

СТРУКТУРИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ПОДСВЕТКА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХМЕРНОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

© 2007 г. Н. А. Грязнов, канд. физ.-мат. наук; В. В. Кириченко, канд. техн. наук; Е. В. Егоров

Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

E-mail: gna@rtc.ru

Для решения задач объемного технического зрения без ограничений на уровень освещенности и рельеф местности проанализированы подходы к применению принципов триангуляционной лазерно-телевизионной дальнометрии на базе сканируемой подсветки лазерным пучком веерной расходимости. С помощью численного моделирования исследованы алгоритмы определения расстояния до объекта с точки зрения влияния параметров подсвечивающего пучка, характеристик системы и условий наблюдения на погрешность измерения дальности. Показано, что использование лазерной подсветки с сильно анизотропной расходимостью на три порядка снижает ограничения на максимальную мощность излучателя с позиций безопасности органов зрения.

Коды OCIS: 2950, 5670, 6910.

Поступила в редакцию 20.02.2006.

Введение

Прогресс в области создания электронных компонентов и вычислительных средств открывает широкие возможности для автоматизации и роботизации устройств различного назначения, в том числе и систем на базе мобильных платформ, функционирующих в условиях местности со сложным рельефом. Наибольший интерес указанный процесс представляет для технологий строительных, дорожных и добывающих отраслей промышленности. Учитывая большие объемы информации, необходимые для оценки ситуации и принятия решения о маршруте движения, вопрос создания надежных и эффективных сенсорных средств является одним из самых актуальных при разработке автономных мобильных платформ.

Миниатюризация телевизионной аппаратуры позволяет рассматривать матричный способ записи видеоизображения как один из наиболее перспективных, учитывая отсутствие механически движущихся деталей в системе сканирования, что обеспечивает большой ресурс и надежность работы. Однако двухмерный портрет трехмерной сцены не дает полноты информации, необходимой для анализа обстановки и принятия решения. Наиболее простой способ получения информации о третьей координате (дальности до объекта) широко распространен в животном мире и базируется на свойствах стереоскопического зрения, что в технической реализации предполагает использование двух разнесенных телекамер.

Существуют и другие способы получения информации о расстоянии до объекта, как правило, активные, связанные с зондированием сцены в акустическом, радиочастотном или оптическом диапазо-

нах. Но акустический и радиочастотный диапазоны существенно уступают оптическому в угловом разрешении, что не позволяет получать детальный портрет сцены на значительном удалении от источника. В связи с этим указанные способы могут рассматриваться как вспомогательные, а телевизионные камеры несомненно являются ключевыми и наиболее перспективными элементами сенсорных систем автономных мобильных платформ.

Требования к системам технического зрения

Чтобы придать проблеме углового разрешения математическую строгость, проанализируем требования к сенсорным системам мобильных робототехнических средств. Типичная скорость перемещения современных роботизированных платформ составляет от 2 до 10 м/с, что определяет минимальную дальность построения подробного портрета сцены в 20 м при времени перемещения 2 с. Минимальные габариты распознаваемых препятствий должны быть согласованы с характерными размерами элементов шасси (5–10 см), что определяет величину необходимого пространственного разрешения по ширине 2–3 см. Другими словами, требование по угловому разрешению составляет 1–1,5 мрад. При этом система должна обладать коротким временем сбора информации, чтобы избежать “смазывания” кадра, связанного как с вращательным, так и с поступательным движением платформы.

Для расширения возможностей выбора оптимальной траектории движения целесообразно увеличивать поле зрения сенсорной системы, особенно в горизонтальной плоскости для платформ наземно-

го или надводного базирования. Увеличение поля зрения при фиксированном угловом разрешении приводит к соответствующему росту размерности приемной матрицы и объемов обрабатываемой информации. Наиболее распространенные по размерности камеры в горизонтальной плоскости содержат 700–1000 элементов, что при угловом разрешении 1–1,5 мрад соответствует углу зрения в 60°.

Точность определения дальности до объекта в общем случае определяется функциональным назначением сенсорной системы. При решении транспортных задач этот параметр используется для восстановления трехмерного рельефа. Другими словами, погрешность определения дальности влияет на точность определения угла наклона или перепада высот. С этой точки зрения логично предположить, что требование к точности определения расстояния не должно существенно отличаться от требований по пространственному разрешению и составляет 2–3 см.

Методы регистрации трехмерного изображения

В свете сформулированных требований целесообразно проанализировать существующие методы дальнометрии, тем более что в последнее время наблюдается высокая активность разработок телевизионных средств объемного зрения в видимом спектральном диапазоне [1, 2]. Телевизионные стереометрические методы не требуют дополнительного освещения (в дневных условиях) и обладают хорошим быстродействием, но имеют значительную погрешность измерения дальности до объекта. Их серьезным недостатком также является сложность однозначной идентификации общих точек в двух изображениях стереоскопического портрета сцены. Если говорить точнее, погрешность измерения расстояний зависит от степени высокочастотной текстурированности изображения, а скорость – от надежности и эффективности работы алгоритма поиска сопряженных точек.

Активные оптические лазерные локационные средства (лидары) имеют узкую направленность излучения подсветки, что обеспечивает высокое угловое разрешение [3, 4], но организация последовательного сканирования приводит либо к низкому быстродействию, либо к высоким скоростям поворота зеркал. Последнее обстоятельство затрудняет обеспечение надежной привязки к угловым координатам и снижает эксплуатационные характеристики устройства. К основным недостаткам лазерных дальномеров следует отнести высокую сложность точного определения угловых координат, сравнительно низкую техническую надежность,

высокую стоимость и чувствительность к помехам из-за рассеяния излучения в ближней зоне, в силу чего сканирующие лидары едва ли являются перспективными сенсорными системами для универсальных мобильных платформ.

Дополнительные возможности раскрываются в случае комбинации активных и пассивных методов построения трехмерного портрета сцены, когда оптическая подсветка используется для повышения степени текстурированности изображения и решения проблемы неоднозначности [5, 6]. В этом случае определение дальности осуществляется по триангуляционному алгоритму, но для освещения сцены используется источник с высокой степенью неоднородности поля. При этом, как правило, обеспечивается требуемая точность определения расстояния и упрощается, но полностью не снимается проблема неоднозначности выбора сопряженных точек. Это обстоятельство не позволяет рассматривать указанные методы как перспективные средства объемного технического зрения, поскольку, во-первых, сохраняется вероятность ошибочного определения дальности, а во-вторых, вычислительный алгоритм не является фиксированным по длительности, что затрудняет его применение в реальном времени. Необходимо отметить также то, что в условиях дневного освещения для повышения текстурированности изображения на больших площадях нужно иметь источник, конкурирующий по создаваемой освещенности с солнечным, что при дальности в 20 м трудно реализуемо.

Триангуляционная дальнометрия

Для преодоления указанных недостатков рассмотрим процедуру измерения расстояния по методу оптической триангуляции (рис. 1). Дальность L до плоскости, в которой лежит выделенная на объекте точка, определяется по формуле

$$L = S / (\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1), \quad (1)$$

где S – расстояние между оптическими осями камер, а α_1 и α_2 – горизонтальные проекции углов, под которыми наблюдается выделенная точка на соответствующих камерах. Предполагаем по умолчанию, что камеры стереопары разнесены в горизонтальной плоскости.

Поиск сопряженной точки на втором изображении осуществляется не по всему пространству, а вдоль эпиполярной линии, которая является проекцией луча из центра координат первой камеры с угловыми характеристиками выбранной точки на вторую камеру. При идеальной юстировке камер и отсутствии аберраций эпиполярная линия определяется выражением

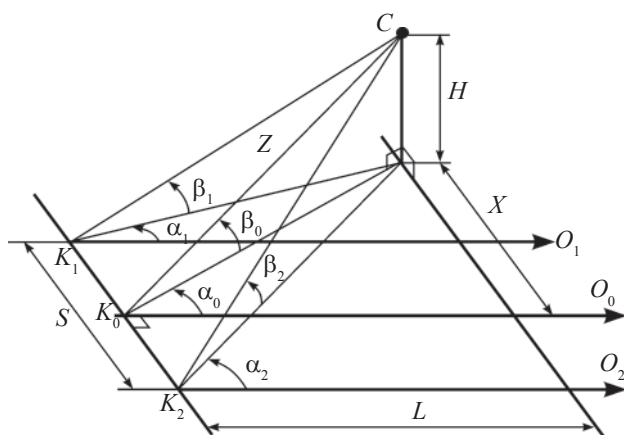


Рис. 1. Принцип измерения расстояния по методу оптической триангуляции с помощью стереопары камер K_1 и K_2 . Пояснения см. в тексте.

$$\beta_2 = \arctg(\tg\beta_2 \cos\alpha_2 / \cos\alpha_1), \quad (2)$$

где β_1 и β_2 – вертикальные проекции углов, под которыми наблюдается выделенная точка на соответствующих камерах. К искажению формы эпиполярной линии приводят как aberrации объективов камер, так и погрешность в их установке. Реальная ее форма определяется при калибровке стереопары по тестовому объекту и табулируется в памяти процессора.

Внешне эпиполярная линия выглядит как слабо изогнутая кривая, близкая к прямой, параллельной горизонтальной оси, и проходящая через точку, соответствующую опорной точке на изображении первой камеры. При этом кривая постепенно загибается в направлении горизонтальной оси при увеличении угла наклона луча в сторону первой камеры. Для полного снятия проблемы неоднозначности необходимо, чтобы на эпиполярной линии была подсвечена только одна точка. Учитывая горизонтальность эпиполярной линии, это условие удовлетворяется в том случае, когда на одном кадре формируется одна вертикальная линия подсветки [7]. Такой прием повышения степени текстурированности изображения можно рассматривать как случай вырожденной структурированной подсветки, когда ее структура упрощается до одиночной вертикальной линии.

Требование по конкуренции создаваемой освещенности с солнечной означает концентрированный (например, лазерный) характер подсветки, что позволяет при относительно малой мощности излучения выдержать конкуренцию за счет спектральной селекции. Сильно анизотропная (или веерная) расходимость лазерного излучения без значительных потерь мощности может быть сформирована с помощью цилиндрических оптических элементов,

например, по схеме, приведенной на рис. 2. Для формирования полноценного трехмерного изображения сцены необходимо осуществлять горизонтальное сканирование вертикального луча подсветки. В предложенной схеме для этой цели используется гексагональное вращающееся зеркало.

Оценим точность, с которой метод триангуляции позволяет определять расстояние до выбранной точки. Погрешность измерения дальности как функция от ошибки измерения угла $\Delta\alpha_i$ выражается формулой

$$\Delta L = L^2 \Delta\alpha_i / S \cos^2 \alpha_i. \quad (3)$$

При базе стереопары 1 м и дальности до объекта 20 м требуемая точность определения углов составит 50 мкрад, что раз в 20 меньше углового размера одного элемента матрицы рассматриваемой камеры. То есть для обеспечения высокой точности определения дальности в широком поле зрения и на больших расстояниях необходимо обеспечить измерение положения центра линии подсветки на изображениях с субпиксельной точностью.

Ключевыми факторами, препятствующими точному определению ее положения, являются фоновое освещение и шумы различной природы, включая тепловой и дробовой. Равномерное фоновое излучение не оказывает существенного влияния на точность измерения положения центра линии, за исключением соответствующего увеличения интенсивности дробового шума. Но, если учесть неравномерность распределения коэффициента отражения и самого фонового изображения из-за наличия теней, его влиянием на точность измерения дальности пренебрегать нельзя. Хотя, в отличие от шума, градиент фона приводит к однонаправленному сме-

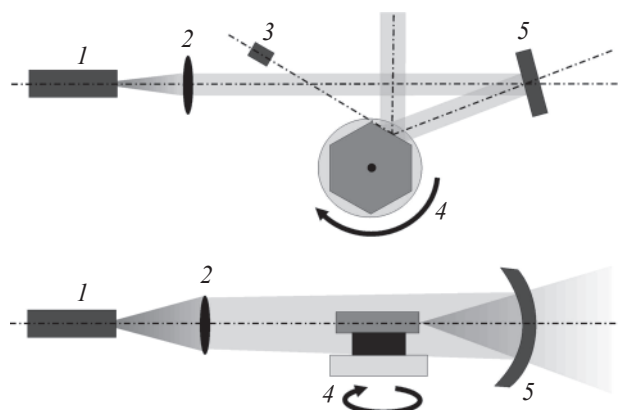


Рис. 2. Оптическая схема формирования веерной расходимости лазерного излучения. 1 – лазер, 2 – линза, 3 – фотодиод для синхронизации, 4 – гексагональный отражатель, 5 – цилиндрическое зеркало.

щению измеренных углов на обеих камерах, что частично компенсирует ошибку и, следовательно, меньше влияет на точность определения дальности.

Для предложенного выше спектрального подавления фонового излучения целесообразно использовать интерференционные и абсорбционные фильтры. При этом для подсветки имеет смысл использовать лазер, генерирующий излучение в ближней инфракрасной области, в которой чувствительность телекамер максимальна, а плотность мощности солнечного излучения падает. Еще один прием подавления фоновой засветки связан с вычитанием предыдущего кадра, на котором то же самое изображение получено с выключенным излучением подсвечивающего источника.

На рис. 3 приведена оптическая схема дальномера “Эллада” [7]. Из-за необходимости спектральной селекции для повышения точности измерения дальности целесообразно использовать третью камеру для визуализации цветного изображения сцены. Помещение третьей камеры в центре измерительной системы для привязки угловых координат в этом случае логически оправдано. Пересчет измеренных угловых координат в радиально-угловые координаты системы, связанной точкой отсчета с центром измерительного комплекса, осуществляется по формулам

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \arctg((\tg\alpha_1 + \tg\alpha_2)/2), \\ \beta_0 &= \arctg(\tg\beta_1 \cos\alpha_0 / \cos\alpha_1), \\ Z &= S / \cos\alpha_0 \cos\beta_0 (\tg\alpha_2 - \tg\alpha_1)\end{aligned}\quad (4)$$

Пример преобразования стереометрического изображения с лазерной веерной подсветкой в мо-

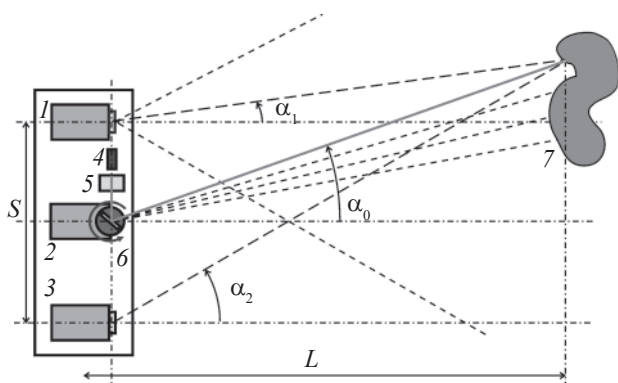


Рис. 3. Схема расположения элементов лазерно-триангуляционного дальномера “Эллада”. 1 – левая камера измерителя, 2 – центральная визуализирующая камера, 3 – правая камера измерителя, 4 – лазер, 5 – оптическая система, 6 – сканирующее устройство.

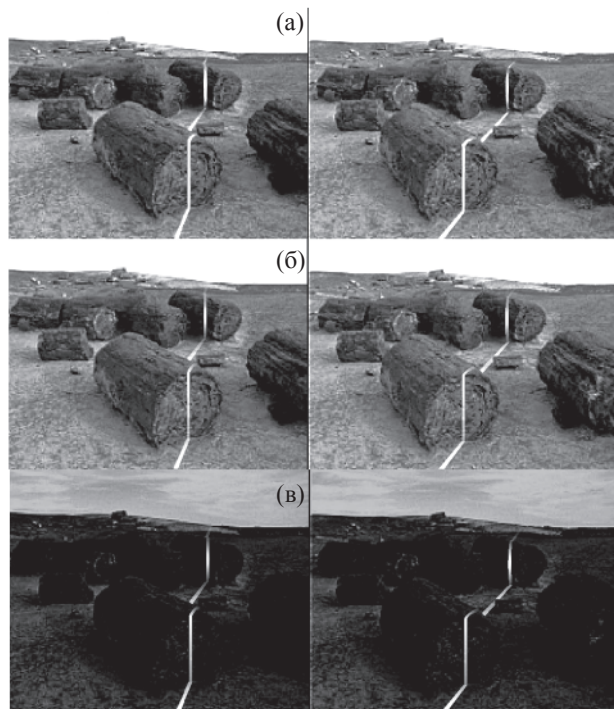


Рис. 4. Преобразование стереометрического изображения с веерной подсветкой в монохроматической камере со спектральной селекцией (а – цветные камеры, б – черно-белые камеры, в – черно-белые камеры с ИК фильтрами).

нохроматической камере со спектральной селекцией представлен на рис. 4. Верхнее изображение соответствует случаю применения цветных телекамер, среднее изображение получено при использовании монохроматических камер, повышенная чувствительность которых в ближней инфракрасной области является естественной. Нижнее изображение получено при размещении перед объективами камер абсорбционных фильтров типа ИКС-1. Использование интерференционных фильтров позволит еще больше повысить отношение сигнала к фону.

Веерная расходимость и безопасность излучения для глаз

Веерная расходимость выходного пучка излучения подсветки позволяет существенно снизить ограничения на предельно допустимую мощность излучения, с точки зрения безопасности применения устройства в целом. Современная тенденция в области обеспечения безопасности от лазерного излучения связана с использованием излучения в спектральном диапазоне 2,5–3 мкм, но отсутствие простых и надежных телевизионных камер в этой области не позволяет рассматривать упомянутый подход в качестве перспективного. Использование

ближнего инфракрасного излучения комфортно, поскольку оно невидимо для человеческого глаза, но небезопасно, поскольку при определенной мощности оно может приводить к повреждению кожного покрова или органов зрения.

На дальностях функционирования в десятки метров не требуется высокой мощности зондирующего сигнала даже для обеспечения подсветки, что создает комфортные условия с точки зрения обеспечения безопасности кожных покровов. При этом остается проблема безопасности сетчатки глаза, поскольку хрусталик фокусирует коллимированный лазерный пучок в пятно с характерным размером в несколько единиц микрон, а малая величина площади (порядка 10^{-5} см^2) даже при собираемой зрачком мощности 10 мВт приводит к интенсивности 1 кВт/см², что может вызвать поражение рецепторов сетчатки глаза [8].

Использование несферической расходимости лазерного излучения резко снижает опасность поражения чувствительных рецепторов. Близкий к коллимированному по одной координате и расходящийся по другой пучок при фокусировке хрусталиком формирует на сетчатке не круглое пятно, а сильно вытянутый овал (практически отрезок). Площадь этого овала существенно больше площади круглого пятна, полученного при фокусировке коллимированного пучка. Для численных оценок рассмотрим зрачок диаметром D , находящийся на расстоянии Z от плоскости сканирующего устройства. Доля излучения p , которая собирается зрачком, составит

$$p = \frac{D^2}{(d_1 + Z\varphi_1)(d_2 + Z\varphi_2)}, \quad (5)$$

где d_1 и φ_1 – соответственно размер пучка и угловая расходимость в горизонтальной плоскости, а d_2 и φ_2 – в вертикальной. При фокусном расстоянии глаза F размер пятна коллимированного пучка по одной координате примерно $\lambda F/D$, где λ – длина волны излучения. Из-за геометрической вертикальной расходимости изображение точки в вертикальной плоскости будет смещено на расстояние F^2/Z , что приведет к увеличению размера пятна в этом направлении до DF/Z и снижению плотности мощности на сетчатке в $D^2/Z\lambda$ раз. Если пренебречь размером пятна, ослабление интенсивности A при веерной расходимости пучка по сравнению с коллимированным составит

$$A = \frac{\lambda}{(d_1 + Z\varphi_1)\varphi_2}. \quad (6)$$

Так, для стандартных телевизионных камер поле зрения по вертикали составляет 40–50°, а при рас-

ходимости в вертикальной плоскости $\varphi_2 = 0,7$ рад (40°) ослабление воздействия даже непосредственно на выходе сканирующего устройства ($d_1 = 3$ мм, $\lambda = 800$ нм) превышает 2000 раз, а на расстоянии $Z = 1$ м (при $\varphi_1 = 7,5$ мрад) достигает уже 9000. Согласно санитарным нормам и правилам устройства и эксплуатации лазеров [8] при длительности воздействия 20 мс допустимая энергия импульса на длине волны 800 нм составляет 100 мкДж, что соответствует средней мощности излучения 5 мВт. Лазер с веерной расходимостью 0,6 рад и мощностью подсветки 2 Вт даже на выходе сканатора соответствует источнику коллимированного излучения в 1 мВт, что в пять раз меньше безопасной, с точки зрения санитарных норм, мощности.

Особенности конструкции системы и расчет погрешностей

Расчет сканирующего устройства был проведен для гексагонального зеркала, имеющего длину грани 25 мм и высоту 3 мм. Размер пятна излучения подсветки на рабочей грани зеркала составляет 2,5–3 мм в длину и от 0,5 до 1,5 мм в высоту. Использование шагового двигателя, обеспечивающего 400 полушагов на один оборот, приводит к шагу сканирования 1,8°. Смещение шага на 0,6° при переходе от одной грани к другой приводит к тому, что основное поле зрения (60°) при завершении цикла (пол-оборота) оказывается заполненным с шагом 0,6° (100 угловых точек). При этом за одну треть цикла формируется трехмерное изображение сцены с низким угловым разрешением, которое уточняется за счет повышения углового разрешения подсветки в течение двух последующих третей цикла.

В случае использования подсветки и выбора в качестве опорной той камеры, в сторону которой повернут лазерный луч, длина эпиполярной линии заметно уменьшается, поскольку сопряженная точка гарантированно находится в пределах той половины изображения, которая находится ближе к сканирующему устройству. Выбор массива анализируемых точек на опорной камере осуществляется определением центра подсвеченной полосы на каждой горизонтальной линии изображения, который пересчитывается затем в двумерный вектор углов. Аналогичный массив создается и для второй камеры, после чего положение сопряженных точек для каждой точки первого массива определяется интерполяцией полученных результатов с учетом положения соответствующей эпиполярной линии.

Для выбора и тестирования алгоритмов определения положения центра подсвеченной полосы в

условиях присутствия шумов использовалось численное моделирование процесса. Учитывая произвольный характер пространственного спектра фонового освещения, рассматривался наиболее сложный случай доминирования высокочастотных составляющих шума, что позволяло для его моделирования использовать стандартный генератор шумового сигнала. В качестве сигнала рассматривалось излучение с гауссовым угловым профилем, ширина которого варьировалась, при этом учитывались падение интенсивности сигнала с расстоянием, дискретный характер оцифровки и насыщение сигнала в ближней зоне.

Как показало компьютерное моделирование, точность определения положения центра линии подсветки зависит не только от отношения сигнал/шум, но и от эффективности ограничения диапазона обработки сигнала. Любые методы искусственного выбора рабочей области требуют высоких затрат машинного времени, а отсутствие ограничений приводит к существенному росту погрешности измерения. Корректным представляется способ ограничения диапазона обработки сигнала, связанный с использованием функции статистического веса, нелинейно зависящей от уровня сигнала. В численном эксперименте для этого была применена функция

$$P(I) = (1 - \exp(-I/I_0))^M, \quad (7)$$

где I – интенсивность сигнала. Уровень I_0 выбирался таким образом, чтобы величина функции при тройном уровне шумов (флуктуаций фоновой заливки) составляла 0,5 для всех исследованных значений показателя M .

Погрешность измерения определялась по разбросу восстановленных значений дальности, при этом в качестве критерия работоспособности метода выявлялась дальность прецизионной триангуляции, на которой указанная погрешность достигала допустимой величины (3 см). Указанный критерий оказался не только удобным, но и обоснованным, поскольку зависимость точности измерения расстояния от дальности является функцией, резко возрастающей после достижения некоторого порогового значения.

Был проведен сравнительный анализ двух методов определения положения центра линии. Первый, основной, базируется на вычислении математического ожидания функции распределения интенсивности с указанным выше статистическим весом. Второй, альтернативный, использует численное дифференцирование логарифма интенсивности с последующим определением точки пересечения оси абсцисс с помощью метода наименьших квадратов. Оптимизация параметров осуществлялась

для каждого из методов независимо. Оказалось, что альтернативный метод позволяет повысить точность определения дальности только при высоких отношениях сигнала к шуму (более 100), что предполагает возможность его применения в условиях слабой освещенности. При высоком уровне шума основной метод оказывается существенно более надежным. Все графики, приведенные на рис. 5, получены на базе вычисления математического ожидания.

Расчеты показали, что дальность прецизионной триангуляции заметно возрастает с ростом M при малых величинах показателя степени и насыщается при $M = 6-8$ (см. рис. 5) с некоторой тенденцией к спаду при дальнейшем увеличении показателя степени. Проведенные исследования показали также высокую чувствительность метода к угловой ширине линии подсветки. В качестве рабочего параметра было выбрано отношение K эффективной ширины линии подсветки к угловому размеру одного элемента матрицы или, точнее, межэлементного интервала. Из рис. 5 видно, что максимальная дальность прецизионной триангуляции реализуется в том случае, когда лазерное излучение подсвечивает 2–3 элемента матрицы в горизонтальном направлении. При увеличении ширины линии подсветки снижается отношение сигнал/шум из-за падения интенсивности сигнала, а при ее уменьшении увеличивается погрешность определения положения центра линии из-за эффектов дискретизации.

Основная зависимость, представленная на рис. 5, представляет функцию дальности прецизионной

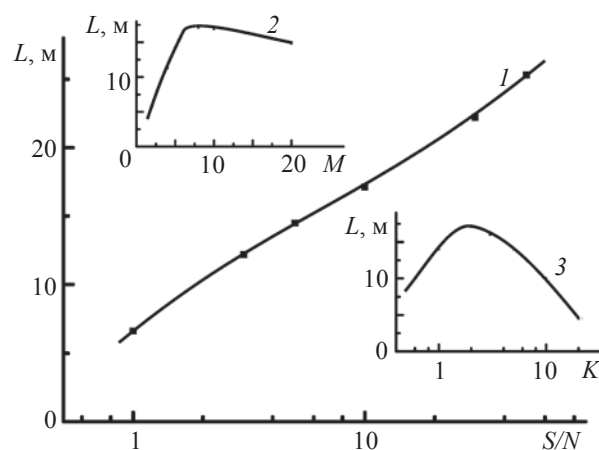


Рис. 5. Дальность прецизионной триангуляции в зависимости от отношения сигнал/шум S/N (1), от показателя степени функции статистического веса M (2) и от отношения эффективной ширины линии подсветки к угловому размеру межэлементного интервала K (3).

триангуляции от отношения сигнал/шум для оптимальных параметров системы. Из приведенного графика можно сделать вывод, что для выполнения требований по дальности функционирования метода необходимо обеспечить двадцатикратное превышение уровня сигнала над шумом. В яркий солнечный день фоновое излучение на расстоянии 20 м примерно на два порядка больше освещенности, создаваемой лазерным источником средней мощностью 2 Вт. Использование спектральной фильтрации позволяет выравнять сигнал с фоном, но для достижения двадцатикратного превышения над шумом при любых условиях освещенности необходимо обеспечить повышение интенсивности за счет использования импульсного режима генерации лазера с синхронизацией экспозиции камер.

Выводы

Предлагаемое в данной работе использование вырожденной структурированной лазерной подсветки позволяет исключить проблему неоднозначности выбора реперной точки для построения расчетного треугольника в методе триангуляционной дальнометрии. Использование веерной расходимости лазерного излучения позволяет осуществлять измерение дальности до нескольких сотен точек одновременно, что снижает остроту проблемы быстрого действия. Кроме того, благодаря веерной расходимости резко снижаются ограничения на допустимую мощность лазерного излучения, что позволяет су-

щественно повысить отношение сигнала к шуму и дальность работы системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Szeliski R., Golland P.* Stereo matching with transparency and matting // *International Journal of Computer Vision*. 1999. V. 32(1). P. 45–61.
2. *Хорн Б.К.П.* Зрение роботов. М.: Мир, 1989. 487 с.
3. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987, 550 с.
4. *Lindenbergh R., Pfeifer N., Rabbani T.* Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring // *Proc. Workshop "Laser scanning 2005"*. Enschede, 2005. P. 24–29.
5. *Bergmann D.* New approach for automatic surface reconstruction with coded light // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2572. P. 2–9.
6. *Hsieh Y.C.* Decoding structured light patterns for three-dimensional imaging systems // *Pattern Recognition*. 2001. V. 4. P. 343–349.
7. *Грязнов Н.А., Егоров Е.В., Кириченко В.В. и др.* Лазерно-триангуляционный метод объемного зрения для решения задач маневрирования и взаимного позиционирования орбитальных объектов сложной конфигурации // *Материалы 4-й конф. "Микротехнологии и новые информационные услуги в авиации и космонавтике"*. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2005. С. 88–98.
8. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 31 июля 1991 г. № 5804–91).