

УДК 681.784.3.

Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарёв, Е.Н. Соснов

ЛАЗЕРНО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННАЯ СИСТЕМА ТРЕХМЕРНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА БАЗЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕЛЕКАМЕРЫ

В последние годы большое внимание уделяется созданию новых систем технического зрения (СТЗ) для робототехнических комплексов, в том числе космического назначения. Бурное развитие отрасли обусловлено стремительным прогрессом как телевизионной аппаратуры, так и лазерной техники. Уменьшение массогабаритов и энергопотребления позволяет оснащать активной сенсорикой космические манипуляторы и автономные мобильные платформы. Вместе с тем возникли новые задачи, в частности связанные с разработкой алгоритмов обработки большого объема информации в реальном времени в автономном или автоматическом режимах. В предлагаемой статье изложен подход к построению лазерно-телевизионной триангуляционной системы трехмерного позиционирования с высокоскоростной телекамерой для использования в космических транспортно-манипуляционных система (КТМС).

Лазерно-телевизионная триангуляционная система трехмерного позиционирования подразумевает, что измерения координат объектов осуществляются по триангуляционной схеме. Базу этой системы составляют лазерный источник структурированной подсветки и приемная телевизионная камера. Трехмерное позиционирование подразумевает управление положением зоны лазерной подсветки в пространстве и времени. Изменяя это положение и используя высокую скорость получения визуальной информации, можно существенно снизить длительность одного цикла измерений в фиксированной рабочей зоне. В основу разрабатываемой системы легли результаты ранее выполненных исследований систем технического зрения со структурированной подсветкой, приведенные в работах [1–6].

Основная особенность СТЗ, рассматриваемой в статье, — выполнение требований к достижению определенной точности измерения координат объектов в условиях высокого контраста освещенности при жестких ограничени-

ях на массогабаритные характеристики и энергоемкость. Одним из существенных ограничений был малый размер базы измерений — он не превышал 15 см. В качестве приемной системы использовалась монохромная видеокамера Вау-тег НХС40NIR, имеющая CMOS матрицу 1", с разрешением 2048×2048 пикселей и скоростью съемки до 180 кадров в секунду. При выборе объектива камеры необходимо было учитывать, какое поле зрения камеры мы должны обеспечить. На рис. 1 приведена зависимость поля зрения от фокусного расстояния объектива при размере приемной матрицы камеры 1 дюйм (1").

Зная такие параметры, как фокусное расстояние объектива (угол зрения), расстояние до объекта, формат матрицы видеокамеры и общее количество пикселей видеокамеры, легко оценить минимальный размер обнаруживаемого объекта. На рис. 2 приведены зависимости минимально различимого объекта от угла зрения камеры при дальности до объекта 1,5 м, 2,5 м и 5 м. Из него видно, что зависимость носит линейный характер как по углу зрения, так и по дальности.

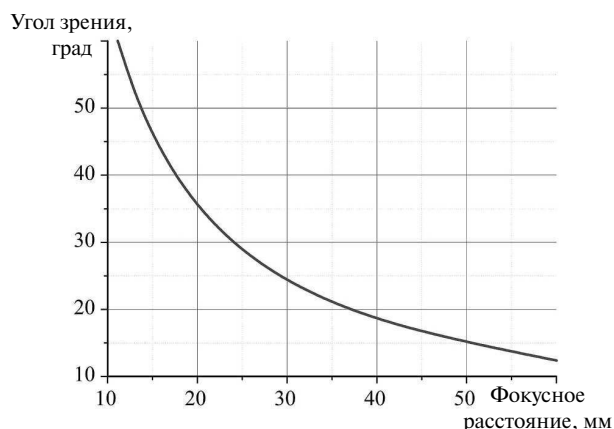


Рис. 1. Зависимость поля зрения от фокусного расстояния объектива при размере приемной матрицы камеры 1"

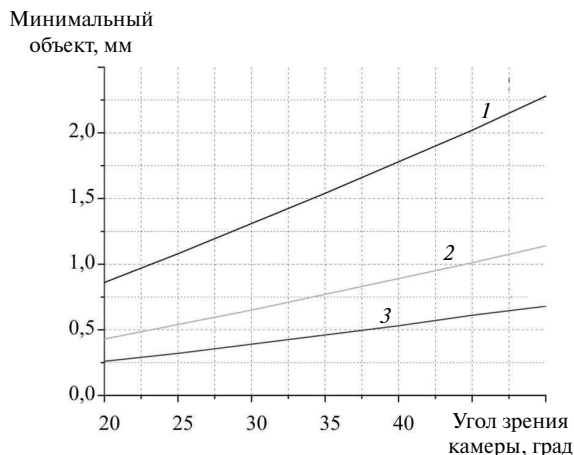


Рис. 2. Зависимость размеров минимального обнаруживаемого объекта камерой Baumer HXC40NIR от угла зрения камеры при различных дальностях до объекта (1 – 5 м; 2 – 2,5 м; 3 – 1,5 м)

По классическим формулам триангуляции [7, 8] предельная дальность, на которой работает триангуляционный метод, может быть оценена следующим образом:

$$\frac{b}{d_{\max}} = \frac{1}{N} \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{\max}}{2}\right),$$

где b — база измерений, d_{\max} — максимально возможная дальность измерений, N — число элементов в строке (столбце) приемной матрицы, φ_{\max} — полное поле зрения видеокамеры. В нашем случае она превышает 740 м. Что касается погрешности определения дальности, то данный параметр зависит не только от дальности, но и от углового разрешения камеры, а конкретнее — от точности определения положения

центра линии. Относительная погрешность определения дальности при угловом разрешении в 1 пиксель можно оценить по формуле

$$\frac{\Delta d}{d} > \frac{1}{N} \frac{d}{b} \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{\max}}{2}\right).$$

Выполненные оценки показывают, что погрешность определения дальности до объекта составит 13 см на расстоянии 10 м, 3 см — на дистанции 5 м, 1 см — на 3 м, 5,4 мм — на 2 м, 1,3 мм — на расстоянии 1 м. Заметим, что полученные оценки соответствуют погрешности измерений координаты линии подсветки в 1 пиксель. При использовании специальных алгоритмов обработки информации (например, при определении центра тяжести линии) и достаточно сильном сигнале можно достичь субпиксельной точности определения координат объекта.

Еще один аспект, который требует достаточно серьезного рассмотрения, — это создание электронно-переключаемого лазерного узла структурированной подсветки. В предыдущих работах [1–6] для формирования диаграммы направленности использовалось единое цилиндрическое зеркало. Опыт работы показал, что юстировка такого узла — крайне сложная и трудоемкая задача, при этом формируемое семейство линий подсветки оказывается неудобным для вычислений, поскольку они образуют расходящийся веер.

В состав предлагаемой системы лазерных генераторов линий с независимыми зеркалами входят восемь лазерных диодов L808P200 фирмы THORLABS. Их характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры диодов L808P200

Параметр	Значение		
	Минимальное	Типичное	Максимальное
Длина волны излучения, нм	805	808	811
Пороговый ток, мА	60	80	100
Рабочий ток, мА	220	260	300
Рабочее напряжение, В	1,8	2,0	2,5
Выходная оптическая мощность, мВт	180	200	220
Расходимость 1, град	8	10	12
Расходимость 2, град	25	30	40

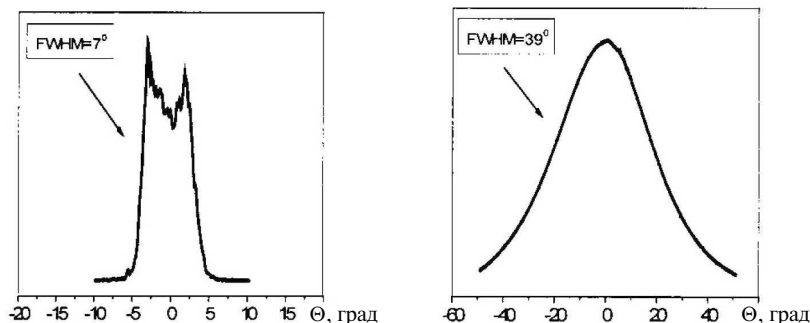


Рис. 3. Угловое распределение выходного излучения, характерное для лазерных диодов

Классическое угловое распределение выходного излучения лазерных диодов приведено на рис. 3. Одним из основных параметров, которые необходимо учитывать при построении лазерно-телевизионной системы измерения координат, является расходимость излучения в двух ортогональных направлениях. Контроль этого параметра осуществлялся с помощью системы комплексной диагностики параметров лазерного пучка VeamPro. Расходимость по двум ортогональным направлениям по уровню 0,7 составила соответственно 10,6 и 31,8 градусов с точностью до 20 угловых минут.

Для получения отдельной лазерной линии излучатель размещался таким образом, чтобы в направлении, в котором расходимость лазерного пучка составляет 10 градусов, он находился в фокусе своего цилиндрического зеркала. Тогда для другого направления распространения излучения (с расходимостью в 30 градусов) цилиндрическое зеркало работает как плоское. Для экспериментального образца был изготовлен набор цилиндрических зеркал с радиусом кри-

визны 60 мм (фокусное расстояние 30 мм). После отражения от зеркала по одному из направлений излучение оказывается сформированным в коллимированный пучок (вместо расходимости 10 градусов), а по другому направлению оно сохраняет расходимость в 30 градусов. Ширина коллимированного пучка определяется расстоянием между излучателем и зеркалом и расходимостью пучка. Для приведенных выше значений ширина лазерной линии в пространстве составляет 5,4 мм с учетом размеров излучающей площадки. Конструкция в трехмерном изображении (а) и фотография (б) блока излучателей приведены на рис. 4.

Блок управления лазерно-телевизионной триангуляционной системой трехмерного позиционирования, ориентированный на применение в составе КТМС, должен выполнять следующие основные задачи: во-первых, задавать режим работы видеокамеры, во-вторых, управлять работой лазерных излучателей подсветки и, в-третьих, обеспечивать синхронизацию работы этих двух основных частей измерительной системы.

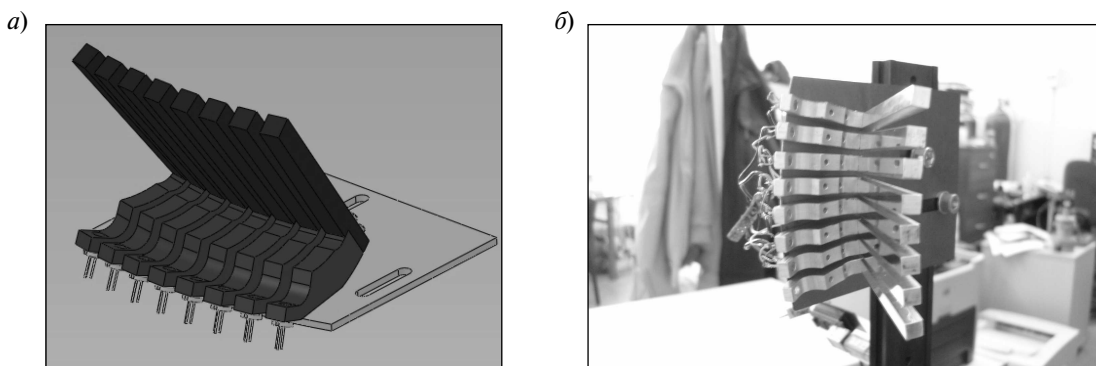


Рис. 4. Блок лазерных излучателей

Управление телевизионной камерой (время экспозиции, усиление сигнала и другие параметры) осуществляется из программно-аппаратного комплекса на базе персонального компьютера через USB-кабель при помощи программного обеспечения, поставленного разработчиком телевизионной камеры Baumer HXC40NIR. Параметры камеры задаются до начала работы и сохраняются в течение всего цикла измерений. При существенных изменениях условий освещенности, влияющих на точность измерений, программа останавливает сбор информации с камеры, перенастраивает режим, после чего заново запускает рабочий цикл.

Управление активной лазерной подсветкой осуществляется специально разработанной платой, в задачи которой входит включение и выключение одного или нескольких лазерных излучателей в определенные моменты времени, регулирование уровня выходной мощности излучателя. Как и управление видеокамерой, управление микропроцессором блока подсветки, размещенном на этой плате, также осуществляется из программно-аппаратного комплекса; с телевизионной камеры на него поступает только кадровый синхроимпульс, задающий момент начала времени экспозиции.

Микропроцессор осуществляет программную задержку на 30 мкс относительно кадрового синхроимпульса, после чего подает импульс синхронизации подсветки на 8-канальный ЦАП. Длительность импульса синхронизации подсветки выставляется равной длительности экспозиции, информация о которой поступает с программно-аппаратного комплекса.

Помимо информации о длительности экспозиции перед каждым кадровым синхроимпульсом на микропроцессор поступает информация о мощности каждого из восьми лазерных диодов. Эти данные микропроцессор транслирует на восьмиканальный цифроаналоговый преобразователь, выдающий соответствующие аналоговые сигналы на управляемые источники тока. Последние по импульсу синхронизации подсветки формируют импульсы тока заданной величины в лазерных диодах. Для лазерных диодов, не участвующих в работе при съемке данного кадра, информация о величине сигнала, подаваемая на микропроцессор, соответствует нулевому уровню выходной мощности.

Поскольку при измерении рельефа поверхности международная космическая станция (МКС) предполагает использовать дифференциальный режим измерений, то для его реализации осуществляется последовательная съемка рабочей зоны кадров с подсветкой и без подсветки с дальнейшим вычитанием одного из другого.

Для оптимизации работы системы используют синхронизацию съемки одного кадра с включением подсветки. Это осуществляют путем одновременного включения одного или нескольких лазерных диодов (в зависимости от режима работы) и съемки нечетного кадра. На рис. 5 показана временная диаграмма работы камеры с подсветкой в каждом кадре.

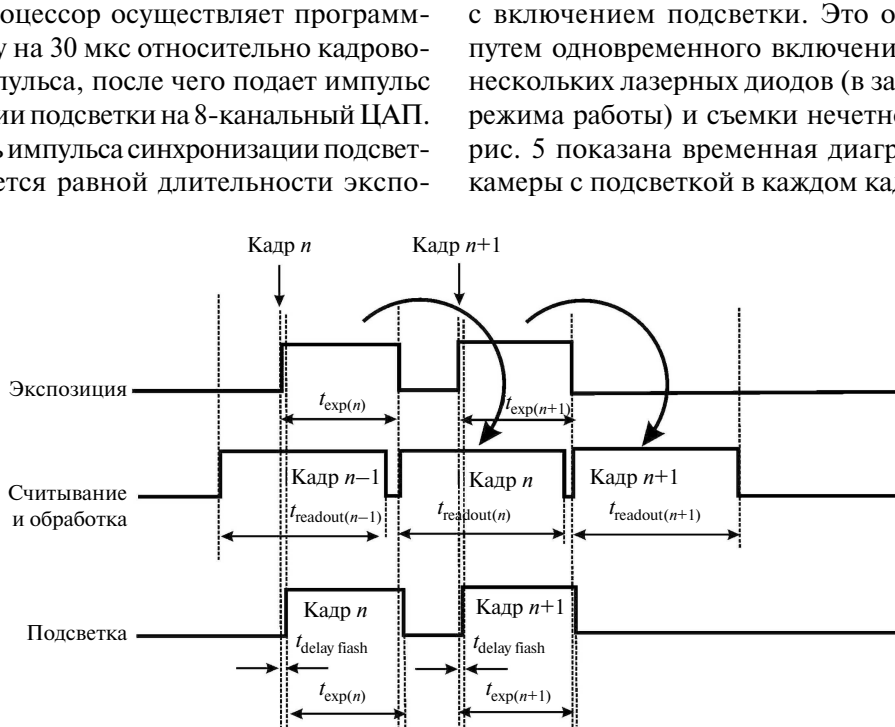


Рис. 5. Временная диаграмма схемы синхронизации

Обратная связь строится по освещенности, которую создает каждый из источников на матрице телекамеры. В связи с этим одной из функций управляемых источников тока является ограничение силы тока предельно допустимым значением. Использование импульсного режима подсветки с высокой скважностью позволяет в некоторой степени повысить пиковую мощность излучения по сравнению с допустимой средней интенсивностью излучения.

Подобная организация электронной схемы адаптивного управления подсветкой и телевизионной камерой позволяет гибко варьировать режимы работы, однако предъявляет определенные требования к программно-аппаратному комплексу. Его процессорных мощностей должно хватать на то, чтобы одновременно принимать данные с телевизионной камеры, обрабатывать их и управлять микропроцессором системы активной подсветки. При этом работа должна быть организована циклически так, чтобы передача данных о мощности излучателей на микропроцессор была полностью завершена до прихода кадрового синхроимпульса.

Созданная на основе изложенных соображений лазерно-телевизионная триангуляционная система трехмерного позиционирования была экспериментально исследована в условиях различной освещенности рабочей зоны. Измерения проводились в двух режимах освещенности. В первом (ночном) режиме создавались условия для максимального снижения фоновой засветки. Второй режим моделировал условия интенсивной солнечной засветки, характерной для околоземной орбиты. При этом речь шла

только о световом поле излучения Солнца, никакие потоки заряженных частиц не моделировались.

Кроме того, чтобы промоделировать солнечную засветку не обязательно обеспечивать освещение всей рабочей зоны. В экспериментах создавалась засветка небольшого участка рабочей зоны и исследовалась возможность проведения измерений при различных наборах светофильтров, установленных на объективе видеокамеры. Имитатор солнечной засветки был создан на основе белого теплого светодиода HPR40E-19K100YWG (он имеет спектральное распределение излучения, максимально приближенное к излучению Солнца) и оптической системы формирования коллимированного пучка с интенсивностью непрерывной засветки 140 мВт/см^2 .

Рис. 6 иллюстрирует важность использования специальных светофильтров для проведения измерений. Без применения специальных светофильтров проведение каких-либо измерений или мониторинга в зоне засветки не представлялось возможным (см. рис. 6, а). Использование абсорбционного светофильтра КС-19 значительно улучшало ситуацию (см. рис. 6, б). Лучшие результаты были получены при использовании специально изготовленного интерференционного фильтра на 808 нм (см. рис. 6, в).

При наличии узкополосного фильтра, имеющего максимум пропускания на рабочей длине волны лазерных излучателей, солнечная засветка не влияла на точность определения координат объектов. Используемая видеокамера способна работать со скоростью съемки до 180 кадров/с ,

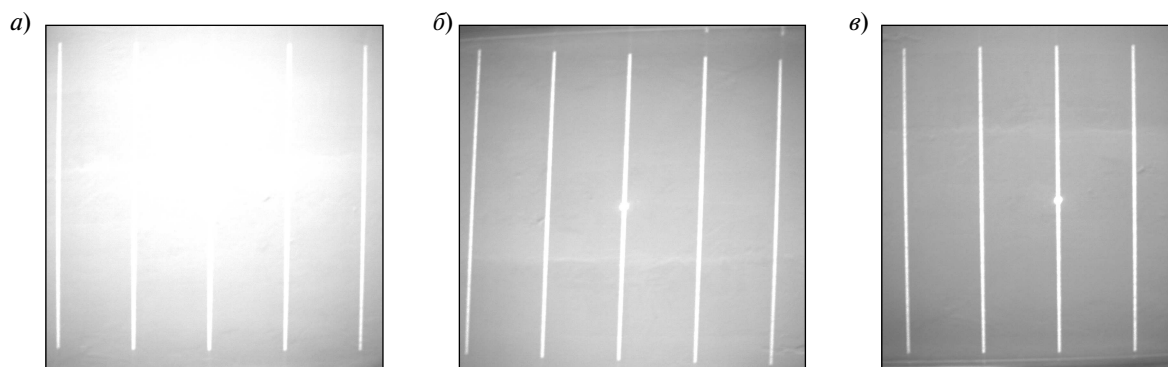


Рис. 6. Изображение лазерных линий, полученное в условиях имитации солнечной засветки без фильтра (а), с абсорбционным светофильтром КС-19 (б) и с узкополосным интерференционным фильтром (в)

однако основная серия опытов проводилась на частоте 100 Гц.

В табл. 2 приведены данные по экспериментально полученным погрешностям измерений координат объектов (серии по 10 измерений). Под погрешностью в проведенной серии измерений в данном случае понимается среднее отклонение измеренного значения дальности от истинного значения.

В проведенных измерениях не применялись специальные алгоритмы обработки информации. При тестовом использовании специальных алгоритмов обработки, позволяющих получать субпиксельное разрешение, которые проводились в полуавтоматическом режиме тестирования программы обработки, удалось повысить точность определения координат объектов практически на порядок.

Проведенные исследования зависимости точности определения координат от скорости съемки при полном разрешении показали, что для дальностей менее 3 м увеличение частоты кадров не оказывает заметного влияния на результаты измерений координат. Вместе с тем высокая частота обновления позволяет получать необходимый объем информации об объекте за меньшее время. На расстояниях более 7–8 м из-за уменьшения плотности мощности излучения в лазерной линии на больших частотах начинает сказываться уменьшение сигнала, приводящее к снижению точности определения расстояний.

Основная часть измерений проводилась с объективом телекамеры, обеспечивающим угол зрения 45 градусов. Переход к объективу с углом зрения 60 градусов приводил к увеличению погрешности на 20 %. Для больших дальностей необходимо или снизить требования по точности, что абсолютно естественно с точки

зрения организации работы КТМС, или существенно повысить сложность алгоритмов подсветки и обработки информации.

Из результатов исследований зависимости погрешности измерений от формы линии подсветки можно сделать следующие выводы. Во-первых, с точки зрения времени обработки информации и простоты построения алгоритмов обработки наиболее выгодным оказывается метка в виде одной прямой линии, т. е. режим последовательного переключения лазерных излучателей с одной линии подсветки на другую. При этом наличие подсветки соответствует только четным кадрам съемки.

Одновременное включение всех линий подсветки уменьшает время сбора координатной информации, но усложняет процедуру, а следовательно, и время обработки. Существует большой набор режимов, который требует значительного объема экспериментальных исследований. Однако при достижении требуемой точности с помощью простого алгоритма нецелесообразно усложнять схему управления и процедуру обработки без существенного выигрыша в результате.

Основным результатом проведенных экспериментальных исследований можно считать подтверждение на опыте всех основных сделанных ранее оценок и разработанных методик и алгоритмов, реализующих технологию лазерно-телевизионных измерений координат объектов для экспериментального модуля сенсорной системы КТМС. В наиболее интересном с точки зрения работы КТМС диапазоне дальностей система работает с требуемой погрешностью даже без сложных алгоритмов обработки получаемых изображений, что позволяет надеяться на возможность функционирования таких систем в полностью автоматическом режиме. Это обусловлено не только простотой и надежностью алгоритма, но и возможностью осуществлять все операции в реальном времени.

Из наиболее значимых результатов следует отметить следующее. Во-первых, использование узких интерференционных фильтров на входном объективе видеокамеры позволяет системе осуществлять измерения дальности с требуемой точностью даже в зоне интенсивной солнечной засветки. Во-вторых, работа видеокамеры на частотах кадров порядка сотен Герц в режиме поочередного включения лазерных излучателей

Таблица 2

Результаты определения погрешности измерения координат

Дальность, м	Точность, мм	
	Без засветки	С засветкой
10,2	135	140
4,9	32	35
3,1	10	11
1,9	4	5
1,1	1,1	1,3

подсветки вместе с обеспечением необходимой точности измерений за счет дополнительного усреднения (или накопления) получаемой координатной информации сопровождается существенным снижением потребляемой мощности, что крайне важно для мобильных систем космического назначения.

Эта экономия энергии определяется тем фактом, что в каждом четном кадре работает, т. е. потребляет энергию, только один излучатель. Кроме того, такой импульсный режим с большой скважностью позволяет использовать лазерный диод в сильно нагруженном режиме, повышая яркость генерируемых линий подсветки. Это, конечно, несколько снижает эффект экономии энергии, но по сравнению с восьмикратным снижением энергопотребления в нормальном режиме работы этот факт можно не принимать во внимание.

Возможность работы с повышенной яркостью означает увеличение предельных дальностей в случае, если такая проблема вдруг возникла. Хотя использовать такой режим в качестве штатного не рекомендуется, поскольку он снижает не только общий ресурс системы, но и степень ее надежности.

Еще один важный аспект — использование высокоскоростной камеры для созданной лазерно-телевизионной системы. Даже при полном разрешении по обеим координатам время получения координатной информации об объектах во всей рабочей области составляет от 50 до 100 мс в зависимости от используемого алгоритма включения-выключения линий подсветки. Для решения большинства задач КТМС допустимо снизить разрешение по одной из координат (параллельной линиям лазерной подсветки).

Использование такого режима (режим «Line Scan» для камер фирмы Baumer) позволяет получать информацию со скоростью более 700 кадров в секунду при разрешении 2048 512 пикселей. В этом случае время получения полного объема координатной информации не превышает 23 мс. Такие времена при простом алгоритме обработки позволяют восстанавливать трехмерный рельеф рабочей зоны в реальном времени. Кроме того, остается достаточно времени для сравнения выделенных объектов с априорно известными трехмерными моделями, для определения формы и ориентации этих объектов. Получение

в реальном времени информации о координатах, образах и ориентации объектов обеспечивает возможность не только перемещения и фиксации КТМС на рабочей поверхности МКС, но и нормального манипулирования инструментами для поддержки внекорабельной деятельности космонавтов.

Несмотря на опасения, что величина базы измерений не позволит осуществлять определение дальности с требуемой точностью, эксперименты, последующая обработка их результатов и моделирование показали, что переход к более сложным алгоритмам на больших дистанциях полностью снимает указанную проблему. Вместе с тем можно смело утверждать, что в основной рабочей зоне система функционирует даже без применения специальных алгоритмов. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении выбранного угла обзора видеокамеры.

Общее сочетание широкого поля зрения, большой максимальной дальности и малой погрешности измерений на всем диапазоне углов и расстояний можно реализовать только за счет усложнения алгоритма обработки информации, мощности излучателей и увеличения времени обработки с заметным снижением достоверности получаемых результатов, что неминуемо отразится на уменьшении надежности работы комплекса в целом. Снижение надежности работы КТМС, предназначенной для функционирования в условиях космического пространства на поверхности МКС для обеспечения внекорабельной деятельности космонавтов, ради увеличения точности измерения координат на расстояниях более 10 м представляется абсолютно нецелесообразным.

Вместе с тем при работе КТМС желательно осуществлять контроль окружающего пространства, но данная процедура не выдвигает столь жестких требований по точности определения координат. Для этих целей можно и целесообразно использовать отдельную обзорную камеру для мониторинга окружающего пространства, а измерения производить только в ближней рабочей зоне.

Подводя итог сказанному, можно сделать вывод, что разработанная система измерения координат на базе высокоскоростной камеры и матрицы генераторов линий — весьма удобное

средство очувствления космических транспортно-манипуляционных систем, поскольку не содержит механических элементов сканирования, снижающих надежность комплекса в условиях космического пространства, легко адаптируется к условиям освещенности и спектру задач.

Кроме того, конечное число объектов позволяет эффективно осуществлять предварительное трехмерное моделирование процессов при относительно малых объемах передаваемой информации за счет эффективной векторизации изображения. Недостаток, связанный с большими зазорами между линиями подсветки при малом числе излучателей, в случае КТМС легко компенсируется как общим движением мобильной платформы, так и размещением разработанного лазерно-телевизионного комплек-

са на отдельном шарнире, играющем роль шеи и обеспечивающем вращение вокруг оси, общей для всех плоскостей излучений лазерных генераторов линий.

Статья была подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 16.518.11.7054 от 12 мая 2011 г. по мероприятию 1.8 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» и по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 27 мая 2010 г. № П 1003 с Минобрнауки России, заключенного в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». В работе использовался лазерный трекер API Radian, входящий в состав оборудования ЦКП ЛОТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грязнов, Н.А.** Объемное техническое зрение для автономизации робототехнических систем наземного базирования [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Труды IX Всеросс. научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника». — СПб.: Изд-во СПбПГУ, 2006. — С. 281.
2. **Gryaznov, N.** Structured laser lighting for camera-based analysis of 3D ambient image [Текст] / N. Gryaznov // Proceedings of the 15th ISTC / «Korea Workshop @ Future Intelligence and Material Technologies». — 2007. — P. 6.
3. **Грязнов, Н.А.** Структурированная лазерная подсветка для технологий трехмерного зрения робототехнических средств [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко, Е.В. Егоров // Оптический журнал. — 2007. Т. 74, № 8. — С. 37–43.
4. **Грязнов, Н.А.** Активные объектно-ориентированные системы технического зрения реального времени [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Труды XII-й Всеросс. научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника». — Дивноморское-Геленджик, Краснодарский край. — 2009. — С. 177.
5. **Грязнов, Н.А.** Тенденция развития и идеология построения систем сбора координатной информации [Текст] / Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев // Тр. междунауч.-техн. семинара «Робототехника. Взгляд в будущее». СПб.: Из-во СПбПГУ, 2010. — С. 226–229.
6. **Грязнов, Н.А.** Компактные активные сенсорные средства для сбора информации с низким энергопотреблением [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко // Тр. междунар. конф. «Средства робототехники для обеспечения безопасности. Планетоходы, космическая робототехника, наземные роверы». — СПб.: Изд-во СПбПГУ, 2010. — С. 108.
7. **Назаров, А.С.** Фотограмметрия [Текст]: учебное пособие для студентов вузов / А.С. Назаров // Минск: ТетраСистемс, 2006. — 368 с.
8. **Обиралов, А.И.** Фотограмметрия [Текст] / А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова. — М.: КолосС, 2002. — 240 с.