

Потапов В. И. Вычисление среднего времени «жизни» одного класса резервированных восстанавливаемых после отказов систем при произвольной во времени интенсивности от-

Статья поступила в редакцию 26.02.2018 г.

© В. И. Потапов

УДК 004.021

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-124-128

В. П. ПИВОВАРОВ
А. В. ЗУБАРЬ

Омский автобронетанковый
инженерный институт,
г. Омск

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПОИСКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СТЕРЕОПАРАХ ВДОЛЬ ЭПИПОЛЯРНЫХ ЛИНИЙ

В статье изложено решение задачи нахождения дополнительных ограничений на область поиска изображения по стереопаре, заданной эпиполярной линией. Особенностью данного подхода является возможность определения ограничений на основе математических зависимостей, не требующих нахождения фундаментальной матрицы и предварительной обработки изображений.

Ключевые слова: эпиполярная линия, поиск изображения, цифровая видеокамера, система технического зрения, стереопара.

К технике военного назначения предъявляется ряд противоречивых требований: простота и надёжность конструкции, высокая защищённость от физических и электромагнитных воздействий, низкое энергопотребление, низкая стоимость, технологичность производства, ремонта и т.д. Решение этих противоречивых задач накладывает ряд ограничений при принятии технических решений.

При разработке оптико-электронных систем определения параметров целей по изображениям с цифровых видеокамер [1–3] одним из ключевых моментов является точность, робастность и вычислительная реализуемость применяемого алгоритма автоматического поиска изображений. Основным элементом такой системы является ЭВМ. Возможность выполнения всего функционала предусмотренных измерений и их обработки в реальном времени на ЭВМ с ограниченной вычислительной мощностью является весьма актуальной задачей. Её решение во многом определяет правильный выбор способа поиска, являющегося основой для построения специализированных алгоритмов обработки цифровых изображений.

Существуют глобальные и локальные способы поиска объектов на стереоизображениях, полученных с систем технического зрения (СТЗ) [4, 5]. Общий недостаток глобальных алгоритмов, с точки зрения обеспечения минимальных требований к ресурсам ЭВМ, — это их высокая вычислительная сложность; кроме того, они требуют предварительной обработки изображений.

Особенность локальных алгоритмов поиска заключается в том, что поиск в них организуется путём последовательного сканирования между неко-

торыми локальными участками изображений. Как правило, это некоторая интересующая область одного изображения и область поиска на другом изображении. В свою очередь, размеры этих областей и порядок их нахождения будут определять точность поиска и требования к вычислительной мощности ЭВМ.

Для определения координат объекта P по его изображению Img с двух цифровых видеокамер можно записать пару расширенных векторов положения этого объекта $P_{K1}^{img} = (n_{K1}^p \ m_{K1}^p \ 1 \ 1)$ и $P_{K2}^{img} = (n_{K2}^p \ m_{K2}^p \ 1 \ 1)$ на изображениях соответственно для камер $K1$ и $K2$. При этом значения пиксельных координат объекта P на изображении первой камеры $K1$ (n_{K1}^p — количество строк, m_{K1}^p — количество столбцов) могут быть заданы пользователем (оператором) или определены автоматически в результате работы, например, алгоритма обнаружения, распознавания или селекции движущихся объектов и т.п. Значения же n_{K1}^p и m_{K1}^p могут быть определены вручную оператором или автоматически, например, в результате работы алгоритмов определения положения изображения объекта на изображении второй камеры. Однако ручное определение этих координат является трудоёмким и длительным процессом и будет сочетаться с субъективными ошибками оператора. Поэтому, как правило, используется автоматическое определение положения изображения объекта на паре изображений.

Одним из наиболее эффективных и распространённых способов поиска изображения объекта по изображениям с пары камер является поиск вдоль эпиполярной линии [6, 7, с. 159–162; 8,

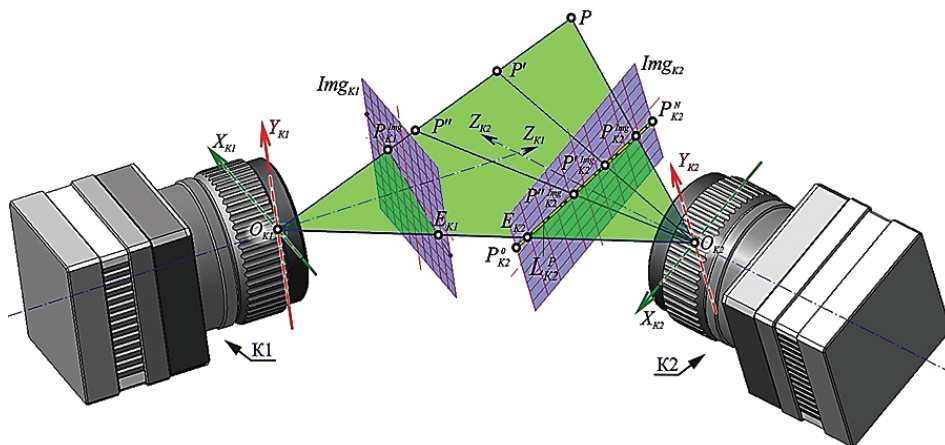


Рис. 1. Модель эпиларной геометрии

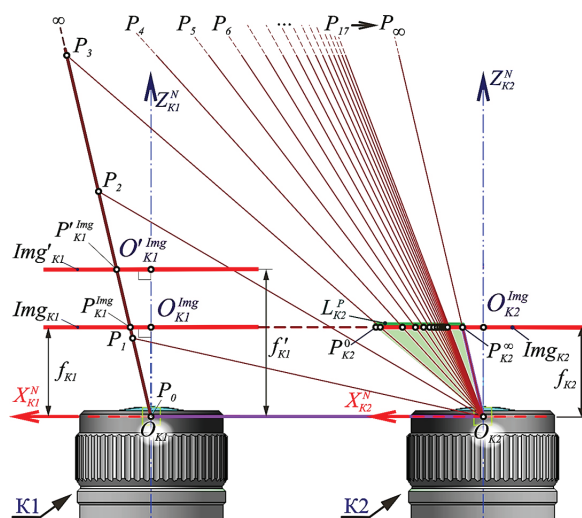


Рис. 2. Иллюстрация к нахождению положения линии поиска для случая нормального расположения камер

с. 309–314; 9, 10, с. 21–23], строящейся на основе модели эпиларной геометрии, в которой используются следующие понятия (рис. 1).

Эпиларусы — это точки (E_{K1} и E_{K2}) пересечения линии, соединяющей оптические центры объективов O_{K1} и O_{K2} камер, и плоскостей изображений Img_{K1} и Img_{K2} . Эпиларус — это положение изображения оптического центра объектива одной камеры в плоскости изображения второй камеры.

Эпиларная плоскость — это плоскость $O_{K1}O_{K2}P$, проходящая через базовую линию $O_{K1}O_{K2}$.

Эпиларная прямая — это пересечение эпиларной плоскости $O_{K1}O_{K2}P$ с плоскостью изображения, например, на рис. 1, эпиларная прямая для изображения Img_{K2} — это прямая (в данном случае линия поиска L_{K2}^p), проходящая через точки P_{K2}^0 и P_{K2}^N .

Согласно модели эпиларной геометрии, все эпиларные прямые проходят через эпиларус, а множество эпиларных плоскостей представляет собой однопараметрическое семейство плоскостей. И если на изображении одной камеры указан объект, для данного положения камер на изображении второй камеры существует только одна линия L_{K2}^p , на которой возможно нахождение изображения этого объекта в зависимости от его удаления от первой камеры.

Как видно из трёхмерной эпиларной модели (рис. 1) изображению P_{K2}^{img} объекта P может со-

ответствовать несколько положений этого объекта. Он может находиться и в точке P' и в P'' , но в любом случае изображения этих точек P_{K2}^{img} , P_{K2}^{img} , P_{K2}^{img} на изображении второй камеры Img_{K2} будут лежать на линии L_{K2}^p .

Достаточно часто эпиларные линии называют эпиларными ограничениями. При этом имеют в виду именно ограничение границ области поиска. При этом под ограничивающей областью поиска линией используется эпиларная линия, протягивающаяся через все изображения. На рис. 1 такая линия будет построена от точки P_{K2}^0 до точки P_{K2}^N . Связано это с тем, что эпиларная плоскость принимается при построениях безразмерной. И для большинства случаев съёмки это вполне справедливое допущение. Но, вместе с этим, в отдельных ситуациях взаимная ориентация камер может оказаться такова, что линия поиска L_{K2}^p должна проходить не через все изображения. Например, снова возвращаясь к рис. 1, заметим, что если объект интереса находится от камеры $K1$ не дальше точки P и эпиларус E_{K2} находится на изображении Img_{K2} , то линию поиска L_{K2}^p можно справедливо ограничить отрезком $E_{K2}P_{K2}^{img}$, чем ещё больше уменьшить область поиска.

Рассмотрим пример измерительной системы из двух одинаковых нормально (параллельно) расположенных камер $K1$ и $K2$ (рис. 2). Пусть на изображении Img_{K1} камеры $K1$ указано изображение

объект интереса в точке P_{K2}^{img} . Из схемы видно, что положению изображения P_{K1}^{img} будет соответствовать множество объектов $P_0, P_1, P_2, P_3, \dots, P_\infty$, из которых P_0 — самое близкое к камере $K1$ возможное положение объекта интереса, а в положении P_∞ объект можно считать бесконечно удалённым.

В самом ближайшем положении к СК камеры $K1$ (точка P_0) луч от объекта не попадает на фотоматрицу камеры $K2$ и будет проходить по базовой линии. А при удалении объекта P от камеры $K1$ с момента его вхождения в поле зрения камеры $K2$ луч на объект P (от P_{K2}^0 до P_{K2}^∞) в СК камеры $K2$ по своему наклону будет стремиться к параллельному состоянию с лучом на этот же объект в СК камеры $K1$ (точка P_{K1}^{img}). С учетом дискретной структуры фотоприемников положение P_{K2}^∞ — это положение объекта относительно измерительной системы, когда определить по изображениям разницу в положении объекта становится невозможным. Это такое расстояние, за пределами которого все объекты для измерительной системы будут равноудалёнными.

Таким образом, в основу дальнейших преобразований положим заключение о том, что если в нормально расположенной измерительной системе из двух одинаковых камер на изображении камеры $K1$ указан бесконечно удаленный объект и определены координаты его изображения на изображении этой камеры, то в СК камеры $K2$ изображение этого объекта будет иметь такие же координаты, что и в СК камеры $K1$. И если этот объект максимально приблизить к камере $K1$, то на изображении камеры $K2$ изображение этого объекта будет смещаться вдоль оси $O_{K2}X_{K2}$ до тех пор, пока не выйдет за пределы изображения этой камеры.

Для нормальных условий съемки линия поиска L_{K2}^p объекта P , заданного в СК камеры $K1$ вектором скорректированных координат $A_{K1}^D = (x_{K1}^D, y_{K1}^D, f_{K1}, 1)$, на изображении Img_{K2} камеры $K2$ по горизонту будет протягиваться от точки P_{K2}^0 до точки P_{K2}^∞ . При этом с учётом того, что

в вертикальной плоскости координаты изображений объекта на обоих изображениях будут совпадать, т.е. $y_{K1}^D = y_{K2}^D$, а фокусные расстояния объективов обеих камер равны, т.е. $f_{K1} = f_{K2}$ координаты точки P_{K2}^0 в СК камеры $K2$ можно записать как

$$P_{K2}^0 = (0,5[N_{K2}P_{K2}^X - P_{K2}^X] y_{K2}^D, f_{K1}, 1) \quad (1)$$

Координаты же изображения бесконечно удалённой точки P_{K2}^∞ , определяющей правую границу линии поиска L_{K2}^p , будут иметь те же координаты, что и в СК камеры $K1$, т.е.

$$P_{K2}^\infty = A_{K1}^D \quad (2)$$

Изменим ситуацию. Пусть теперь объектив камеры $K1$ будет иметь фокусное расстояние $f'_{K1} \neq f_{K2}$. Изменится положение изображения Img_{K1} , приняв положение Img'_{K1} , а вектор координат запишем как $A'_{K1} = (x'_{K1}, y'_{K1}, f'_{K1}, 1)$.

Тогда из подобия прямоугольных треугольников $O_{K1}P_{K1}^{img}O_{K1}$ и $O_{K1}P'_{K1}^{img}O_{K1}$ найдём вектор координат точки P_{K1}^{img} в СК камеры $K1$

$$A_{K1}^D = A'_{K1} \frac{f_{K2}}{f'_{K1}} = \begin{pmatrix} y'_{K1} \frac{f_{K2}}{f'_{K1}} & y'_{K1} \frac{f_{K2}}{f'_{K1}} & y'_{K1} \frac{f_{K2}}{f'_{K1}} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

С учетом полученных зависимостей векторы P_{K2}^0 и P_{K2}^∞ границ линии поиска L_{K2}^p для нормально расположенных камер $K1$ и $K2$ в случае, когда их объективы имеют разные фокусные расстояния $f_{K1} \neq f_{K2}$, представим в следующем виде:

$$P_{K2}^0 = \left(\frac{[N_{K2}P_{K2}^X - P_{K2}^X]}{2}, y_{K1}^D \frac{f_{K2}}{f_{K1}}, f_{K2}, 1 \right) \quad (4)$$

$$P_{K2}^\infty = (x_{K1}^D \frac{f_{K2}}{f_{K1}}, y_{K1}^D \frac{f_{K2}}{f_{K1}}, f_{K2}, 1) \quad (5)$$

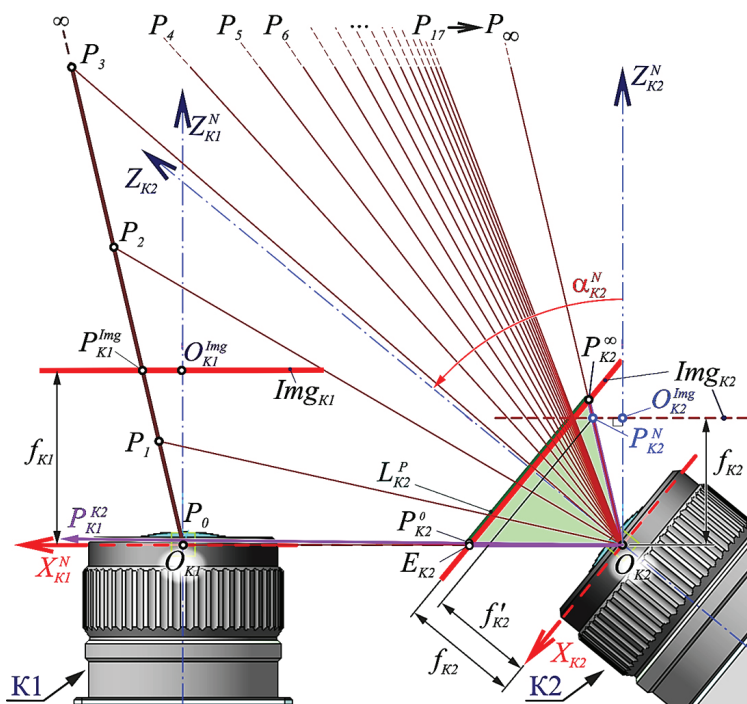


Рис. 3. Иллюстрация к нахождению положения линии поиска для случая со случайно отклоненной правой камерой

Теперь камеру K_1 оставим в том же положении, а камеру K_2 повернём относительно оптического центра O_{K_2} её объектива на угол $\alpha_{K_2}^N$ (рис. 3).

Для определения границ линии поиска $L_{K_2}^P$ на отклонённой камере выражения (4) и (5) неприменимы, так как они справедливы только для нормально расположенных камер. Кроме этого, положение левой границы $P_{K_2}^0$ линии поиска $L_{K_2}^P$ теперь определяется не краем изображения, а положением на изображении Img_{K_2} эпиполюса $E_{K_2}^0$.

Определим положение вектора $P_{K_2}^\infty$ в СК K_2 .

Из представленной схемы очевидно, что перенос вектора $P_{K_2}^{img}$ из СК K_1 в СК K_2 , согласно выражению (2), с учётом масштабирования относительно фокусных расстояний даст вектор $P_{K_2}^N$ с координатами, записанными в СК камеры K_2 , если бы она была расположена нормально относительно камеры K_1 , т.е.

$$\begin{aligned} P_{K_2}^N &= A_{K_1}^D \frac{f_{K_1}}{f_{K_2}} = \\ &= \left(x_{K_1}^D \frac{f_{K_2}}{f_{K_1}} \quad y_{K_1}^D \frac{f_{K_2}}{f_{K_1}} \quad f_{K_2}^D \frac{f_{K_2}}{f_{K_1}} \quad 1 \right) = \\ &= \left(x_{K_2}^N \quad y_{K_2}^N \quad f_{K_2} \quad 1 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

В свою очередь, умножение этого вектора на обратную матрицу взаимной ориентации $C_{K_2}^N$ [1, с. 177, 2] камеры K_2 позволит преобразовать значения вектора $P_{K_2}^N$ из нормально расположенной СК камеры K_1 в действительную СК этой же камеры. Обозначив преобразованный вектор $P_{K_2}^N$ как P_{K_2}' , найдём его значения

$$P_{K_2}' = P_{K_2}^N (C_{K_2}^N)^{-1} = \left(x_{K_2}' \quad y_{K_2}' \quad f_{K_2}' \quad 1 \right). \quad (8)$$

Проведя масштабирование значений вектора P_{K_2}' относительно фокусного расстояния f_{K_2} камеры K_2 , найдём значение вектора $P_{K_2}^\infty$, определяющего положение правой границы линии поиска $L_{K_2}^P$ в случае, когда камеры K_1 и K_2 случайно расположены друг относительно друга

$$P_{K_2}^\infty = P_{K_2}' \frac{f_{K_2}}{f_{K_2}'} = \left(x_{K_2}^\infty \quad y_{K_2}^\infty \quad f_{K_2} \quad 1 \right). \quad (9)$$

Теперь определим положение на изображении Img_{K_2} левой границы линии поиска, т.е. точки $P_{K_2}^0$. Для этого в СК нормально расположенной камеры K_2 зададим некоторый вектор, который по своему положению в пространстве будет максимально близок к базовой линии $O_{K_1}O_{K_2}$, но при этом точка $P_{K_2}^{K_1}$ должна находиться на плоскости Img_{K_2} , а вертикальная его координата будет равна той же координате вектора $P_{K_2}^N$, т.е.

$$P_{K_2}^0 = \left(\infty \quad y_{K_2}^N \quad f_{K_2} \quad 1 \right). \quad (10)$$

Так как при практических вычислениях на ЭВМ с бесконечностью работать не всегда удобно, а тем более, что для ЭВМ бесконечность всегда является строго ограниченной величиной, например, в программе Mathcad за бесконечность принимается число 1×10^{307} , и в связи с тем, что положение объекта интереса непосредственно в точке оптического центра O_{K_1} камеры K_1 маловероятно, то при задании вектора $P_{K_2}^{K_1}$ без значимой потери точности примем за первую координату значение, равное более чем ста значениям расстояний между камерами. В итоге первая координата вектора $P_{K_2}^{K_1}$ с учётом расстояния между камерами (9) может быть записана как

$$P_{K_2}^{K_1(i)} \geq 100 \left| C_{K_1}^{WT(4)} - C_{K_2}^{WT(4)} \right|. \quad (11)$$

В итоге вектор $P_{K_2}^{K_1}$ запишем в следующем виде:

$$P_{K_2}^{K_1} = \left(100 \left| C_{K_1}^{WT(4)} - C_{K_2}^{WT(4)} \right| y_{K_2}^N \quad f_{K_2} \quad 1 \right). \quad (12)$$

Для нахождения положения точки $P_{K_2}^0$ пересчитаем координаты вектора $P_{K_2}^{K_1}$ из СК нормально расположенной камеры K_2 в СК произвольно расположенной камеры K_2 аналогично (8), в результате чего получим

$$P_{K_2}'' = P_{K_2}^{K_1} (C_{K_2}^N)^{-1} = \left(x_{K_2}'' \quad y_{K_2}'' \quad f_{K_2}'' \quad 1 \right), \quad (13)$$

где P_{K_2}'' — обозначение вектора $P_{K_2}^{K_1}$, заданного в СК произвольно расположенной камеры K_2 .

Аналогично (9) окончательно найдём координаты точки $P_{K_2}^0$ на изображении Img_{K_2} случайно расположенной камеры K_2

$$P_{K_2}^0 = P_{K_2}'' \frac{f_{K_2}}{f_{K_2}''} = \left(x_{K_2}^0 \quad y_{K_2}^0 \quad f_{K_2} \quad 1 \right). \quad (14)$$

Таким образом, полученные векторы $P_{K_2}^\infty$ и $P_{K_2}^0$ будут содержать координаты дополнительных ограничений эпиполярной линии поиска. Так как значения координат данных векторов заданы в системе координат камеры, то потребуются их перевод в систему координат изображения на основе модели камеры.

Особенностью изложенного подхода к нахождению ограничений области поиска является возможность организации автоматического поиска изображений объектов на стереопаре без нахождения фундаментальной матрицы и предварительной обработки изображений, что снизит требования в СТЗ как по условиям функционирования, так и по производительности. Это имеет важное значение для разработки оптико-электронных измерительных систем для образцов бронетанкового вооружения, в том числе и роботизированных, на основе сравнительно маломощных бортовых ЭВМ.

Библиографический список

1. Зубарь А. В., Пивоваров В. П., Алфёров С. В., Кайков К. В. [и др.]. Расширение функциональных возможностей систем управления огнём новых образцов бронетанкового вооружения // Итоговый отчёт НИР. Шифр «Стрекоза». Омск: ОАБИИ, 2016. 115 с.
2. Зубарь А. В., Кайков К. В., Гейнце Э. А. Математическая модель прицела перископического типа как элемента системы технического зрения // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. 2017. № 46. С. 121–126.
3. Зубарь А. В., Майстренко В. А., Кайков К. В. Программно-аппаратная реализация оптико-электронной стереосистемы определения дальности // Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 273–278.
4. Вахимов А. А., Гуревич Л. С., Павленко Д. В. Обзор алгоритмов стереозрения // Стохастическая оптимизация в информатике. 2008. Т. 4, № 1-1. С. 151–167.
5. Зубарь А. В., Сидоренко А. А., Тишин С. А., Щербо А. Н. Анализ способов поиска соответствий на изображениях для маломощных систем технического зрения // Национальные приоритеты России. Сер. 1. Наука и военная безопасность. 2017. № 4 (11). С. 5–12.

6. Крыловецкий А. А., Протасов С. И. Алгоритмы анализа изображений в системах стереозрения реального времени // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2010. № 2. С. 9–18.

7. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. [и др.]. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

8. Фосайст Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход; пер. с англ. М.: Издат. дом Вильямс, 2004. 928 с. ISBN 5-845-0542-7.

9. Fursov V., Goshin Ye. Conformed identification of the fundamental matrix in the problem of a scene reconstruction, using stereo images // Image Mining. Theory and Applications Conf. Proceedings of IMTA-4 2013. 2013. P. 29–37.

10. Чумаченко А. В. Разработка и исследование алгоритмов установления пиксельных соответствий на стереопарах для решения задачи восстановления рельефа: дис. ... канд. техн. наук. Таганрог, 2014. 134 с.

ПИВОВАРОВ Владимир Петрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика».

AuthorID (РИНЦ): 408317

Адрес для переписки: vpvivovarov@mail.ru

ЗУБАРЬ Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика».

Адрес для переписки: alexey_zubar@mail.ru

Для цитирования

Пивоваров В. П., Зубарь А. В. Дополнительные ограничения при поиске изображений на стереопарах вдоль эпиполярных линий // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 124–128. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-124-128.

Статья поступила в редакцию 16.02.2018 г.

© В. П. Пивоваров, А. В. Зубарь

УДК 004.02

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-128-133

Д. А. ПАНКОВ
Л. А. ДЕНИСОВА

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПРОГРАММНО- АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

В работе предлагается комплекс показателей контроля основных неисправностей микроконтроллерной системы. Рассмотрены вопросы тестовой имитации неисправностей для автоматизации тестирования устройств на этапе разработки. Предложен подход к выявлению неисправностей программно-аппаратного комплекса с использованием программно-алгоритмических модулей контроля и диагностики. Экспериментально подтверждена эффективность данного подхода для контроля и диагностики сбоев и отказов в аппаратных компонентах при имитации неисправностей.

Ключевые слова: контроль и диагностика, имитация неисправностей, автоматизация тестирования, программно-аппаратный комплекс, аппаратный отказ.

Введение. Проектирование программно-аппаратных комплексов, состоящих из технически сложных аппаратных устройств, а также реализующих набор программ, выполняемых на одном или нескольких микроконтроллерных устройствах, является сложной задачей. Проблема контроля и диагностики неисправностей имеет актуальность для таких микроконтроллерных систем, как космические системы управления, информационно-вычислительные кластеры, поскольку для этих систем существуют жесткие требования к такому показателю надежности, как время наработки на отказ. Решение проблемы контроля и диагностики программно-аппаратных средств осложняется тем, что системы подвержены разнообразным внешним воздействиям, полный контроль которых физически нереализуем [1]. Отказ микросхем или воздействие излучения на устройство может привести к сбою при выполнении программы или к отказу интер-

фейса обмена между устройством и внешней средой. Следует отметить, что отдельной проблемой является проблема отказоустойчивости программного обеспечения, которое, к сожалению, нельзя рассматривать независимо от аппаратных средств, на которых оно реализовано [2].

В процессе испытаний изделия на надежность не всегда удается корректно установить все неисправности в программной и аппаратных составляющих, поэтому при эксплуатации комплекса устройств возможны экономические потери и невыполнение установленного в техническом задании показателя времени безотказной работы. Применительно к вычислительным комплексам можно говорить о различных типах входящих в них устройств, таких как устройство управления (УУ), рабочая станция оператора (РС) и приемно-передающее устройство (ППУ). В качестве примера на рис. 1 показана схема возможной организации программ-