

Многоканальная оптико-электронная система мониторинга и триангуляции крупногабаритных объектов и сооружений

А.А. Лузанов, И.А. Коняхин

Университет ИТМО

Аннотация: при проектировании и эксплуатации современных зданий и инженерных сооружений предъявляются строгие требования к максимально допустимым отклонениям их геометрических параметров. Для контроля этих показателей применяются специализированные приборы, в частности многоканальные оптико-электронные системы мониторинга и триангуляции. В процессе работы таких систем формируются переопределенные системы уравнений, которые из-за влияния шумов и внешних факторов обычно не имеют точного решения. Традиционно эту проблему решают путем исключения «лишних» уравнений до тех пор, пока система не перестанет быть переопределенной. Однако такой подход малоэффективен, так как ведет к потере полезной информации. Использование специальных численных методов позволяет задействовать весь массив данных, что в итоге обеспечивает меньшую погрешность и более стабильные результаты.

Ключевые слова: оптико-электронные комплексы, мониторинг инженерных сооружений, крупногабаритные конструкции, пространственная триангуляция, переопределенные системы уравнений, метод наименьших квадратов, QR-разложение, псевдообратная матрица Мура-Пенроуза,

1. Введение

В условиях деградации материалов, износа конструкций и необходимости обеспечения безопасности и долговечности крупногабаритных объектов и сооружений требуется внедрение систем непрерывного структурного мониторинга. Оптико-электронные методы регистрации пространственных координат играют здесь ведущую роль, позволяя в режиме реального времени отслеживать динамику изменений крупногабаритных элементов. Это позволяет эффективно использовать время и экономические ресурсы, необходимые при эксплуатации и ремонте объектов.

Однако практическое применение таких систем на реальных объектах сталкивается с серьезным барьером - нестабильностью внешней среды. Температурные колебания, ветровые нагрузки и вибрации вызывают смещение камер и контрольных точек, неизбежно искажая данные о смещениях координат объектов. На больших дистанциях эти факторы вносят существенные погрешности в триангуляционные расчеты, что ставит под сомнение достоверность получаемых данных. Эти факторы, кроме того, наслаиваются и на проблему переопределенности системы. Основная математическая сложность здесь возникает из-за того, что данных становится слишком много. Когда количество уравнений превышает число неизвестных координат, система становится переопределенной. В идеальных условиях все расчеты должны сходиться в одной точке, но на практике из-за помех и мелких вибраций каждое уравнение дает свой результат.

Чтобы программа смогла выдать хоть какой-то результат, решение данной проблемы происходит в большинстве случаев через игнорирование и отбрасывание лишних уравнений. Это приводит к потере информации о перемещении объекта и снижению итоговой точности. В результате система может зафиксировать ложную деформацию там, где ее нет, или пропустить реальное повреждение или деформацию.

Поэтому целью работы является повышение точности за счет использования всей избыточной информации от измерительных каналов. Исследование должно показать, можно ли при помощи математической обработки уменьшить количество компонентов системы для снижения её стоимости, при сохранении или даже росте итоговой точности измерений. В том числе предстоит определить, насколько эффективно система сможет подавлять погрешности при текущем составе оборудования без сокращения числа датчиков.

2. Основная часть

Чтобы восстановить положение контрольных точек в пространстве, необходимо выбрать подходящую геометрическую схему измерений. Традиционно рассматривают три основных подхода: прямую стереоскопическую засечку, автоколлимационный метод и обратную пространственную засечку.

Прямая засечка или стереоскопическим метод. Данный метод можно сравнить с бинокулярным зрением, когда объект наблюдается из нескольких известных точек с заранее известными координатами, и положение цели вычисляется на пересечении визирных линий (Рисунок 1). В идеальных условиях искомые координаты находятся в точке пересечения этих визирных лучей. Однако на практике, когда измерения проводятся на больших дистанциях, этот метод становится крайне уязвимым. Любое смещение самих камер из-за вибраций или теплового расширения приводит к тому, что лучи перестают сходиться в одной точке, и точность расчетов резко падает.

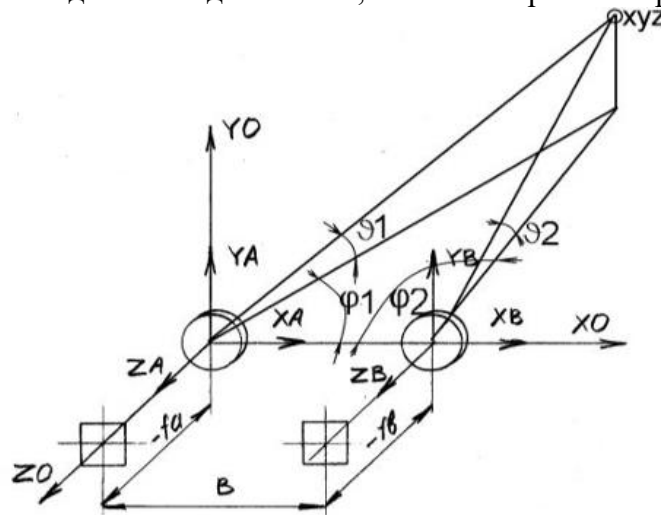


Рисунок 1. Общая схема измерительной системы стереоскопическим методом [1].

Автоколлимационные системы используют принцип анализа отраженного пучка света, возвращающегося от зеркала или иного отражающего элемента, закрепленного на объекте [2]. Если поверхность отражателя расположена строго перпендикулярно оптической оси, луч возвращается по той же траектории, но при малейшем наклоне конструкции отраженный пучок отклоняется (Рисунок 2). Это смещение фиксируется на матрице, позволяя регистрировать микроскопические угловые колебания, что позволяет определить координаты с высокой точностью. Главным же недостатком метода является ограничение его эффективного диапазона работы.

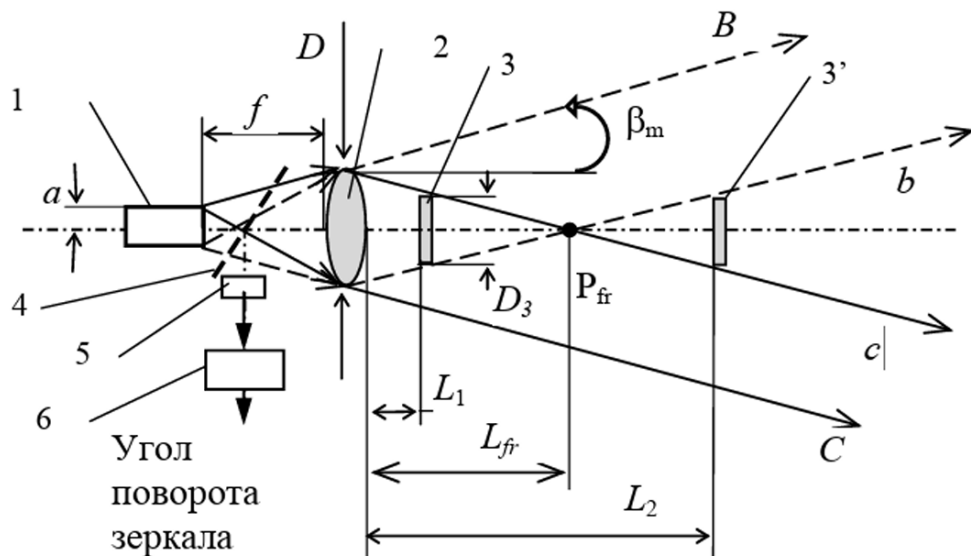


Рисунок 2. Структура автоколлимационной измерительной системы [3].

Метод обратной пространственной засечки по своей сути обратен методу прямой засечки. Если при прямой засечке положение объекта определяется из наблюдений, выполняемым из нескольких точек с известными координатами, а его координаты находятся как результат пересечения линий визирования, то в обратной засечке, метод, наоборот, позволяет вычислить координаты на основе наблюдений за системой опорных маркеров с известными координатами. Прибор сканирует пространство, находит контрольные точки с эталонными координатами маркеров и по углам между ними вычисляет собственное местоположение (Рисунок 3). Данный метод был выбран как основной для анализа и изучения, в связи с тем, что данный метод является достаточно точным и устойчивым к внешним факторам, кроме того исследования ведутся на приборе докового прогибомера, который работает на методе обратной засечки. При математическом описании данного метода положение контролируемой точки определяется системой переопределённых уравнений, решение которой требует применения специальных вычислительных методов обработки избыточных наблюдений.

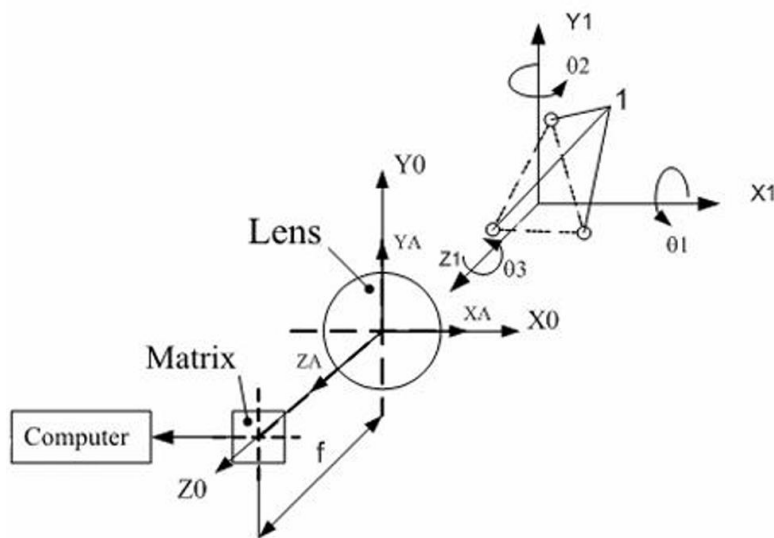


Рисунок 3. Общая схема измерительной системы методом обратной засечки [4].

Метод наименьших квадратов ищет такое решение, при котором суммарная ошибка по всем измерительным каналам становится минимальной. Данный метод часто выступает как базовый способ обработки избыточных наблюдений и позволяет получать усреднённое согласованное решение по всем каналам измерений. QR-разложение основано на преобразовании исходной системы в более устойчивую вычислительную форму, при которой снижается влияние ошибок округления и улучшается численная стабильность. Метод псевдообратной матрицы Мура–Пенроуза представляет собой способ построения «обобщённого обратного» преобразования, которое позволяет напрямую получать решение через исходные данные [5]. Она формируется так, чтобы наилучшим образом согласовать все уравнения системы одновременно, распределяя влияние измерений между собой.

Главная задача состоит в том, чтобы превратить эту информационную избыточность в преимущество. Обоснование эффективного метода решения переопределённых систем позволит либо сократить количество дорогостоящих компонентов системы без потери точности, либо существенно снизить погрешность при текущем составе оборудования.

3. Заключение

В исследовательской работе был проведен анализ методов решения переопределённой системы уравнений, полученных в результате работы оптико-электронной системы мониторинга. В результате проведенного моделирования в программе Mathcad, выявлено значительное улучшение качества определения смещения и координат объекта в случае использования специальных методов для решения переопределённых систем уравнений в отличие от создания квадратной системы, методом выбора лишь части уравнений и отбрасыванием остальных. Рассмотренные метод наименьших квадратов, метод QR-разложения и метод псевдообратной матрицы Мура–Пенроуза показали для трехточечной системы мониторинга и триангуляции погрешность измерений в несколько раз меньше, чем при методе отбрасывания части уравнений. Дальнейший анализ и моделирование системы является перспективным проектом для более эффективной работы оптико-электронных систем мониторинга.

Список литературы

1. Пуга N. Kaliteevskiy, Igor A. Konyakhin Computer modeling of the optic-electronic system for deformation measurement of radio-telescope counter-reflector // Other Conferences. – 2008.
2. И. А. Коняхин, А. А. Моисеева, Хоанг Ван Фонг Оптико-электронный автоколлиматор для двухкоординатных угловых измерений // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 7. – С. 563–570.
3. Ли Женьпу, А. М. Сахариянова Исследование оптико-электронного автоколлиматора для измерения угловых деформаций крупногабаритных конструкций при наличии ограничения рабочего пучка // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nauteh-journal.ru/files/09b14c1f-bab4-49b5-88bb-304d7b83f7cf> (дата обращения: 17.04.2026).
4. S. V. Mikheev, I. A. Konyakhin, O. A. Barsukov Optical-electronic system for real-time position control of roof's supporting structure // Proceedings of SPIE. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX. – 2015. – Vol. 9525. – Art. 952542. – DOI:10.1117/12.2184837.
5. О. Н. Прокуратова, С. А. Неклюдова Метод наименьших квадратов // Наука и современность. – 2014. – № 28.