

УДК 528.482

МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

THE METHOD OF CONTINUOUS CONTROL OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF EXTENDED OBJECTS



Кухта А. В./ Kuhta A.V.

Старший научный сотрудник, руководитель сектора строительного мониторинга НИиППЛ «ПиК» МГСУ/ The senior research assistant, the head of sector of building monitoring NiPPL«PiK»MGSU

e-mail: symon-pik@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению одной из актуальных задач строительного мониторинга – контролю геометрических параметров протяженных объектов. Предлагается путь решения указанной задачи на основе использования современных интеллектуальных систем цифровой видеорегистрации. На примере типовой задачи мониторинга рассмотрены основные особенности метода и приведены результаты предварительных оценок. Результаты оценок и экспериментов с прототипом системы «Видео РИТМ», реализующей предлагаемый метод, показывают, для трассы длиной 50 м достижима чувствительность к смещению мишеней в плоскости, перпендикулярной визирной оси, не хуже 0,5 мм. Отмечены наиболее проблемные моменты реализации метода, обсуждаются пути преодоления возможных затруднений.

Ключевые слова: Протяженный объект, видеоизмерения, мониторинг геометрических параметров.

Abstract. The work is devoted to consideration of one of the important problems of a building monitoring – a control of geometrical parameters of extended objects. The way to solve this problem based on the use of modern intellectual systems for digital video recording is proposed. On the example of a typical problem of monitoring the basic features of the method are considered and results of preliminary estimates are set forth. The results of estimates and experiments with a «Video RHYTHM» system prototype, realizing the proposed method, show that for a line 50 m long sensitivity to displacement of targets in a plane that is perpendicular to the line direction not worse than 0,5 mm is achievable. The most problem points of realization of a method are marked as well as the ways of overcoming of possible difficulties are being discussed.

Keywords: Extended object, video measurements, monitoring of geometrical parameters.

Во многих задачах наблюдений за геометрическими параметрами строительных объектов условия наблюдений характеризуются невозможностью или нецелесообразностью установки средств измерения на таком расстоянии от объекта, которое сравнимо с его линейными

размерами. В данном сообщении объекты, находящиеся в таких условиях наблюдений, будем называть протяженными объектами. С точки зрения условий наблюдения и применительно к этим условиям такими объектами могут быть, например, колонны, балки, плиты перекрытий, фундаментные и

фасадные конструкции, конструкции ограждения котлованов, конструкции высотных и большепролетных сооружений, мостовые конструкции и многие другие. Таким образом, протяженными, с точки зрения условий контроля геометрических параметров, мы будем называть такие объекты, для которых линейные размеры контролируемой зоны много больше расстояний от объекта до измерительных компонент системы контроля.

В настоящее время подобный контроль осуществляется, главным образом, традиционными геодезическими методами, например, методом бокового нивелирования. Применение традиционных геодезических методов ограничено проведением отдельных циклов измерений, характеризуется относительно невысокой стоимостью оборудования, но, при этом, высокой стоимостью соответствующих работ. Геодезические GPS системы и роботизированные тахеометры могут работать в режиме высокого временного разрешения, достаточного для большинства практически важных задач, однако, стоимость необходимого оборудования значительно выше стоимости традиционного геодезического оборудования. В ряде случаев используются специально разработанные системы наблюдения. Так например, в работах [1], [2] и [3] приводится описание действующей автоматизированной системы инструментального мониторинга колебаний вершины Главного монумента на Поклонной горе в г.Москве, разработка которой выполнена в ГСПИ.

Постановка задачи и основные особенности метода

Рассмотрим задачу мониторинга геометрических параметров условного протяженного строительного объекта. Пусть в ходе наблюдений необходимо регистрировать смещения в направлениях X и Y маркированных точек объекта, расположенных вдоль оси Z на трассе измерений. Примем, для определенности, следующие технические условия на предполагаемую систему измерений:

- количество маркированных точек не менее 10;
- расстояние по Z между крайними маркированными точками на трассе не менее 50 м;
- исходное расстояние маркированных точек от оси Z в момент начала наблюдения задается, исходя из параметров измерительной системы;
- маркировка точек объекта производится путем неподвижного закрепления на объекте соответствующих пассивных или активных марок;
- размеры и устройство марок определяются исходя из параметров измерительной системы;
- допускается установка на объекте пассивных или активных марок, имеющих автономное питание, и периодом обслуживания не чаще 1 раза в год;
- устройство регистрации должно располагаться вне трассы измерений на расстоянии не более 10 м от ближайшей маркированной точки на трассе измерений;
- система должна обладать устойчивостью по отношению к климатическим условиям и условиям освещения;
- измерительная система должна обеспечивать пространственное разрешение по X и Y не хуже 1 мм для любой маркированной точки;
- должны регистрироваться смещения в диапазоне ± 25 мм от исходного положения любой маркированной точки;
- измерения проводятся циклами через промежутки времени от 10 мин до 1 часа при длительности цикла измерений не более 1 мин (статические измерения);
- измерения проводятся с частотой не менее 40 Гц (динамические измерения).
- зависимость смещения выбранных маркированных точек от времени для заданного промежутка времени;
- зависимость смещения маркированных точек от Z для выбранного момента или для выбранных моментов в заданном промежутке времени;

- амплитудные, частотные и фазовые характеристики смещения маркированных точек (для динамических измерений).

Предлагаемый метод непрерывного контроля геометрических параметров

протяженных объектов основан на использовании системы видеорегистрации с цифровым матричным приемником излучения.

Основные черты метода иллюстрирует рис.1.

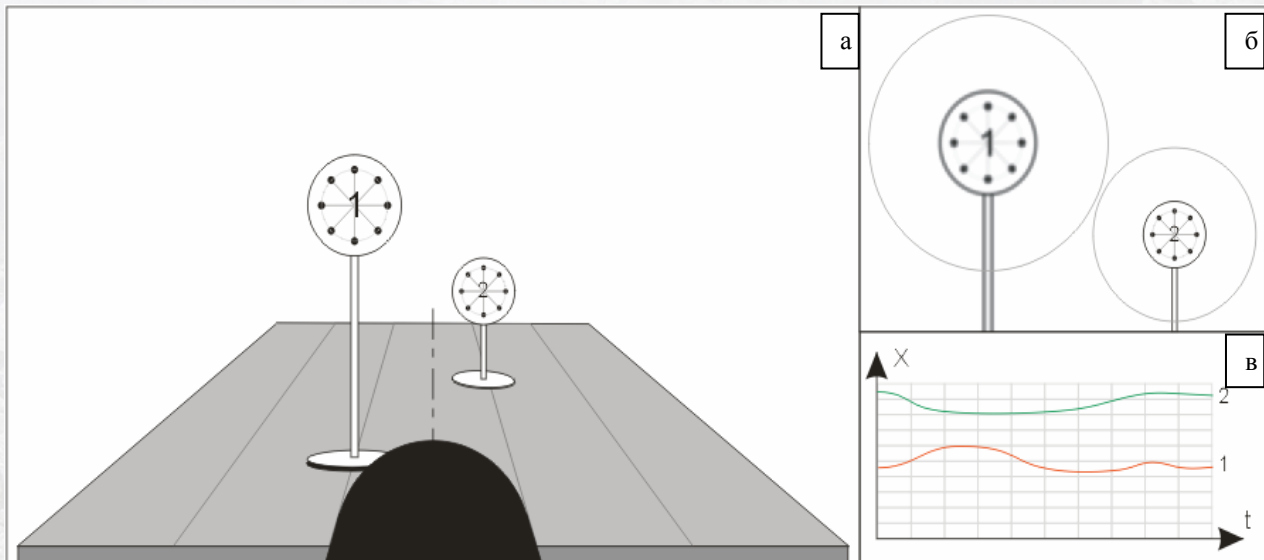


Рис. 1

На рис.1а условно показаны две мишени, закрепленные на объекте, и устройство видеорегистрации. На рис.1б, также условно, показаны изображения мишеней на матрице видеорегистратора. Сплошными окружностями помечены области, в которых находятся изображения мишеней при заданном диапазоне смещений мишеней на объекте. Рис.1в показывает один из возможных вариантов визуализации результатов измерений. Основной особенностью предлагаемого метода является одновременное наблюдение с помощью видеорегистратора двух и более мишеней, расположенных на трассе измерений на различных расстояниях от видеорегистратора. Использование в видеорегистраторе матричного приемника излучения дает возможность точного определения координат x' и y' наблюдаемых мишеней в пространстве изображений, причем стабильность привязки этих координат к системе координат видеорегистратора при определенных условиях может быть исключительно высокой. Определение координат x' и y'

существенно упрощается, а его точность увеличивается при таком расположении мишеней на трассе измерений, при котором их изображения не перекрываются. Диапазон регистрируемых смещений определяется размерами изображений мишеней и размерами кадра, а также способом расположения изображений мишеней в кадре, при котором они не перекрываются при смещении мишеней. Одновременное нахождение изображений мишеней на матрице видеорегистратора делает возможным наблюдение их взаимного смещения с высоким временным разрешением.

Мишени для реализации метода могут быть как пассивными, так и активными. Представляет интерес использование мишеней с импульсной ИК подсветкой [4], или точечных активных мишеней. Использование активных мишеней, например, мишеней с экономичными и малоразмерными полупроводниковыми излучателями даст возможность существенно снизить требования к параметрам используемой

оптики и делает возможным круглосуточное проведение измерений. Значительно проще, в этом случае, решается также задача идентификации мишеней, например, с использованием кодовой модуляции излучения. Мишени могут содержать масштабный элемент с точно известными геометрическими параметрами, позволяющий определять величину смещения в пространстве предметов по величине смещения в пространстве изображений.

Выполнение приведенных выше технических условий является весьма непростой задачей. Обеспечение высокой чувствительности для всех контролируемых на трассе точек, а также реализация непрерывного наблюдения за объектом требует оптимального построения всей измерительной системы, которая должна включать в себя:

- специально разработанные мишени, конструкция которых дает возможность надежно регистрировать их положения цифровым видео устройством;
- цифровое видео устройство, имеющее оптимально подобранные

характеристики оптической системы и матричного приемника излучения, и обеспечивающее одновременное наблюдение изображений требуемого числа мишеней, находящихся в створе измерений;

- программно-аппаратные средства получения цифрового изображения требуемого качества, а также анализа этого изображения с целью определения смещения мишеней с заданным временным и пространственным разрешением;
- программные средства постобработки информации, обеспечивающие углубленную обработку, визуализацию и оценку полученной информации.

Предварительные оценки

Выполним некоторые оценки параметров системы, построенной на указанных выше принципах. В качестве примера, рассмотрим простейшую оптическую схему, изображенную на рис.2, и мишени в виде точечных источников излучения.

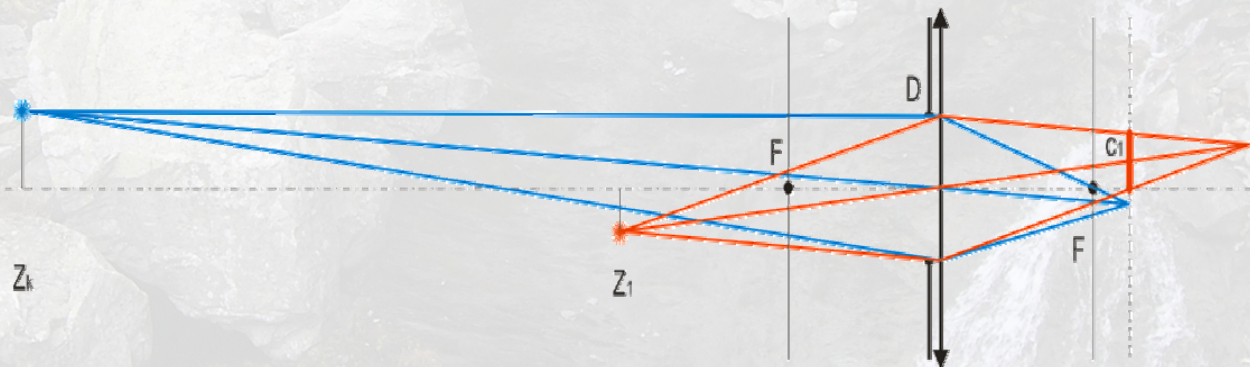


Рис. 2. Оптическая схема, принятая для оценочных расчетов. Здесь: F – фокусное расстояние, D – диаметр диафрагмы, Z_1 и Z_k расстояние до ближней и дальней мишени, соответственно, c_1 – диаметр круга нерезкости для ближней мишени.

Сфокусированное изображение точечного источника излучения в случае идеальной оптики имеет распределение яркости, описываемое функцией Эри. Диаметр диска Эри определяется дифракционными явлениями, при этом, для оценки диаметра диска Эри можно использовать выражение $da = 1,22 * \lambda * F/D$.

Изображение точечного объекта в зоне нерезкости, называемое в теории и практике фотографии «боке», зависит от параметров оптической системы. Большое влияние на вид боке оказывают aberrации используемой оптики, форма диафрагмы и т.д. Для определенности будем предполагать, что реализованная система

имеет боке, характерное для качественных фото объективов, а именно – круглое пятно с постоянной яркостью внутри круга и плавным размытием на его границе. Минимальная ширина зоны размытия определяется дифракцией. При проектировании реальной системы следует иметь в виду, что боке реального объектива может иметь иной вид, а также что вид боке для ближней и дальней зоны нерезкости может существенно отличаться.

В табл.1 и на рис. 3а, 3б и 3в приведены результаты оценочного расчета в предположении фокусировки оптической системы на дальней точечной мишени.

Рис.4 показывает возможное расположение кругов смещения изображений мишеней на матрице видеорегистратора. Для мишеней 1 и 10 показаны также негативные изображения мишеней. Размеры кругов смещения соответствуют исходным данным табл.1. Круги располагаются в рамке с соотношением сторон 3:4.

При таком расположении кругов смещения матрицы 1200 на 1600 пикселей (~2 Мп) оказывается достаточно для регистрации смещения мишеней на расстоянии ± 25 мм от исходного положения.

Таблица 1.

| Исходные данные | | |
|--|------------------------------|-----------|
| Фокусное расстояние | F | 110 мм |
| Диаметр диафрагмы | D | 5 мм |
| Расстояние до точки фокусировки | Z_f | 50 м |
| Расстояние до дальней точечной мишени | Z_k | 50 м |
| Расстояние до ближней точечной мишени | Z_1 | 5 м |
| Диаметр круга смещений мишеней | D_{max} | 50 мм |
| Длина волны | λ | 900 нм |
| Результаты расчета | | |
| Масштаб | $M=F/Z_f$ | 0,0022 |
| Диафрагменное число | $N=F/D$ | 22,00 |
| Сфокусированное изображение | | |
| Смещение | $sf=F/Z_f$ | 2 мкм/мм |
| Диаметр диска Эри (Airy) | $da=1,22*\lambda*F/D$ | 24 мкм |
| Дальняя точка в пространстве изображений | | |
| Смещение | $sk=F/Z_k$ | 2 мкм/мм |
| Диаметр круга нерезкости | $ck=F*D*(Z_f-Z_k)/(Z_f*Z_k)$ | 0 мкм |
| Дифракционное размытие (оценка) | $da=1,22*\lambda*F/D$ | 24 мкм |
| Суммарный диаметр изображения (оценка) | $dk=ck+da$ | 24 мкм |
| Относительное смещение | $s`k=sk/dk$ | 9 %/мм |
| Диаметр круга смещений изображения | $dmax=Dmax*F/Z_k$ | 110 мкм |
| Ближняя точка в пространстве изображений | | |
| Смещение | $s1=F/Z_1$ | 22 мкм/мм |
| Диаметр круга нерезкости | $c1=F*D*(Z_f-Z_1)/(Z_f*Z_1)$ | 99 мкм |
| Дифракционное размытие (оценка) | $da=1,22*\lambda*F/D$ | 24 мкм |
| Суммарный диаметр изображения (оценка) | $d1=c1+da$ | 123 мкм |
| Относительное смещение | $s`k=sk/dk$ | 18 %/мм |
| Диаметр круга смещений изображения | $dmax=Dmax*F/Z_1$ | 1100 мкм |

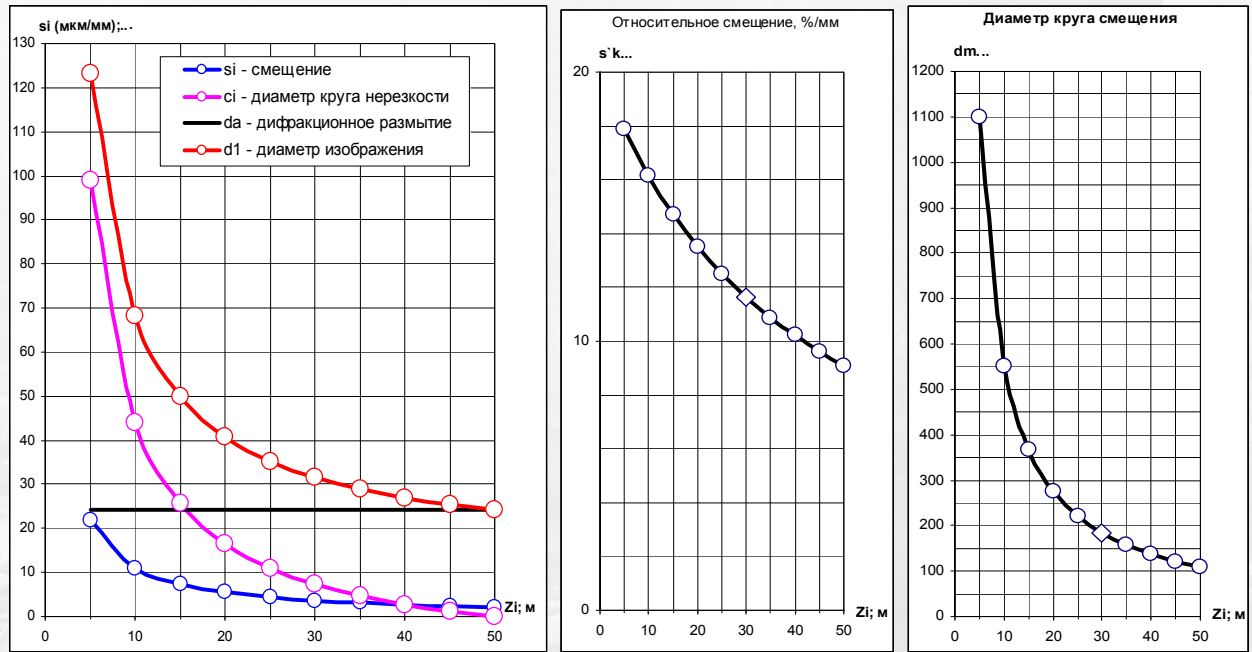


Рис.3. Зависимость параметров измерительной системы от расстояния до мишени

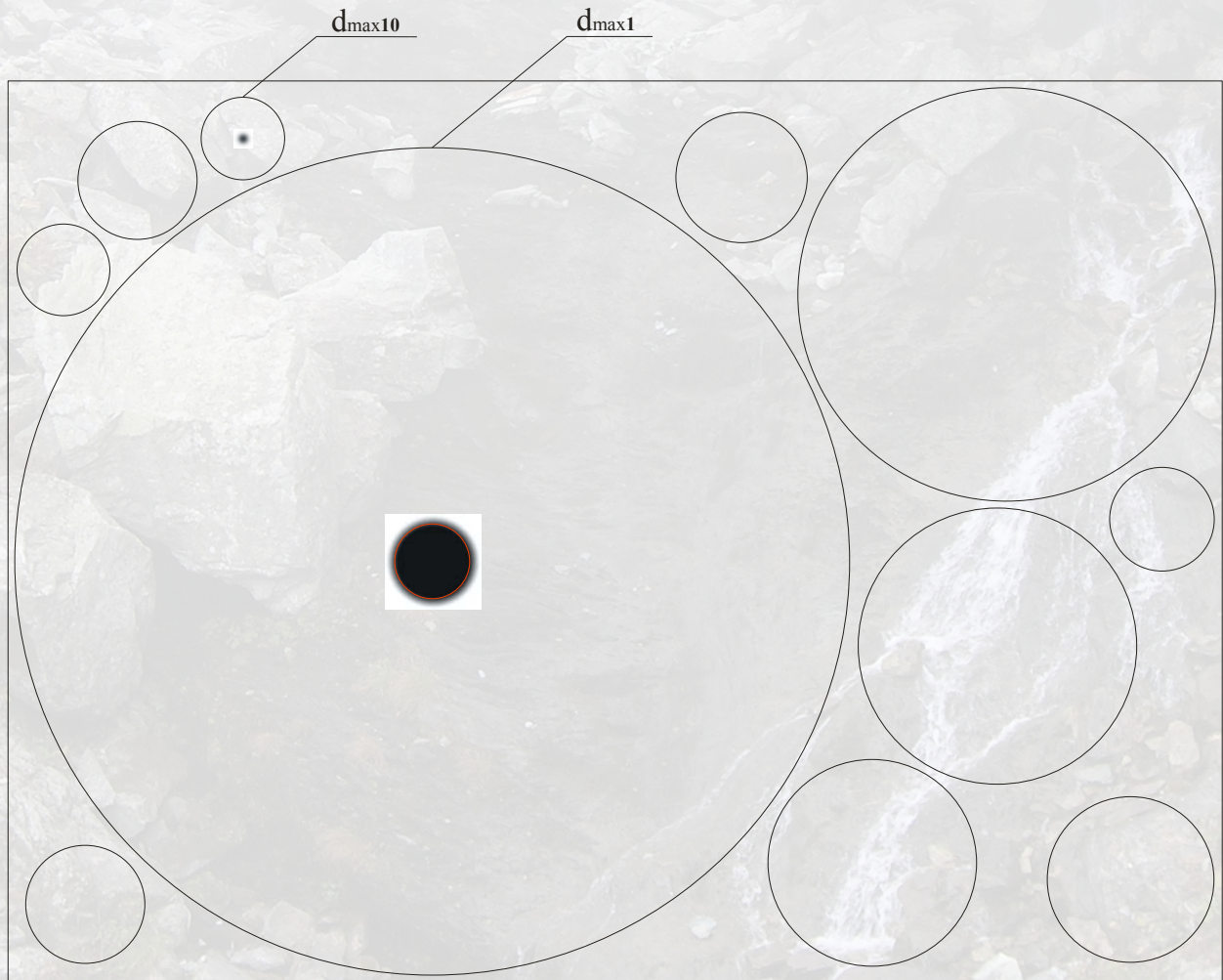


Рис.4. Расположение кругов смещения изображений мишеней, расположенных на расстояниях 5,10,15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 м, на матрице видеорегистратора

Обсуждение, выводы и рекомендации

Минимальные смещения, которые могут быть зарегистрированы системой с указанными параметрами, зависят, в первую очередь, от качества матрицы видеорегистратора и эффективности алгоритмов обработки изображений. Есть веские основания считать, что для рассматриваемого набора параметров не составит проблемы надежная регистрация смещения изображения на матрице видеорегистратора менее 1 мкм. В этом случае могут быть зарегистрированы смещения любой из мишеней на 0,5 мм и меньше. Следует отметить, что существующие программно-аппаратные средства способны обеспечить определение координат объекта с существенно более высоким субпиксельным разрешением, в том числе, в случае нерезких изображений [5], [6], [7].

Приведенная оценка отражает далеко не все параметры системы. Помимо чувствительности и динамического диапазона измерительной системы, важными характеристиками является достижимая точность измерений, устойчивость к помехам, быстродействие и другие. Что касается точности измерений, то одной из причин, которая может негативно влиять на этот параметр, является дисторсия, приводящая к тому, что масштаб изображения оказывается разным для разных участков кадра. Средствами, которые могут минимизировать влияние дисторсии, являются уменьшение размера круга смещения для близких мишеней по отношению к размеру кадра, а также использование мишеней со встроенным масштабным объектом, позволяющим оценить масштабный коэффициент независимо от положения изображения мишени в кадре видеорегистратора.

Серьезной помехой при проведении наблюдений в условиях реального строительного объекта может стать смещение видеорегистратора в процессе измерений, при этом обеспечение стабильности положения видеорегистратора может быть или трудновыполнимым, или экономически нецелесообразным. В этом

случае, следует дополнять систему мишеней опорными марками и/или применять для обработки результатов измерений подходы, используемые, например, в методе безопорных геодезических наблюдений (БГИ) [8]. Другим дестабилизирующим фактором является рефракция, обусловленная флуктуациями показателя преломления на трассе измерений. Здесь следует отметить, что рефракция осложняет любые высокоточные измерения, связанные с распространением электромагнитного излучения радио и оптического диапазонов в атмосфере, в том числе измерения с помощью современных высокоточных геодезических приборов. Разработке методов уменьшения негативного влияния рефракции посвящено большое число работ российских и зарубежных авторов (см. например, [9]). Рассмотрение влияния рефракции на измерения описанным выше методом и обсуждение возможностей уменьшения этого негативного влияния выходят за рамки данной работы, и будут приведены в последующих публикациях.

Проводимая в настоящее время разработка приборного комплекса «Видео-РИТМ», использующего предлагаемый метод, требует решения многофакторной задачи оптимизации параметров программно-аппаратных компонентов системы. Приведенные выше оценки, а также результаты предварительных экспериментов с прототипом комплекса «Видео-РИТМ-1» убеждают в том, что теоретическая и экспериментальная проработка предлагаемого метода сделает возможным как периодическое, так и непрерывное высокоточное наблюдение за геометрическими параметрами протяженных объектов относительно простыми и доступными средствами. Рассмотренный метод, в случае его практической реализации, может найти применение для решения широкого круга задач строительного мониторинга.

Благодарности

Приношу свою искреннюю благодарность д.т.н., профессору Якушенкову Ю.Г. за проявленный интерес

и полезное обсуждение, к.т.н., профессору Ранову И.И. за детальный разбор работы и конструктивные замечания, к.т.н. Брагину А.А. за предоставление полезной информации, а также аспиранту кафедры «Инженерная геодезия» МГСУ Савину М.С. за разностороннюю помощь в работе.

Литература

1. Буюкян С.П., Рязанцев Г.Е. «Инструментальный мониторинг объектов на основе видеоизмерений». Журнал «НПК ВИДЕОСКАН».
2. Остроумов Б. В., Патрикеев А. В., Гусев М. А. «Контроль за состоянием несущих конструкций Главного монумента памятника Победы на Поклонной горе». Промышленное и гражданское строительство. - 2004. - N 5. - С. . 19-21. - Библиогр.: с. 21 (5 назв.)
3. Буюкян С.П. «Видеоизмерительные системы», монография, 2008 г., 73 с., 1 табл., 43 рис., библиография – 90 названий.
4. В.П. Майоров, М.С. Семин, Функционально-законченное семейство устройств ВИДЕОТРАССА - основа для создания измерительных комплексов. Доклад на VII научно-технической конференции РАРАН "Проектирование систем и измерительных комплексов". Нижний Тагил 2010г.
5. Королев А.Н., Гарцуев А.И. "Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице", Измерительная техника, май, 2004, №5, стр.20-22.
6. Трегуб В.П. (ОАО «ЛОМО», доцент каф. ОЦСиК), Полищук Г.С. (ОАО «ЛОМО») и др. «Метрологические исследования и выбор формы оптической марки в цифровых измерительных системах». XI научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО, 04.02.2011 г.
7. Брагин А.А. «Исследование способов определения координат центра изображения точечного источника излучения». Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2009 г, № 5, стр.73.
8. Кухта А.В. "Метод безопорных геодезических наблюдений". [Электронный документ] // Предотвращение аварий зданий и сооружений. - 2011. (<http://pamag.ru/prensa/bgi-method>)
9. Дементьев В.Е. «Рефракция и миражи», ISBN -978-5-8291-0997-4, 2009 г., опубликовано при поддержке Библиотеки Академии Наук (СПб).

© Кухта А.В., 2011