

**OPTIMAL DESIGN AND THICKENING ENGINEERING
GNSS-NETWORK**

The methodology of optimization of GNSS networks configuration of with the consideration of the measurement scheme and the mean squared error of coordinates determination was developed. The proposed methodology is based on the algorithm of distorted vectors removal to achieve the required accuracy of the GNSS network. This methodology was tested on a model GNSS network with 14 points in which all the vectors were measured. As a result of the optimization, 55% of the vectors were removed from the initial scheme of the GNSS network and the optimal positions of the selected points were found to maintain the value of the mean square error of coordinate determination at 2 mm. That is, the use of the proposed methodology has improved the mean square error of coordinates determination and reduced the cost of measuring. It is established that the given methodology can be applied for optimization of GNSS networks with different geometric shapes and measurement schemes. It is known that the removal of vectors leads to a reduction in the time of observation, and as a consequence of a reduction in the cost of work, which is positive, and sometimes a decisive factor. However, removing vectors reduces the number of redundant measurements on the network, which adversely affects the network's hardness, and reliability also varies. Therefore, research in this direction will continue.

Keywords: optimization, configuration, GNSS network, measurement scheme, determinants of covariance matrix.

Надійшла до редакції

21.03.2018

УДК 528.48

*Ю.В. Медведский, канд. техн. наук., ас. кафедры инженерной геодезии
Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЫСОТНЫХ
СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕМЕТРИЧЕСКИХ
ЦИФРОВЫХ КАМЕР**

В работе рассмотрен подход к решению задачи геодезического мониторинга с использованием системы неметрических камер. Предложена технология выполнения работ, позволяющая определить изменение геометрических параметров сооружения под воздействием внешних факторов и прогнозировать их на заданный момент времени. В основу положен принцип относительных измерений, реализованный через нахождение смещения между парами снимков от неметрических камер. Смещение пары изображений предложено определять с помощью алгоритма фазовой корреляции, который обеспечивает высокую скорость решения и надежность получаемых

© Ю.В. Медведский, 2018

результатов. Подготовлен экспериментальный стенд и произведена серия измерений, имитирующих работу одного элемента оптической системы. Реализовано программное обеспечение по обработке серии изображений в среде программирования Matlab с использованием алгоритма фазовой корреляции. Выполнен анализ результатов эксперимента, который позволяет сделать вывод о возможности успешной реализации описанного метода с соблюдением требований к точности выполнения работ данного вида.

Ключевые слова: *геодезический мониторинг, мониторинг сооружений, методы мониторинга, мониторинг высотных сооружений, видеоизмерительные методы, неметрические камеры.*

Вступление. На фоне развития технологий производства материалов, автоматизации процессов строительства и роста стоимости земли в центральных районах крупных городов наблюдается тенденция возведения сооружений сложных геометрических форм и большой высотности. Это, во-первых, усложняет работы по обеспечению геодезического мониторинга вследствие создания специфической формы геодезического обоснования, применения различных видов геодезического оборудования на различных этапах его возведения, а во-вторых требует высокой частоты наблюдений вследствие обретения сооружением динамических свойств. Влияние таких внешних факторов, как ветровая нагрузка и солнечная радиация, приводят к колебаниям и кручениям сооружений, которые меняют свое значение в течении суток и могут вызывать смещение в десятки сантиметров [1]. Наиболее популярные системы геодезического мониторинга [2–5] подразумевают использование большого количества геодезического оборудования в комплексе с программным обеспечением, являются дорогостоящими системами, вследствие чего применяются при возведении уникальных объектов. В последнее время набирает популярность метод лазерного сканирования [6], но он имеет ограничение по высоте сооружения и возможной скорости получения мониторинговых значений. Недавно в России была опубликована докторская работа С. П. Буюкяна [7], в которой рассмотрено применение видеоизмерительной системы на основе неметрической видеокамеры для выполнения задачи геодезического мониторинга. Такой подход способен обеспечить получение данных с высокой частотой дискретизации при существенном упрощении самого процесса выполнения измерений. В силу малой освещенности данного подхода в отечественной и зарубежной литературе, а также наличия большого потенциала его применения возникла необходимость рассмотреть возможности решения задачи геодезического мониторинга высотных сооружений с применением неметрических камер.

Анализ исследований и публикаций. Разработка методик использования неметрических камер в задаче геодезического мониторинга на территории стран СНГ посвящены работы С.П. Буюкяна. После первой публикации на эту тему в 2002 году [8], докладов на конференциях и семинарах в 2016 году была оформлена диссертационная работа на эту тему [7]. В работе рассмотрена методика геодезического мониторинга при использовании видеоизмерительной

системы и применения метода видеоизмерений, который основан на преобразовании стандартного телевизионного видеосигнала из аналогового в цифровой вид с выделением координат контурных точек изображения наблюдаемого объекта в видеокадре. При построном анализе видеопотока происходит определение центра контрольной марки, из разницы между циклами определяют её плановое смещение. Несмотря на достаточно подробное описание как метода, так и методик его применения для различного вида объектов строительства, вопрос применения в высотном строительстве, включая этапы возведения и эксплуатации, решен недостаточно полно. Задача расчета СКП определения смещения визирной цели решена неоднозначно, так как при описанных в работе технических характеристиках системы и рабочих расстояниях размер одного пикселя на изображении на порядок превышает заявленную СКП метода.

Вопросу использования неметрических камер в обеспечении геодезических работ отведено место в методике, разработанной ООО «Тектоплан» [9] при участии докторов и кандидатов наук из ОАО «ГСПИ», ФГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и МИИГАиК. Авторы методики представили описание видеогидростатичной системы, позволяющей определять наклон фундамента и неравномерность осадки. Такая система представляет собой систему уровней, расположенных на фундаменте сооружения с закрепленными на нем датчиками с камерой, получающей отраженное изображение системы светодиодов от поверхности жидкости. Смещения каждой характерной точки фундамента определяется через разность между первым и последующим изображением отражения жидкости, которое изменяется при изменении угла наклона. В силу использования жидкости в конструкции датчиков системы её применение ограничивается фундаментной частью сооружения.

В диссертационной работе Ю.Н. Раскаткина [10] рассмотрен метод определения крена сооружений башенного типа с использованием метода линейно-угловой засечки и затронут вопрос о возможности решения данной задачи путем обработки фотоизображений. Проведенные исследования показали, что метод обработки фотоизображений может с успехом применяться для определения смещений опорных узлов ферм на оголовках колонн. Он даёт практически те же самые результаты, что и полученные обычными способами, при этом отличается высокой производительностью и обеспечивает надежную безопасность работ.

В зарубежных источниках упоминания о использовании неметрических камер в строительстве сводятся к использованию датчиков неразрушаемого контроля для конструктивных элементов сооружения [2; 5].

Постановка задания. Целью работы является теоретическое обоснование возможности применения неметрической камеры для решения задачи геодезического мониторинга высотного сооружения и предварительное исследование точности элемента оптической мониторинговой системы на имитационном стенде.

Изложение основного материала. Геодезический мониторинг представляет собой комплекс мер по определению изменения геометрических

параметров и построения прогнозной модели состояний возводимого сооружения с точностью, позволяющей обеспечить его строительство и эксплуатацию.

Основными геометрическими параметрами, которые необходимо определять при мониторинге высотных сооружений, являются осадка, крен, прогиб и кручение (рис.1).

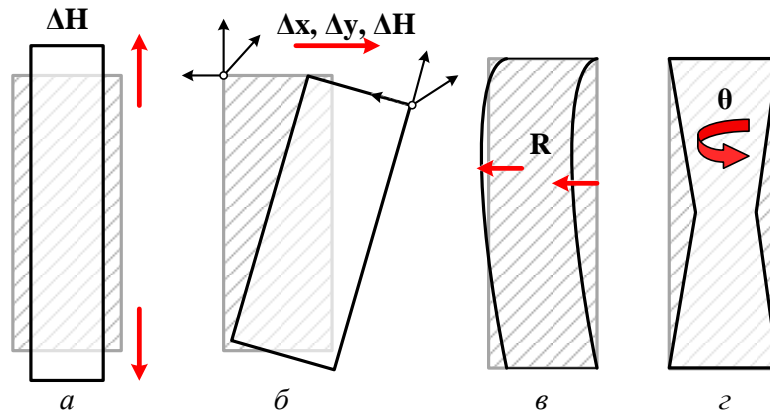


Рис.1. Деформации высотных зданий:
а – осадка; б – крен; в – прогиб; г – кручение

Определять эти параметры предложено через нахождение относительного смещения контрольных точек, расположенных по всей длине сооружения. Использование относительных измерений позволит не накапливать ошибки исходных данных и предыдущих этажей, что в свою очередь повысит результирующую точность определения значений параметров мониторинга.

Технология решения задачи геодезического мониторинга с использованием неметрических камер состоит из нескольких этапов:

1. Проектирование мест фиксации элементов оптической системы (ЭОС) мониторинга. На этом этапе определяют расстояния между ЭОС, исходя из их технических возможностей и геометрических параметров сооружения.

2. Определение относительного смещения между ЭОС. Используя алгоритм фазовой корреляции, определяют взаимный пространственный сдвиг между ЭОС.

3. Определение значений параметров мониторинга. Зная относительные смещения всех ЭОС, строят фактическую каркасную модель сооружения, которая сравнивается с проектной моделью возводимого сооружения.

4. Построение прогнозной модели. На основе фактической модели сооружения, природы ее изменения (значений параметров мониторинга) и динамических характеристик строят прогнозную модель сооружения на заданный момент времени. На основании полученных материалов моделируют пространственное положение монтажного горизонта на время выполнения геодезических разбивочных работ и дают оценку состояния сооружения в целом.

В статье будут подробнее рассмотрены особенности реализации первых двух этапов описанной методики и приведены результаты экспериментальных измерений элемента оптической системы.

1. Этап проектирования мест фиксации (ЭОС) мониторинга

Закрепление ЭОС предложено выполнить вдоль двух взаимно перпендикулярных плоскостей сооружения и его центральной оси, такая

конфігурація дозволит на етапі аналізу даних відділити ефект кручення від прогиба і крена (рис.2). Для спостереження за осадкою нижні датчики направляють на марки, закріплені на ряді стоячих спорудженнях. Група з трьох датчиків буде формувати площину, а зміна їх положення визначає її нахил і зсув.

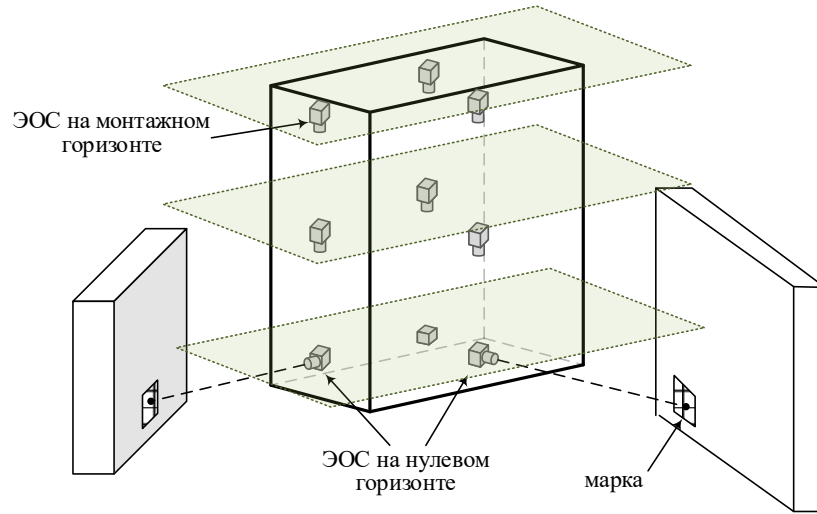


Рис.2. Схематическе представлення місць кріплення ЕОС

Для визначення оптимального значення відстані між датчиками ізначально необхідно виходити з технічних характеристик оптичної системи. Розглянемо класический варіант отримання зображення на матриці камери (рис.3)

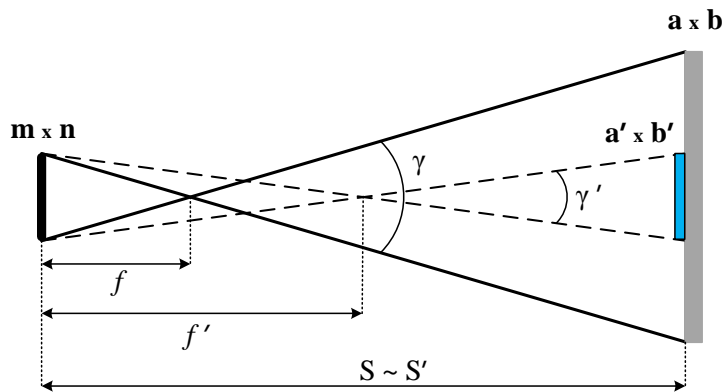


Рис.3. Схема оптичної системи

В упрощеному вигляді видима область місцевості розміром $a \times b$ формуються на матриці розміром $m \times n$, проходячи через точку фокуса. Розмір видимої області напряму залежить від кута поля зору об'єктива камери γ і фокусного відстані f і описується математическою залежністю:

$$\gamma = 114,6 \cdot \arctg(21,622 / (k \cdot f)), \quad (1)$$

де k – значення кропн фактора оптичної системи камери, f – значення фокусного відстані (мм).

Використання такого параметра в роботі з координатною системою знімка, який має прямокульну форму внаслідок стандартної

компоновки матрицы современных цифровых камер, будет некорректным. В результате будет искривлена геометрия изначально квадратного пикселя либо измениться его размер в случае применения усредненного значения разрешения матрицы. Нам необходимо перейти от угла поля зрения камеры к углу видимой области вдоль стороны снимка φ :

$$\varphi_a = \arctg(a/S), \quad \varphi_b = \arctg\left(\frac{b}{S}\right), \quad (2)$$

где a – размер видимой области изображения по оси a ; b – размер видимой области изображения по оси b ; S – расстояние от камеры до объекта съемки.

Используя такой подход, мы сохраним однозначность определения разрешающей способности камеры, которую обозначим через величину c и представим её в таком виде:

$$c = a/n = b/m, \quad (3)$$

где n и m – размеры матрицы камеры.

В подтверждение данных рассуждений проведено определение разрешающей способности камеры, используя формулы (1) и (2), необходимые параметры были получены из технических характеристик камеры и путем фотографирования калибровочного стенда с фиксированного расстояния. Результаты для камеры с $f = 420\text{мм}$, $k = 5,62$, расстояние до стенда $S = 1\text{ м}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение подхода к определению разрешающей способности

Параметр	° ' "	Расстояние S, м	мм местности	пиксели матрицы	мм\пикс.
γ	5°52'24,86"	1	100	3240	0,032
		1	100	4320	0,024
		1	100	3780	0,027
φ_a	6°06'26,7"	1	80	3240	0,025
φ_b	4°34'26,1"	1	110	4320	0,025

Как и следовало ожидать, размер пикселя (разрешающая способность) при использовании угла γ по каждой из осей снимка принял различное значение, усредненное значение разрешение камеры увеличило размер пикселя.

Касаясь вопроса конструктивной особенности ЭОС, стоит обратить внимание на объединение камеры и марки, которая выполняет роль цели (рис.4).

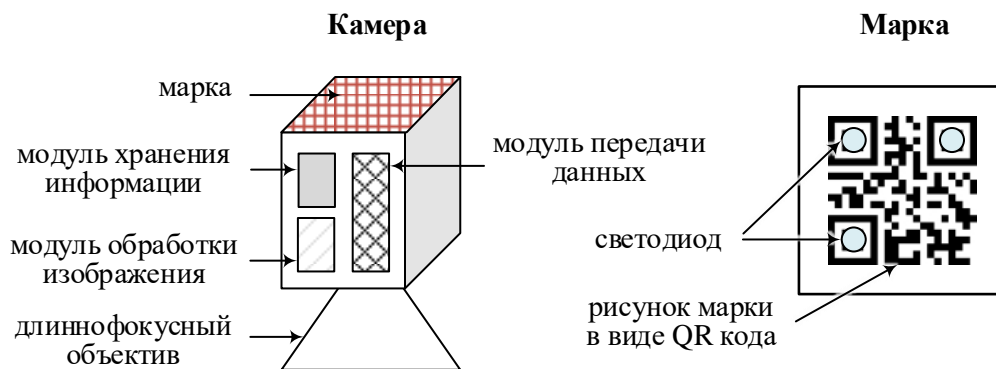


Рис.4. Конструкция ЭОС

Таким образом, камера помимо стандартных модулей должна содержать модуль для передачи данных, который позволит оперативно получить информацию в виде изображения цели со всех датчиков в короткий промежуток времени. Марку предложено выполнить с нанесением рисунка в виде QR-кода с монтажом светодиодов, это позволит заложить в нее необходимую информацию, например, имя и т.п., а также повысит её видимость в плохих погодных условиях

2. Этап определения относительно смещения между ЭОС

При возникновении в сооружении кренов, прогибов или кручений каждый ЭОС получит плановое и высотное смещение (рис.5). Определение смещения ЭОС в плане предложено выполнить с использованием алгоритма сравнения изображений, основанного на методе фазовой корреляции [11].

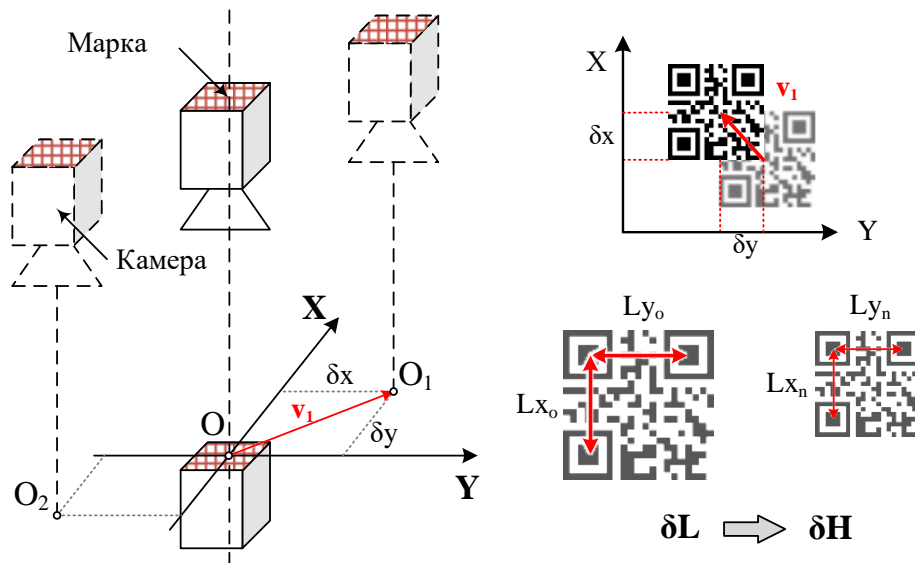


Рис.5. Схематическое определение смещения

Рассматривая пару изображений, одно из них примем за исходное и обозначим как А, второе - за искомое В.

Пусть $f_A(x, y)$ и $f_B(x, y)$ - изображения, одно из которых сдвинуто на (x_0, y_0) относительно другого, а $F_A(u, v)$ и $F_B(u, v)$ – их преобразования Фурье, тогда:

$$f_A(x, y) = f_B(x - x_0, y - y_0); \tag{4}$$

$$F_A(u, v) = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} F_B(u, v); \tag{5}$$

$$R = \frac{F_B(u, v) F_A^*(u, v)}{|F_B(u, v) F_A(u, v)|}, \tag{6}$$

где R – кросс-спектр, F_A^* – комплексно сопряженное F .

Вычисляя обратное преобразование Фурье кросс-спектра, получим импульс-функцию:

$$F^{-1}(R) = \delta(x - x_0, y - y_0). \tag{7}$$

Найдя максимум этой функции, определим искомое смещение. Теперь найдём угол вращения θ_0 при наличии смещения (x_0, y_0) , используя полярные координаты:

$$f_A(x, y) = f_B(x \cos \theta_0 - y \sin \theta_0 - x_0, x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 - y_0); \tag{8}$$

$$F_A(u, v) = e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)}F_B(ucos\theta_0 - vsin\theta_0, usin\theta_0 + vcos\theta_0); \quad (9)$$

$$|F_A(\rho, \theta)| = |F_B(\rho, \theta - \theta_0)|. \quad (10)$$

Применяя этот алгоритм, можно определить не только смещение марки, но и непосредственное смещение самой камеры. Для этого первое изображение от камеры принимают за исходное (А), все последующие - за искомые (В) и выполняют поиск центра снимка (n_0, m_0) . Смещение каждого нового изображения относительно одного начального (δ_n, δ_m) и характеризует движение камеры (рис. 6, а). Стоит отметить что этот алгоритм имеет высокую устойчивость к частичным изменениям объектов в кадре, что дает возможность «не замечать» сдвиг при перемещении только марки.

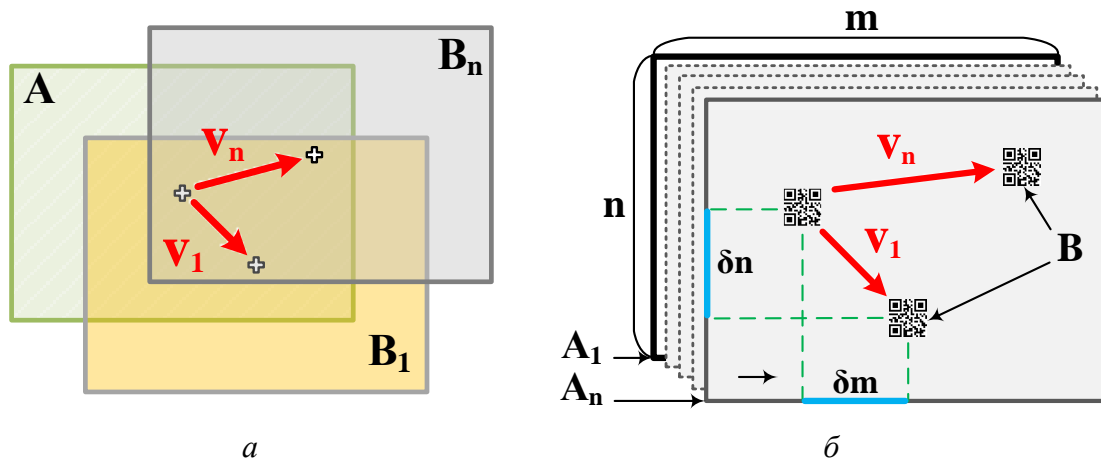


Рис. 6. Определения смещения марки и камеры ЭОС:
а – смещение камеры; б – смещение марки

Для поиска смещения марки за исходное изображение (А) принимают каждое новое изображение от камеры, а в качестве искомого (В) используют изображение самой марки. Таким образом, находя положение центра марки (n_0, m_0) на первом и последующих изображениях, возможно определить смещения марки в системе координат снимка (рис.6, б) Для получения данных, независимых от смещения самой камеры, переходят к смещению (n', m') относительно центра каждого кадра в серии.

В обоих случаях, зная разрешающую способность изображений, переходят от смещений в пикселях (δ_n, δ_m) к миллиметрам (δ_a, δ_b) .

3. Этап выполнения экспериментальных измерений

Для проверки приведенной теоретической выкладки было принято решение подготовить и выполнить экспериментальные измерения. Для этого была использована цифровая камера General Electric G100, характеристики которой упоминались ранее, цель в виде изображения QR-кода на твердой основе и испытательный столик, который позволил производить перемещение марки в горизонтальной плоскости на заданную величину $(\delta a_{пр}, \delta b_{пр})$. Была произведена имитация работы ЭОС на горизонтальной плоскости при нескольких расстояниях между маркой и камерой (рис.7) Работы проводились в зимний период при наличии снежного покрова, высота положения камеры и цели над поверхностью составляла 15 см.

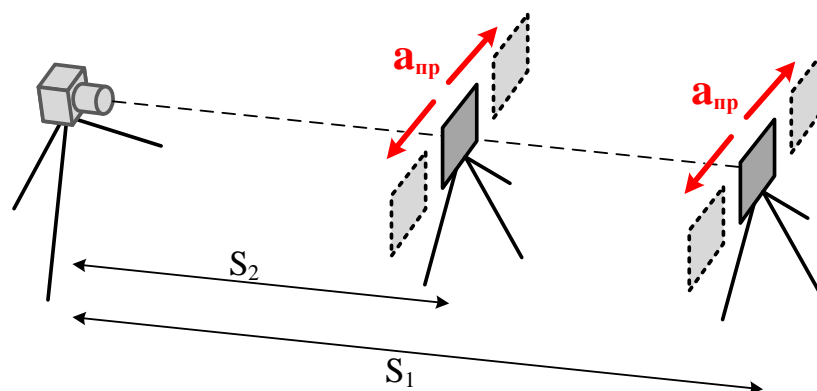


Рис.7. Схема проведения эксперимента

Обработка изображений с использованием алгоритма фазовой корреляции производилась в программной среде MatLab.

Сначала для каждого теста был определен параметр разрешающей способности изображения при заданном расстоянии до марки (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики кадра в серии экспериментов

№ теста	S, м	a, м	b, м	m, pix	n, pix	C, мм/pix	
Тест 1	33	3,50	2,62	4320	3240	0,81	0,81
Тест 2	25	2,64	1,98	4320	3240	0,61	0,61
Тест 3	17	1,86	1,39	4320	3240	0,43	0,43

Сначала была определена стабильность положения камеры во время проведения эксперимента. Как показали результаты, камера была неподвижна между сериями. Такой результат объясняется установкой камеры в автоматический серийный режим фиксации изображений на все время съемки. Учитывая аналогичность результатов между сериями, приводится одна таблица данных (табл. 3).

Таблица 3

Определение смещения камеры во время съемки

Пара изображений (A - B)	Координаты центра n-го изображения		Смещение камеры между циклами			
			Смещение камеры в пикселях		Смещение камеры в мм	
	n_0	m_0	δ_n	δ_m	δ_a	δ_b
1-1	2160	1620				
1-2	2160	1620	0	0	0	0
1-3	2160	1620	0	0	0	0

Во время определения смещения марки в качестве искомого изображения было использовано вырезанное из первого кадра изображение цели и аналогичного размера исходное изображение (рис.8).



Рис.8. Поиск центра марки на основе первого кадра и исходного изображения

В результате обработки серии изображений получены значения смещения марки, через разницу с ее фактическими смещениями во время измерений получена ошибка определения сдвига. Результаты по каждому эксперименту приведены в соответствующих таблицах (табл. 4 - 6).

Таблица 4

Определение сдвига марки при S = 33 м

Марка	Центр марки		Относительный центр марки		Сдвиг марки между циклами				Проектный сдвиг марки		Ошибка сдвига, мм	
	n_0	m_0	n'	m'	δn	δm	δa	δb	$\delta a_{пр}$	$\delta b_{пр}$	m_a	m_b
Из кадра	2159	1583	-1	-37	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2158	1582	-2	-38	-1	-1	-0,8	-0,8	-1	0	0,2	-0,8
	2168	1580	8	-40	9	-3	7,3	-2,4	9	0	-1,7	-2,4
Исходная	2159	1583	-1	-37	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2158	1582	-2	-38	-1	-1	-0,8	-0,8	-1	0	0,2	-0,8
	2167	1580	7	-40	8	-3	6,5	-2,4	9	0	-2,5	-2,4

Таблица 5

Определение сдвига марки при S = 25 м

Марка	Центр марки		Относительный центр марки		Сдвиг марки между циклами				Проектный сдвиг марки		Ошибка сдвига, мм	
	n_0	m_0	n'	m'	δn	δm	δa	δb	$\delta a_{пр}$	$\delta b_{пр}$	m_a	m_b
Из кадра	2210	1528	50	-92	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2209	1529	49	-91	-1	1	-0,6	0,6	-1	0	0,4	0,6
	2195	1529	35	-91	-15	1	-9,2	0,6	-10	0	0,8	0,6
Исходная	2211	1528	51	-92	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2210	1528	50	-92	-1	0	-0,6	0,0	-1	0	0,4	0,0
	2196	1529	36	-91	-15	1	-9,2	0,6	-10	0	0,8	0,6

Таблица 6

Определение сдвига марки при S = 17 м

Марка	Центр марки		Относительный центр марки		Сдвиг марки между циклами				Проектный сдвиг марки		Ошибка сдвига, мм	
	n _o	m _o	n'	m'	δn	δm	δa	δb	δa _{пр}	δb _{пр}	m _a	m _b
Из кадра	2151	1537	-9	-83	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2148	1537	-12	-83	-3	0	-1,3	0,0	-1	0	-0,3	0,0
	2128	1535	-32	-85	-23	-2	-9,9	-0,9	-10	0	0,1	-0,9
Исходная	2151	1536	-9	-84	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0
	2148	1537	-12	-83	-3	1	-1,3	0,4	-1	0	-0,3	0,4
	2127	1538	-33	-82	-24	2	-10,3	0,9	-10	0	-0,3	0,9

Для перехода к точности определения смещения с помощью ЭОС с применением алгоритма фазовой корреляции рассчитана СКП на основании ошибки определения сдвига марки. Результаты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Ошибка определения смещения

№ теста	Расстояние S, м	C, мм\пикс.	m _a , мм	m _b , мм	Усредненное СКП, мм
Тест 1	33	0,81	1,07	1,01	1,04
Тест 2	25	0,61	0,33	0,31	0,32
Тест 3	17	0,43	0,17	0,52	0,35

Рассматривая вопрос определения необходимой точности измерений для решения задачи геодезического мониторинга высотных объектов, можно воспользоваться источником [12], в котором рассматривался этот вопрос и было принято решение исходить из требований обеспечения допустимого отклонения от вертикали при строительстве здания. Наиболее строго это требование определяется по формуле:

$$\delta = 0,167 \cdot H, \tag{11}$$

где H – высота здания в метрах.

Перейти к критерию точности геодезического мониторинга можно используя общепринятую формулу:

$$m = 0,2 \cdot \delta. \tag{12}$$

Расчет допустимой точности геодезического мониторинга и теоретической точности существующих методов будет логичным произвести не меньше, чем до высот уже существующих в мире сооружений. Полученные данные сведено в обобщенную таблицу (табл. 8).

Таблица 8

Зависимость точности метода геодезического мониторинга от высоты сооружения

	Высота сооружения								
	75	100	200	300	400	500	600	700	800
ЭОС через 18м	1,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Продолжение табл. 8

ЭОС через 26м	1,0	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8	9,1	10,4
ЭОС через 34м	2,4	3,2	6,4	9,5	12,7	15,9	19,1	22,2	25,4
допуск	2,5	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7	20,0	23,4	26,7

Расчет точности метода геодезического мониторинга с использованием неметрической камеры производился из расчета установки ЭОС по всей длине сооружения с шагом 18, 26 и 34 метра соответственно. Конечное значение ошибки рассчитывалось путем суммы ошибок всех ЭОС для заданного расстояния на основании полученных результатов экспериментов, соответственно при изменении оптической камеры или ее элементов величина ошибки измениться.

Для наглядности результаты допустимых ошибок при выполнении задачи геодезического мониторинга интерпретируем в виде графика линейной зависимости ошибки от высоты (рис. 9).

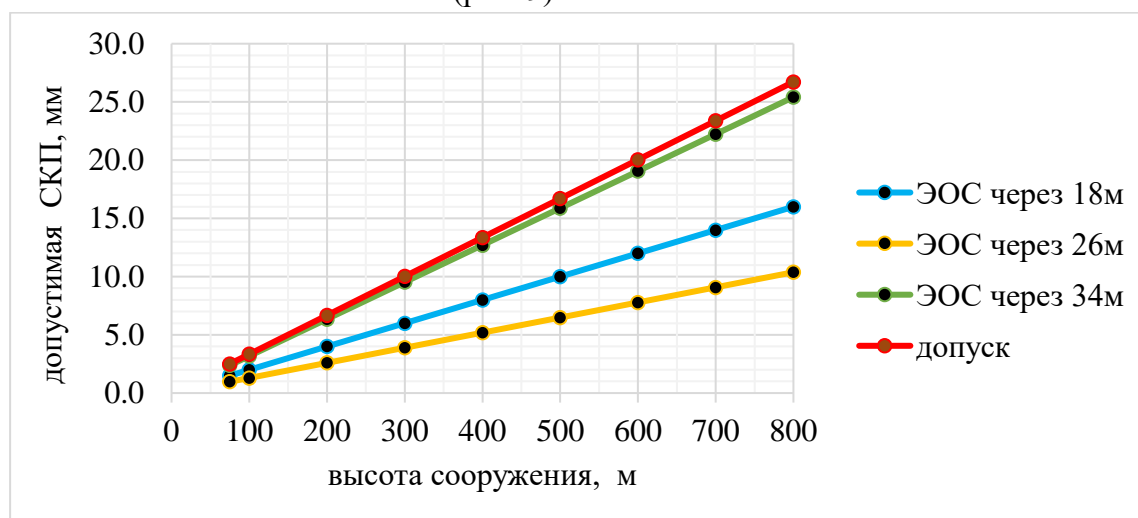


Рис. 9. Графическая интерпретация ошибок при мониторинге сооружений

Как видно по результатам эксперимента, метод с использованием неметрических камер в состоянии в полном объеме обеспечить необходимую точность выполнения геодезических работ по мониторингу высотных сооружений.

Учитывая возможности автоматизации этого вида работ, а также решение проблемы динамического получения параметров состояния сооружения, дальнейшее использование и развитие предлагаемого подхода представляется целесообразным.

Выводы. В представленной работе предложена технология выполнения работ по геодезическому мониторингу высотных сооружений с применением неметрических камер. Проведенное исследование точности элемента оптической мониторинговой системы на имитационном стенде подтвердило возможность обеспечения регламентируемой точности выполнения такого вида геодезических работ. Предложенный в работе метод определения смещения пары снимков на основе алгоритма фазовой корреляции показал устойчивый результат в сериях экспериментов. По результатам эксперимента определено наиболее эффективное

расстояние между камерой и целью, обеспечивающее двойной запас точности. В результате выполненной работы стала очевидной необходимость продолжения исследований в направлении влияния метода калибровки камеры, изменения освещенности цели и искажения оптического луча в результате рефракции на результирующую точность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яценко А. И.* Геодезическое обеспечение возведения небоскреба Burj Dubai* / А. И. Яценко, О. В. Евстафьев // Геопрофи. — 2009. — Вып. 6. — С. 8–13.
2. *Cranenbroeck van J.* State of the art in structural geodetic monitoring solutions for hydro power plant / J. van Cranenbroeck // FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May. — 2011. — FIG Working Week, 2011.— P. 18–22.
3. *Могильный С. Г.* Геодезический мониторинг и выверка технологического оборудования / С. Г. Могильный, В. Н. Ревуцкий, В. А. Пригаров, А.А. Шоломицкий // Геопрофиль. — 2009. — Вып. 3. — С. 12–19.
4. *Ягер Р.* Математические модели и техническая реализация GOCA – онлайн-системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS) [Текст]: материалы VIII междунар. науч. конгр., 10-20 апреля 2012 г. Новосибирск / редкол.: Р. Ягер, П. Шпон, Т. Шайхутдинов (отв. ред.). — Новосибирск: СГГА, 2012. — С. 9–32.
5. *Bridge C.* Geodetic monitoring solutions for large infrastructure projects, health monitoring in Korea [Текст]: materials Malaysia Geospatial Forum 2012, 6-7 March 2012 / C. Bridge. — 2012.
6. *Вальков В. А.* Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования: дис., ... канд. техн. наук / В. А. Вальков — СПб., 2015. — 158 с.
7. *Буюкян С. П.* Разработка теоретических основ и методов решения специальных задач прикладной геодезии на основе видеоизмерений: дис., ... докт. техн. наук / С. П. Буюкян — М., 2016. — 168 с.
8. *Буюкян С. П.* Видеоизмерение в инженерной геодезии / С. П. Буюкян // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2002. — Вып. 6. — С. 27–34.
9. *Фельдман В. Д.* Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений / В. Д. Фельдман, Г. Е. Рязанцев, В. А. Горелов [и др.]. — М.: ОАО «ЦПП», 2010. — 160 с.
10. *Sarvaiya J.* Image registration using log polar transform and phase correlation to recover higher scale / J. Sarvaiya, S. Patnaik, K. Kothari // Journal of Pattern Recognition Research. — 2012. — Issue 7, No. 1. — P. 90–105.
11. *Раскаткин Ю. Н.* Геометрические методы определения параметров пространственного положения и формы строительных конструкций: дис., ... канд.техн. наук / Ю. Н. Раскаткин — Н. Новгород, 2016. — 130 с.

12. Шульц Р. В. Опыт использования современных технологий в задачах геодезического мониторинга высотных зданий / Р.В. Шульц, А.А. Анненков, Н. В. Куличенко // Вестник МГСУ. — 2016. — № 1. — С. 80–93.

REFERENCES

1. Yashchenko, A.I., & Evstafiev, O. V. (2009). Geodezicheskoe obespechenie vozvedeniya neboskreba Burj Dubai* [Geodetic support of the construction of the skyscraper Burj Dubai *]. *Geoprofi - Geoprofi*, 6, 8–13 [in Russian].
2. Van Cranenbroeck, J. (2011). State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant. *FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May, (May 2011)*, 18–22.
3. Mogilny, S.G., Revutskiy, V.N., Prigarov, V.A., & Sholomitsky, A.A. (2009). Geodezicheskii monitoring i vyiverka tehnologicheskogo oborudovaniya [Geodetic monitoring and reconciliation of process equipment]. *Geoprofil - Geoprofile*, 3, 12–19 [in Russian].
4. Jager, R., Spohn, P., Shaykhutdinov, T., Gorokhova, T., & Yankush, A. (2012). Matematicheskie modeli i tehnikeskaya realizatsiya GOCA – onlayn- sistemy geodezicheskogo monitoringa i opovescheniya o deformatsiyah prirodnykh i tehnogennykh ob'yektov, osnovannaya na tochnykh sputnikovykh (GNSS) i nazemnykh geodezicheskikh nablyudeniya (LPS/LS) [Mathematical models and technical implementation of GOCA - online systems for geodetic monitoring and warning of deformations of natural and man-made objects, based on precise satellite (GNSS) and ground-based geodetic observations (LPS / LS)]. *Interexpo Geo-Sibir - Interexpo GEO-Siberia*, 9–32 [in Russian].
5. Bridge, C. (2012). Geodetic Monitoring Solutions for large infrastructure projects, Health Monitoring in Korea.
6. Valkov V.A. (2015). Geodezicheskie nablyudeniya za protsessom deformirovaniya vyisotnykh sooruzheniy s ispolzovaniem tehnologii nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic observations of the process of deformation of high-rise structures using the technology of ground-based laser scanning]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg: SPMI [in Russian].
7. Buyukyan, S.P. (2016). Razrabotka teoreticheskikh osnov i metodov resheniya spetsialnykh zadach prikladnoy geodezii na osnove videoizmereniy [Development of theoretical bases and methods for solving special problems of applied geodesy based on video measurements]. *Doctor's thesis*. Moscow: AOGSPI [in Russian].
8. Buyukyan, SP (2002). Videoizmerenie v injenernoy geodezii [Video measurement in engineering surveying]. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i Aerofotosyemka» - News of higher educational institutions «Surveying and aerial photography»*, 6, 27–34.
9. Feldman, V.D., Ryazantsev, G.E., Gorelov, V.A., Zhidkov, A.A., Buyukyan, S.P., Nazarov, I.A., & Nefedova, V. I. (2010). Metodika geodezicheskogo monitoringa tehnikeskogo sostoyaniya vyisotnykh i unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Technique of geodetic monitoring of technical condition of high-rise and unique buildings and structures]. *Metodicheskaya dokumentatsiya v stroitelstve - Methodical documentation in construction*. Moscow: OAO «TsPP» [in Russian].

10. Sarvaiya, J., Patnaik, S., & Kothari, K. (2012). Image Registration Using Log Polar Transform and Phase Correlation to Recover Higher Scale. *Journal of Pattern Recognition Research*, 7(1), 90–105. <https://doi.org/10.13176/11.355>.

11. Raskatkin, Y.N. (2016). Geometricheskie metodyi opredeleniya parametrov prostranstvennogo polojeniya i formyi stroitelnyih konstruktsiy [Geometric methods for determining the parameters of the spatial position and shape of building structures]. *Candidate's thesis*. Nizhny Novgorod: NNGASU [in Russian].

12. Shul'ts R.V., Annenkov A.A., & Kulichenko N.V (2016). Opyt ispolzovaniya sovremennykh tekhnologiy v zadachakh geodezicheskogo monitoringa vysotnykh zdaniy [Experience of Using Modern Technologies in the Tasks of High-Rise Buildings Geodetic Monitoring]. *Vestnik MGSU - Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, no. 1, 80—93 [in Russian].

Ю.В. Медведський

**ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ
ВИСОТНИХ СПОРУД З ВИКОРИСТАННЯМ НЕМЕТРИЧНИХ
ЦИФРОВИХ КАМЕР**

У роботі розглянуто підхід до вирішення задачі геодезичного моніторингу з використанням системи неметричних камер. Запропоновано технологію виконання робіт, що дає змогу визначити зміну геометричних параметрів споруди під впливом зовнішніх факторів і прогнозувати їх на заданий момент часу. В основу вимірів покладено принцип відносних вимірювань, реалізований через визначення зсуву між парами знімків від неметричних камер. Зсув пари зображень запропоновано визначати за допомогою алгоритму фазової кореляції, який забезпечує високу швидкість рішення і надійність одержуваних результатів. Підготовлено експериментальний стенд та проведено серію вимірювань, що імітують роботу одного елемента оптичної системи. Реалізовано програму з обробки серії зображень в середовищі програмування Matlab з використанням алгоритму фазової кореляції. Виконано аналіз результатів експерименту, який дозволяє зробити висновок про можливість успішної реалізації описаного методу з дотриманням вимог до точності виконання робіт цього виду.

Ключові слова: *геодезичний моніторинг, моніторинг споруд, методи моніторингу, моніторинг висотних споруд, відеовимірювальні методи, неметричні камери.*

Yu. Medvedskyi

**THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF GEODESIC MONITORING
OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH THE APPLICATION OF NON-METRIC
DIGITAL CAMERAS**

The approach to solving the problem of geodetic monitoring using a system of non-metric digital cameras is considered. The technology for performing works is proposed, which allows to determine the change in the geometric parameters of a

structure under the influence of external factors and to predict them at a given time. The measurement principle is based on the principle of relative measurements, realized through the displacement finding the displacement between pairs of images from non-metric digital cameras. The displacement of a pair of images is suggested to be determined using a phase correlation algorithm that ensures a high resolution speed and reliability of the results obtained. An experimental stand was prepared and a series of measurements simulating the operation of one element of the optical system was made. Implemented a program for processing a series of images in the programming environment of Matlab using the phase correlation algorithm. The results of the experiment are analyzed, which allows us to conclude that the described method can be successfully implemented in compliance with the requirements for the accuracy of this type of work.

Keywords: *geodetic monitoring, monitoring of buildings, monitoring methods, monitoring of high-rise buildings, video measurement methods, non-metric digital cameras.*

Надійшла до редакції

02.04.2018

УДК 528.48

К.О. Бурак, *д-р техн. наук, професор,*
В.М. Ковтун, *асистент кафедри інженерної геодезії,*
Л.І. Дорош, *аспірант кафедри інженерної геодезії*
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТРИГОНОМЕТРИЧНИМ НІВЕЛЮВАННЯМ

У роботі розглянуто можливість використання одностороннього тригонометричного нівелювання під час спостереження за деформаціями споруд. Відзначено, що порівняно з геометричним нівелюванням тригонометричне має ряд переваг, наприклад, відсутність похибок, пов'язаних з встановленням рейок, що під час геометричного нівелювання є одним з основних джерел похибок. На основі результатів досліджень встановлено залежності СКП визначення перевищення між цими точками від віддалі і перепаду висот між станцією стояння і точками, що спостерігаються. Отримані залежності і графіки дають змогу виконати апріорну оцінку точності визначення деформацій споруд.

Наведено залежності і графіки, які дають змогу, задаючись необхідною СКП визначення перевищення та технічними характеристиками приладу, визначити допустимі значення довжини плеч.

Ключові слова: *одностороннє тригонометричне нівелювання, СКП визначення перевищення, деформації споруд.*

© К.О. Бурак, В.М. Ковтун,
Л.І. Дорош, 2018