспекты космонавтики. М.: Знание, 1986. № 5. 64 с.
3. Frank L.A., Sigwarth L.B., Craven J.D. // Geophys. Res. Lett. 1986. V. 13. № 4. P. 307–310.
4. Yeates C.M. // Planet. Space Sci. 1989. V. 37. № 10. P. 1185–1196.
5. Лебединец В.Н. // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. № 3. С. 350–363.
6. Проблемы защиты Земли от столкновения с опасными космическими объектами (SPE-94) // Тезисы докладов междунар. конференции, 1994, г. Снежинск (Челябинск-70): РФЯЦ-ВНИИТФ. Ч. I. 113 с. Ч. II. 140 с.
7. Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О. Уайта. М.: Мир, 1980. 600 с.
8. Краснопольский В.А., Кузнецов А.П., Лебединский А.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1966. Т. 6. № 2. С. 185–189.
9. Huffman R.E., Le Blanc F.J., Larabee J.C., Paulsen D.E. // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. № A5. P. 2201–2215.
10. Васильев В.Б., Гречко Г.М. и др. // Оптические исследования излучения атмосферы, полярных сияний и серебристых облаков с борта орбитальной научной станции «Салют-4». Таллин: Ин-т астрон. и физики атмосферы АН ЭССР, 1977. 178 с.
11. Андриенко Д.А., Барышева В.И. и др. // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 1. С. 67–73.
12. Heath D.P., Krugger F.J., Roeder H.A., Henderson B.D. // Opt. Eng. 1975. V. 14. N 4. P. 323–331.
13. Frederick J.E., Serafino G.N. // Tellus. 1987. V. B39. № 3. P. 261–270.
14. Черемисин А.А., Границкий Л.В., Мясников В.М., Ветчинкин Н.В., Слабко В.В. Исследование функции рассеяния для телескопа космической астрофизической станции «Астрон» по данным натурных наблюдений освещенных Солнцем дисков Земли и Луны // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 870–876.

Научно-исследовательский физико-технический институт
Красноярского государственного университета,
Красноярский государственный технический университет,
Научно-производственное объединение «Прикладная механика», г. Железногорск Красноярского края

Поступила в редакцию
3 декабря 1997 г.

L.V. Granitsky, A.A. Cheremisin, V.A. Bartenev, A.M. Ilinykh. **Space Dust Monitoring in the Ultraviolet Wavelength Range.**

Opportunities of satellite systems for detection of small bodies in near space and in the Earth's upper atmosphere by using the ultraviolet wavelength range are discussed. The ultraviolet wavelength range of 200÷300 nm gives advantage, in contrast to IR and visible ranges, in limiting distance of detection of objects of given size on a background of the Earth's surface, illuminated by the Sun. That is connected with the high value of an object-background contrast in the UV range and is due to absorption of solar radiation by ozone of an upper atmosphere in the strong Hartley band. Description of one of developed satellite ultraviolet systems for monitoring of space dust is submitted.