

Физическая аппаратура

УДК 767.378

Оптическая система сбора информации о пылевой компоненте космического аппарата и объектах космического мусора

Н. Д. Семкин, Е. Ю. Барышев, А. М. Телегин

Представлена система для сбора данных о движущихся объектах внешней атмосферы в окрестности космического аппарата. Приведен принцип построения такой системы. Рассмотрены вопросы расчета точности данной системы и использования оптической системы для регистрации одиночных быстролетающих объектов космического мусора.

PACS: 06.30.-k

Ключевые слова: система, сбор данных, окрестность, космический аппарат, космический мусор.

Введение

Предлагаемая система предназначена для сбора данных о движущихся объектах (траектория движения, оценка размера, вектор скорости) и может быть включена в контур управления космическим аппаратом (КА) для оповещения и принятия мер по недопущению столкновения с объектами.

Таковыми объектами могут быть: метеориты, космический мусор, пылевые объекты собственной внешней атмосферы космических аппаратов

Особенностями объектов исследования являются:

отсутствие данных об оптических свойствах поверхности объектов и их форме;

разнообразии скоростей и направлений движения;

большой диапазон дальностей;

большое число объектов в случае работы с пылевыми частицами внешней атмосферы КА.

Методика обработки информации с оптико-электронной системы (случай пылевой компоненты собственной воздушной атмосферы (СВА))

Функционально оптико-электронная система для регистрации и измерения параметров пылевой компоненты СВА космического аппарата состоит из трехканального оптико-электронного датчика

и микропроцессорного блока обработки данных [1, 2].

Оптико-электронный датчик представляет собой три видеокамеры. Приемные матрицы видеокамер расположены на одной линии на некотором расстоянии одна от другой, которое определяет рабочую зону системы и точность получаемых параметров. В состав системы входит также осветитель в виде импульсной лампы с конусным лучом, который используется при работе на малых расстояниях при регистрации пыли в окрестности КА. На основе изображений с матриц в блоке обработки рассчитываются объемные координаты объектов и оцениваются их скорости и концентрация. Предусмотрена также работа системы при естественном и смешанном освещении.

Восстановление информации системы состоит из следующих этапов [3, 4]:

- получение изображений с видеокамер и формирование подкадров;
- формирование трехмерных кадров из подкадров, оценка размеров объектов;
- восстановление на основе последовательных кадров трека объекта, вычисление векторов скорости объектов.

Прием информации с матриц производится в реальном времени по кадрам, которые проходят предварительную обработку: компарирование по заданному уровню шума, оцифровку, привязку обнаруженных объектов к координатам матрицы. Каждый кадр, формируемый системой, представляет собой три подкадра (плоских изображения). Подкадры являются массивами, содержащими координаты объектов на матрице и уровень напряжения (пропорциональный световому потоку от объекта).

По уровню напряжения может быть проведена оценка размера зарегистрированного объекта, и данное значение может служить "маркером"

Семкин Николай Данилович, профессор.

Барышев Евгений Юрьевич, аспирант.

Телегин Алексей Михайлович, инженер.

Самарский государственный аэрокосмический университет.

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Тел.: 8(846) 267-48-39; 267-48-50.

E-mail: semkin@ssau.ru.

Статья поступила в редакцию 21 мая 2009 г.

объекта при дальнейших операциях совмещения трехмерных кадров.

Для пылевых частиц оценку размера осуществляют на основе решения задачи Ми, при этом остается неизвестным коэффициент отражения объекта с его спектральными характеристиками [5].

Большие объекты могут расцениваться как Ламбертов источник, на который падает естественный свет. Здесь также остаются неизвестными характеристики отражения объекта, поэтому идет речь об оценке размеров объектов наблюдения, которая может в разы различаться с реальным размером.

После предварительной обработки подкадров производится операция формирования трехмерного кадра. Из подкадров формируется массив координат одного и того же объекта в трех кадрах на основе поиска изображений, координаты которых в матрицах удовлетворяют простому условию пучка трех прямых [6]:

$$|x_1 + 2x_2 + x_3| < \varepsilon,$$

где ε — допустимая ошибка совмещения в единицах координат ПЗС-матрицы;

x_1, x_2, x_3 — координаты объекта в строках матриц 1, 2 и 3 в единицах координат ПЗС-матрицы, причем начало координат находится в точках пересечения оптических осей объективов и плоскостей матриц.

Следует отметить, что так как видеокамеры системы совмещены по строкам, то поиск изображения одного и того же объекта следует вести в одноименных строках массивов подкадров, а в случае искажений в изображении — в ближайших строках. Данная особенность построения системы дает возможность существенно снизить вычислительные затраты на данном этапе обработки информации.

После нахождения соответствия изображений одного и того же объекта в подкадрах (совмещения подкадров) следует операция вычисления трехмерных координат объектов. Совокупность трехмерных координат и напряжения в каждой матрице представляет собой кадр.

Кадры с трехмерными координатами объектов следуют с определенным временным дискретом, а найти взаимосвязь трехмерных координат объекта одного кадра с его координатами в следующем кадре (совмещение двух соседних кадров) довольно сложно. Здесь необходимо сделать предположение, что объекты движутся практически прямолинейно (не происходит резкой смены направления движения). Данное предположение дает возможность прогнозировать движение объекта и тем самым восстанавливать его трек.

Определить скорость объекта по двум кадрам проблематично, так как неизвестно, куда именно переместился объект во втором кадре из первого (проблема совмещения объектов из разных кадров). Данная задача решается при малом времени между кадрами поиском объектов во втором кадре, имеющих минимальное смещение относительно положения в первом кадре. Однако малое время между кадрами позволяет определить не скорость, а лишь ее приближенную оценку. Увеличение времени между кадрами приводит к ошибкам, обусловленным возможностью совмещения в кадрах близлежащих объектов, которые, на самом деле, являются разными. С другой стороны, обработка последовательных кадров с малым временем между ними приводит к существенному росту требований к вычислительной мощности и увеличивает время расчета.

Выходом из данного противоречия является двухступенчатый алгоритм, при котором формируются две пары кадров [7]. Промежуток времени между кадрами в парах мал для обеспечения минимальной ошибки совмещения по близости, а между парами — на порядок больше для снижения ошибки определения скорости.

По информации из первой пары кадров можно рассчитать оценки положения объекта в первом кадре второй пары и вектора скорости объекта.

Оценку вектора скорости можно также вычислить и во второй паре кадров.

Таким образом, совмещение объектов между парами проводится поиском объектов в окрестности прогнозируемого положения во второй паре с минимальным углом φ между векторами скорости первой и второй пар. Также применяется упрощенный метод совмещения пары кадров с одиночным кадром по прогнозу положения объекта в последующем кадре на основе информации предыдущей пары и поиска ближайших объектов в этом кадре. Данный метод может применяться на небольшом временном интервале между кадром и парой, так как оценка скорости объекта является приблизительной и может давать большие ошибки при долгосрочных прогнозах.

Время между кадрами определяется исходя из минимального перемещения объекта (на 1 пиксель) на минимальном расстоянии работы системы. Минимальная дальность определяется точкой пересечения лучей, исходящих из крайних точек матриц и проходящих через фокус оптических систем (рис. 1):

$$Z_{\min} = \frac{f \cdot L}{\delta \cdot N_x / 2},$$

где N_x — количество пикселей в матрице по оси x ;
 δ — размер пикселя.

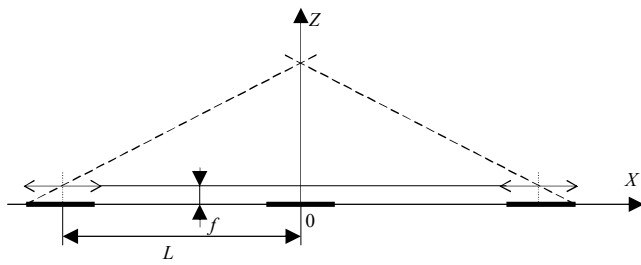


Рис. 1. К расчету минимальной и максимальной дальностей системы

Для параметров $f = 7$ мм, $\delta = 6$ мкм, $N_x = 640$, $L = 0,2$ м получаем $Z_{\min} = 0,73$ м. При этом проекция пикселя на данное расстояние равна $\Delta = \frac{\delta \cdot Z_{\min}}{f} = 0,63$ мм.

Таким образом, необходимо определить время между кадрами, в которых объект, находящийся на расстоянии Z_{\min} , переместился на минимальное расстояние Δ . На максимальной дальности работы системы $Z_{\max} = \frac{f \cdot L}{\delta} = 233$ м минимальное перемещение равно 200 мм. На рис. 2 показана зависимость времени минимального перемещения от скорости объекта.

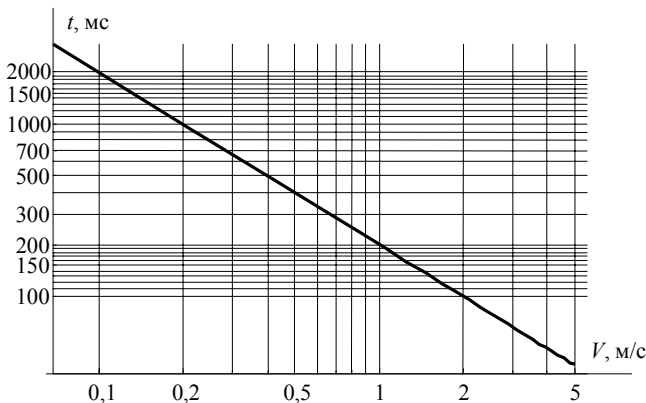


Рис. 2. Зависимость времени между кадрами от скорости объекта при минимальной и максимальной дальностях до объекта

Время между парами кадров взято на порядок больше, чем время между кадрами. Например, диапазон 0—1 м/с пылевых частиц в целях снижения ошибки определения скорости разбивается на поддиапазоны, приведенные ниже.

Поддиапазон скоростей, м/с	Время между кадрами, мс
0—0,125.....	5
0,125—0,25.....	2,5
0,25—0,5.....	1,5
0,5—1,0.....	0,6

Таким образом, поиск объектов с определенными скоростями производится в определенных кадрах, наиболее близких к заданным временам.

Исходя из наибольшей скорости объектов выбирается кадровая частота видеокамер. Например, для вышеприведенного примера необходимо обеспечить минимальное межкадровое время 0,6 мс, что соответствует частоте кадров 1,6 кГц. Данная частота позволяет определять минимальное перемещение объектов на минимальном рабочем расстоянии системы. Если частота будет ниже, то объект переместится в паре соседних кадров на расстояние, превышающее минимальное, что может привести к ошибке совмещения объектов в кадрах.

Методика обработки информации с оптико-электронной системы (случай одиночных быстролетающих объектов)

Интересным является применение системы для наблюдения за одиночными быстролетающими объектами большого размера, которые могут представлять угрозу для функционирования КА (так называемый "космический мусор") [8]. Принципиальных трудностей для данной реализации системы нет, однако необходимо произвести коррекцию некоторых характеристик системы, в частности, система работает в определенных диапазонах по координатам, которые определяются углами зрения оптической системы. Разрешение в пространстве (размер проекции в пространство предметов) определяется фокусным расстоянием оптической системы f и разрешением ПЗС-матриц видеокамер δ , а также стереобазой системы L .

Разрешение в пространстве определяется проекцией элемента ПЗС-матрицы на данную точку пространства. Проекция элемента изображения в плоскости XOY рассчитывается следующим образом: $\Delta = \delta \frac{f + Z}{f}$.

Для обычных параметров ($\delta = 6$ мкм, $f = 7$ мм) получаем зависимость $\Delta = 8,57 \cdot 10^{-4} (0,007 + Z)$.

На рис. 3, а приведен график данной зависимости.

Из графика и формулы следует, что разрешение в плоскости XOY линейно падает с увеличением дальности и не зависит от базы системы, т. е. дальность до объекта вносит неопределенность в расчет координат в плоскости XY в виде $\pm \delta \frac{f + Z}{f}$.

Зависимость разрешения системы в направлении OZ (проекция пикселя на ось OZ) от дальности до объекта представляется в виде:

$$\Delta Z = Z \left(1 - \frac{fL}{fL + Z\delta} \right).$$

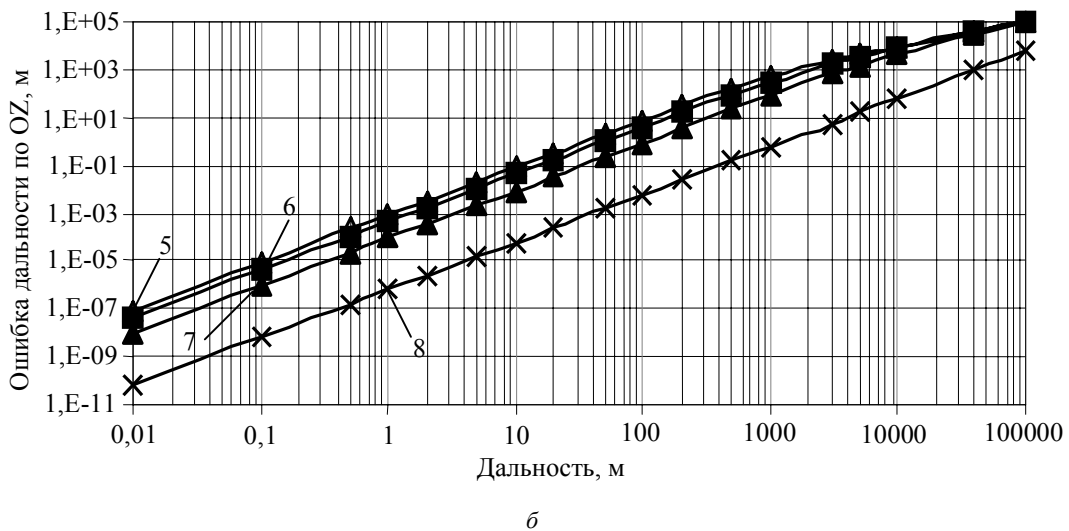
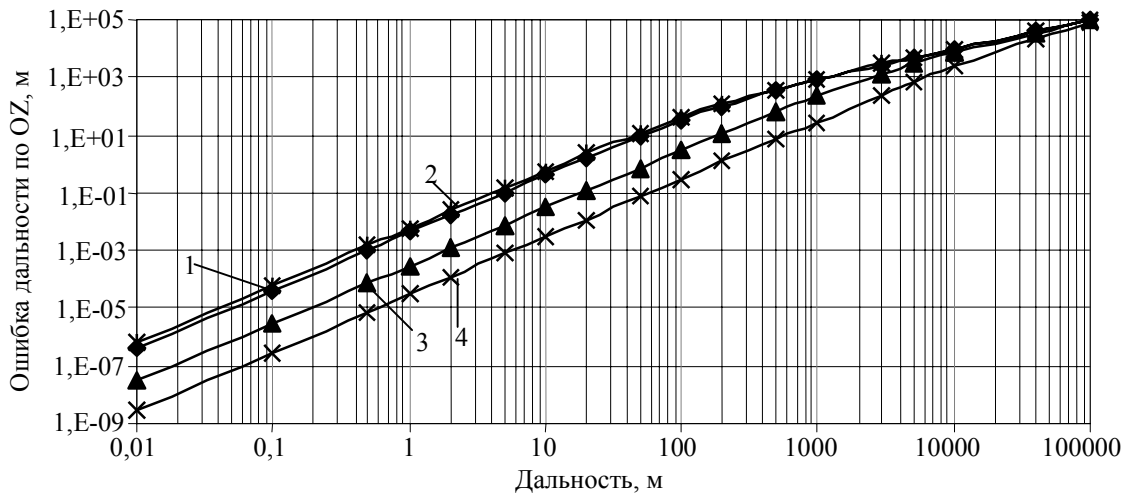
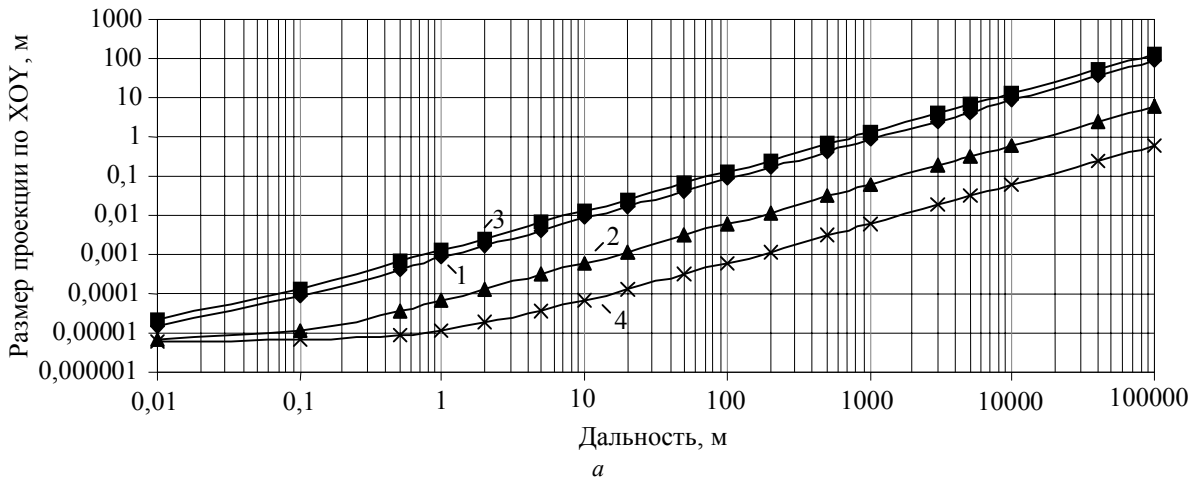


Рис. 3. Зависимость размера проекции пикселя от:

a — размера пикселя и фокусного расстояния объектива:

1 — $d_x = 6$ мкм, $f = 7$ мм; 2 — $d_x = 6$ мкм, $f = 100$ мм; 3 — $d_x = 9$ мкм, $f = 7$ мм; 4 — $d_x = 6$ мкм, $f = 1$ м;

б — размера пикселя, фокусного расстояния объектива и базы системы:

1 — $d_x = 6$ мкм, $f = 7$ мм, $L = 0,2$ м; 2 — $d_x = 9$ мкм, $f = 7$ мм, $L = 0,2$ м; 3 — $d_x = 6$ мкм, $f = 100$ мм, $L = 0,2$ м;

4 — $d_x = 6$ мкм, $f = 1$ м, $L = 0,2$ м; 5 — $d_x = 6$ мкм, $f = 7$ мм, $L = 1$ м; 6 — $d_x = 6$ мкм, $f = 7$ мм, $L = 2$ м;

7 — $d_x = 6$ мкм, $f = 7$ мм, $L = 10$ м; 8 — $d_x = 6$ мкм, $f = 1$ мм, $L = 10$ м

При тех же обычных параметрах и $L = 0,2$ м получаем

$$\Delta Z = Z \left(1 - \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-6}} Z \right)$$

В данном случае зависимость разрешения системы по оси OZ от дальности более сложная (см. рис. 3, б). Наблюдается ускорение падения разрешения от дальности, и значение разрешения асимптотически приближается к самому значению дальности в конце диапазона измерений (при максимальной дальности для данных параметров $Z_2 = 233$ м разрешение равно дальности, и ошибка определения расстояния равна 100 %).

Обратно, при приближении объекта к началу координат системы, разрешение по координате Z повышается, что позволяет повышать точность определения параметров движения объектов по мере их приближения. К примеру, если ограничиться точностью 10 %, то необходимо сократить зону по дальности в четыре раза от максимальной.

На рис. 3, б приведены графики зависимости разрешения по оси OZ от дальности при изменении определяющих параметров L и f . Наблюдается пропорциональная зависимость повышения разрешения от увеличения параметров L и f . Однако при росте параметра L возникают сложности совмещения камер, а при росте параметра f падает поле зрения системы. Для $f = 1$ м углы обзора в плоскости ZOХ = 0,15°, в плоскости ZOУ = 0,11°, в то время как для обычных параметров $f = 7$ мм углы, соответственно, равны 20° и 15° (рис. 4).

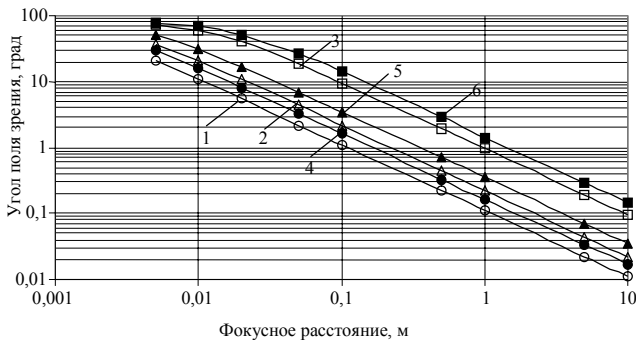


Рис. 4. Зависимость поля зрения камеры от размера пикселя, фокусного расстояния объектива и разрешения матрицы:

- 1 — $d_x = 6$ мкм, 80 кпикселей; 2 — $d_x = 6$ мкм, 300 кпикселей;
- 3 — $d_x = 6$ мкм, 5 Мпикселей; 4 — $d_x = 9$ мкм, 80 кпикселей;
- 5 — $d_x = 6$ мкм, 0,7 Мпикселей; 6 — $d_x = 9$ мкм, 5 Мпикселей

Увеличение разрешения матрицы приводит к повышению поля зрения системы, а также к увеличению вычислительной нагрузки при расчете координат и скоростей, так как может возрасти число наблюдаемых объектов. Разрешение матрицы должно быть достаточно для конкретного применения системы, но не стоит забывать об издержках при обработке изображений.

Расчетные параметры работы системы для параметров $f = 1$ м, $\delta = 6$ мкм, $N_x = 640$, $L = 1$ м следующие:

- минимальная дальность работы системы

$$Z_{\min} = \frac{f \cdot L}{\delta \cdot N_x / 2} = 520 \text{ м};$$

- проекция пикселя на этом расстоянии

$$\Delta = \frac{\delta \cdot Z_{\min}}{f} = 3,1 \text{ мм};$$

- максимальная дальность работы системы

$$Z_{\max} = \frac{f \cdot L}{\delta} = 166 \text{ км};$$

- проекция пикселя на этом расстоянии

$$\Delta = \frac{\delta \cdot Z_{\max}}{f} = 1 \text{ м}.$$

Время между кадрами (необходимая кадровая частота) определяется временем перемещения самого быстрого объекта на минимальной дальности работы системы, т. е.

$$t = \frac{\Delta_{\min}}{V_{\max}} = \frac{L}{V_{\max} \cdot \frac{N_x}{2}}.$$

Таким образом, для построения системы наблюдения за объектами, движущимися со скоростью 15 км/с, необходима база 5 м и матрицы с кадровой частотой не менее 1 МГц. Из рис. 5 следует, что наиболее целесообразно использовать фокусное расстояние примерно 1 м, при этом минимальное расстояние работы системы 5 км, максимальное — 1000 км (что при 10%-ном допуске на точность по дальности преобразуется в 250 км). Такое фокусное расстояние дает угол поля зрения порядка 1—2 град. на матрице в 5 Мпикселей.

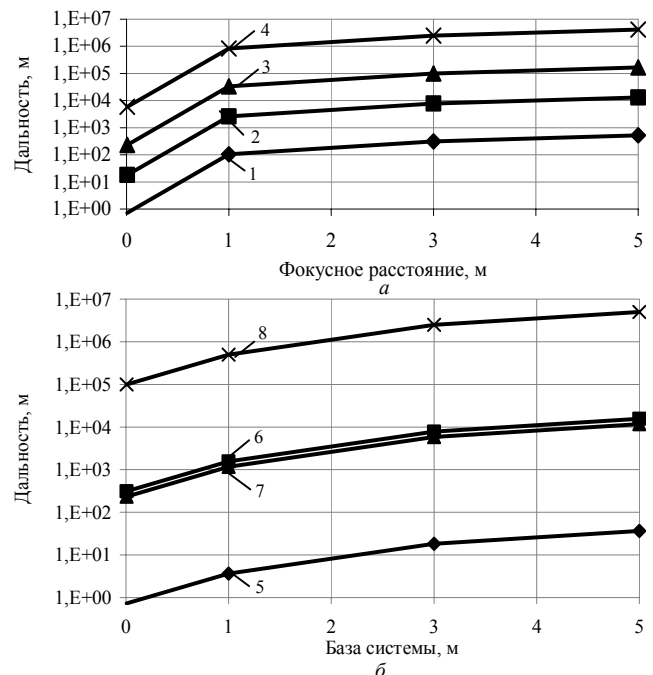


Рис. 5. Зависимость максимальной и минимальной дальностей от фокусного расстояния (а) и базы системы (б):

- 1 — Z_{\min} , $L = 0,2$; 2 — Z_{\min} , $L = 5$; 3 — Z_{\max} , $L = 0,2$;
- 4 — Z_{\max} , $L = 5$; 5 — Z_{\min} , $f = 0,007$; 6 — Z_{\min} , $f = 3$;
- 7 — Z_{\max} , $f = 0,007$; 8 — Z_{\max} , $f = 3$

При обработке информации также возникают определенные особенности. Число объектов, одновременно наблюдаемых системой, намного меньше, чем при работе с пылевыми частицами, чаще всего это одиночные объекты. В связи с этим количество ошибок совмещения объектов в кадрах снижается практически до нуля, а при наблюдении одного объекта теряет смысл (рис. 6).

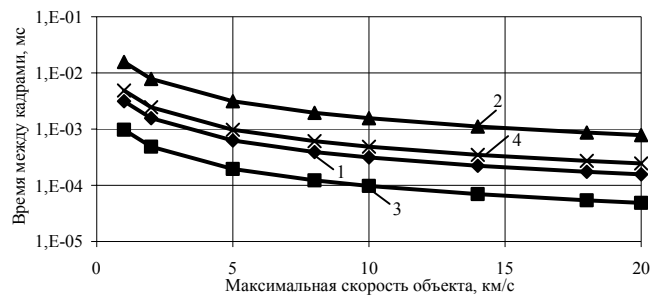


Рис. 6. Зависимость времени между кадрами от скорости, базы системы и разрешения матриц:
 1 — $L = 1, N_x = 640$; 2 — $L = 5, N_x = 640$;
 3 — $L = 1, N_x = 2048$; 4 — $L = 5, N_x = 2048$

Многоступенчатый алгоритм с отбором объектов по скорости нецелесообразен, к тому же особенность назначения системы при данных параметрах предполагает наличие высокого быстродействия при обработке данных.

Заключение

Работа системы вполне может быть организована на основе пар кадров с упрощенным поиском

объектов по прогнозируемому положению. Реализация схмотехническим путем компарирования информации с матрицы по уровню шума и селекции движущихся объектов (путем вычитания последующих кадров из предыдущих) приводит к очень высокому быстродействию системы в связи с малым количеством информации, обрабатываемой процессором.

Литература

1. Семкин Н. Д., Барышев Е. Ю. Детектор пылевых частиц: Пат. 58695 RU, G 01 С 3/100 от 27.11.2006; Бюл. № 33.
2. Барышев Е. Ю., Семкин Н. Д. Многопараметрический преобразователь параметров низкоскоростных частиц в окрестности космического аппарата//Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2005. Т. 8. № 1. С. 109—115.
3. Якушенко Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989.
4. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1981.
5. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.
6. Барышев Е. Ю., Семкин Н. Д. Система измерения параметров пылевой компоненты собственной внешней атмосферы космического аппарата//Вестник СГАУ. Сер.: Актуальные проблемы радиоэлектроники. — Самара: Изд-во СГАУ, 2001. Вып. 5.
7. Барышев Е. Ю., Воронов К. Е., Богоявленский Н. Л. Модель ПЗС-датчика системы измерения параметров пылевой компоненты внешней атмосферы космического аппарата// Там же. Вып. 6.
8. Климух П. И. и др. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. — Л.: Машиностроение, 1983. — 224 с.

Optical system of gathering of the information about dust a component of a space vehicle and objects of space dust

N. D. Semkin, E. J. Baryshev, A. M. Telegin
 The Samara State Aerospace University of name S. P. Korolyov,
 34 Moscow road, 443086, Samara, Russia
 E-mail: semkin@ssau.ru

In article the system for data gathering about moving objects of external atmosphere in a space vehicle vicinity is considered. The principle of construction such siste is resulted, questions of calculation of accuracy of the given system also are considered. Questions of is-using of optical system for registration of single fast-flying objects space dust are considered.

PACS: 06.30.-k

Keywords: system, data acceptance, vicinity, space vehicle, space dust.

Bibliography — 8 references.

Received 21 May 2009