Рациональное проектирование геодезических наблюдений за деформациями сооружений

Rational design of geodesic monitoring of structural deformations

Чернов / Chernov I.
Иван Владимирович
(4ern86@bk.ru)
кандидат технических наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
доцент кафедры картографии.
г. Санкт-Петербург

Исаков / Isakov A.
Артем Владимирович
(artem.isak@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
слушатель кафедры высшей геодезии.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: тахеометрическая съёмка – tacheometric survey; деформации сооружений – deformation of structures; предельные точности – limit accuracy; обоснование – justification; точки съёмки – survey points.

Статья посвящена мониторингу деформаций инженерных сооружений с применением современных тахеометров. Рассматривается случай мониторинга с завышенными требованиями к точности выявления деформаций, сопоставимых с предельно достижимым уровнем точности тахеометрической съёмки. В статье выполнен анализ ошибок тахеометрической съёмки, предложен подход к оцениванию точности определения деформаций, основанный на раздельном определении её составляющих, предложен подход, позволяющий обосновать расположение станций тахеометрических измерений при мониторинге деформаций сооружений.

The article is devoted to the monitoring of deformations of engineering structures using modern total stations. The case of monitoring with excessive requirements for the accuracy of detection of deformations comparable with the maximum achievable level of accuracy of total station survey is considered.
The article analyzes the errors of total station surveys, proposes an approach to assessing the accuracy of determining deformations, based on the separate determination of its components, and proposes an approach that allows one to justify the location of stations for total station monitoring of deformations of structures.

Для повышения точности геодезических определений традиционно используются два направления: «... посредством малого числа наблюдений, точных во всех их элементах ...», [1] т.е. путём учёта, компенсации, либо минимизации ошибок или путём увеличения числа избыточных измерений (прежде всего независимых) [2–4]. Для решения поставленной задачи предлагается реализовать оба подхода, для чего необходимо выполнить анализ ошибок, присущих тахеометрической съёмке.

Измеренными величинами в идеальном тахеометре являются A, z, D – азимут (горизонтальное направление), зенитное расстояние и длина вектора положения точки съёмки. В топоцентрической горизонтной системе координат (при идеальной начальной выставке) положение определяемой точки M показано на рис. 1.

На рис. 1 точка O – точка установки тахеометра M – определяемая точка, D_X, D_Y, D_Z, D_{XY} – длины соответствующих проекций вектора положения. Можно записать зависимость вычисляемых координат (приращений) от измеряемых тахеометром величин

$$D_X = D\sin z\cos A,\ D_Y = D\sin z\sin A,\ D_Z = D\cos z. \quad (1)$$

Для определения средней квадратической ошибки (СКО) координат применима формула СКО функции независимых аргументов [4]. Для рассматриваемого случая (1) СКО функций координат составит

$$m_X^2 = (\sin z\cos A)^2 m_D^2 + (D\sin z\sin A)^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D\cos z\cos A)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$
$$m_Y^2 = (\sin z\sin A)^2 m_D^2 + (D\sin z\cos A)^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D\cos z\sin A)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$
$$m_Z^2 = m_D^2\cos^2 z + D^2\sin^2 z\frac{m_z^2}{\rho^2}. \quad (2)$$

где m_D – величина СКО измерения длины линии (ТТХ тахеометра). Отсюда, с учётом уравнений (1) можно получить

2 2020.indd 130 23.06.2020 9:27:05

Таблица 1

Технические характеристики современных тахеометров

Технические характеристики	Модель		
Параметр	Topcon GPT- 3002N	Leica TPS 1201,2	Trimble S8
Точность угловых измерений	2″	1″,2″	0,5″
Дальность измерений в безотражательном режиме	1,5–300 м	1,5–1000 м	1–1300 м
Точность линейных измерений на призму	3 мм + 2 мм*км	1мм + 1.5мм*км	1 мм + 1 мм*км
Точность линейных измерений без отражателя	3 мм + 5 мм*км	2 мм + 2 мм*км	2 мм + 2 мм*км
Увеличение зрительной трубы	30х	30х	30х

$$m_X^2 = \frac{D_X^2}{D^2} m_D^2 + D_Y^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + D_Z^2 \frac{D_X^2}{D_X^2 + D_Y^2} \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Y^2 = \frac{D_Y^2}{D^2} m_D^2 + D_X^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + D_Z^2 \frac{D_Y^2}{D_X^2 + D_Y^2} \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Z^2 = \frac{D_Z^2}{D^2} m_D^2 + (D_X^2 + D_Y^2) \frac{m_z^2}{\rho^2}, \quad (3)$$

где

$$D^2 = D_X^2 + D_Y^2 + D_Z^2.$$

Выражения (2) и (3) характеризуют СКО определения координат при съёмке круглого объекта из его центра, когда длина измеряемой линии не зависит (слабо зависит) от её же азимута A. Например, при съёмке карьеров, стадионов или при контроле осадок грунтов в районе шахт и т.д. Однако при оценивании СКО координат необходимо учесть тот факт, что расстояние от точки съёмки до различных по высоте точек контролируемого объекта будет существенно разниться. Так, при z=90° и расстоянии от точки съёмки до контролируемого объекта D_0, расстояние от точки съёмки до любой точки круглого объекта можно представить формулой

$$D = \frac{D_0}{\sin z} \text{ при } z \neq 90° \text{ и } z \neq 180°. \quad (4)$$

С учётом этой формулы, можно получить уравнение для СКО определения координат округлого объекта из его центра

$$m_X^2 = (\sin z \cos A)^2 m_D^2 + (D_0 \sin A)^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D_0 \mathrm{ctg} z \cos A)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Y^2 = (\sin z \sin A)^2 m_D^2 + (D_0 \cos A)^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D_0 \mathrm{ctg} z \sin A)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Z^2 = m_D^2 \cos^2 z + D_0^2 \frac{m_z^2}{\rho^2}. \quad (5)$$

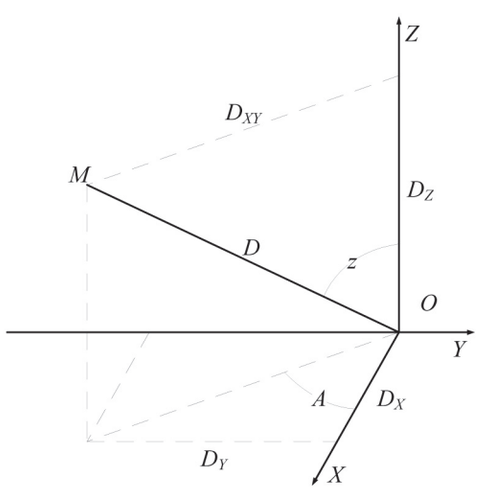

Рис. 1. Определяемые тахеометром величины

Визуализация зависимостей (5) при фиксированных D_0=30м, m_D = 1 мм, m_A = 2″, m_z =3″ представлена на рис. 2.

При оценивании деформаций вытянутого объекта необходимо учесть, что расстояние от точки съёмки до различных точек контролируемого объекта будет существенно разниться не только при изменении зенитного расстояния измеряемого направления, но и при изменении его азимута. Так, если A=0°, z=90°, и расстояние от точки съёмки до контролируемого объекта D_0, тогда расстояние от точки съёмки до точки объекта можно представить формулой

2 2020.indd 131 23.06.2020 9:27:06

$$D = \frac{D_0}{\sin z \cos A} \text{ при } A \neq 90°,\ A \neq 0° \text{ и } z \neq 90°,\ z \neq 180°. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (2) получим

$$m_X^2 = (\sin z \cos A)^2 m_D^2 + (D_0 \operatorname{tg} A)^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D_0 \operatorname{ctg} z)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Y^2 = (\sin z \sin A)^2 m_D^2 + D_0^2 \frac{m_A^2}{\rho^2} + (D_0 \operatorname{ctg} z \operatorname{tg} A)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2},$$

$$m_Z^2 = m_D^2 \cos^2 z + \left(\frac{D_0}{\cos A}\right)^2 \frac{m_z^2}{\rho^2}. \quad (7)$$

Формулы (7) содержит параметры m_D, m_A, m_z, которые определяются техническими характеристиками самого тахеометра (табл. 1). Однако СКО измерения углов не зависят от значений самой измеряемой величины. Напротив, СКО измерения длины линии, для современных тахеометров описывается выражением

$$m_D = m_0 + kD_{\text{КМ}}, \quad (8)$$

где m_0 – базовая составляющая СКО, мм; k – приращение СКО измерения длины линии при увеличении длины измеряемой линии на один километр, мм/км; $D_{\text{КМ}}$ – длина измеряемой линии в километрах. Точность измерения линии тахеометром до отражателя находится на уровне m_0=1…3 мм, k=1…5 мм (табл. 1). Если, опираясь на практику, ограничить измерение длин линий 100 метрами, то СКО измерения длин линий, в соответствии с (8), составит порядка m_D = 1…3 мм.

С учётом ограничения длин изменяемых линий и на основании (7) представлена визуализация СКО определения координат тахеометром в зависимости от азимута и зенитного расстояния съёмки при D_0=20м, m_D = 2 мм, m_A = 2″, m_z =3″ (рис. 3).

Рис. 2 и 3 показывают, что характер зависимости СКО от измеренных величин для каждой координаты индивидуален. Представление результирующего СКО определения деформации как среднего геометрического приводит к существенной потере информативности при оценивание точности. Кроме того, из рис. 3 видно, что при съёмке всего объекта с одной точки СКО определения координат резко возрастает для горизонтальных углов в диапазоне 60–120°. Очевидно, для съёмки крупных объектов потребуется использовать несколько точек для съёмки, с целью исключения измерения горизонтальных углов в диапазоне 60–120°.

Таким образом, для рационального проектирования наблюдений за деформациями сооружений необходимо обосновать число и положение точек съемки относи-

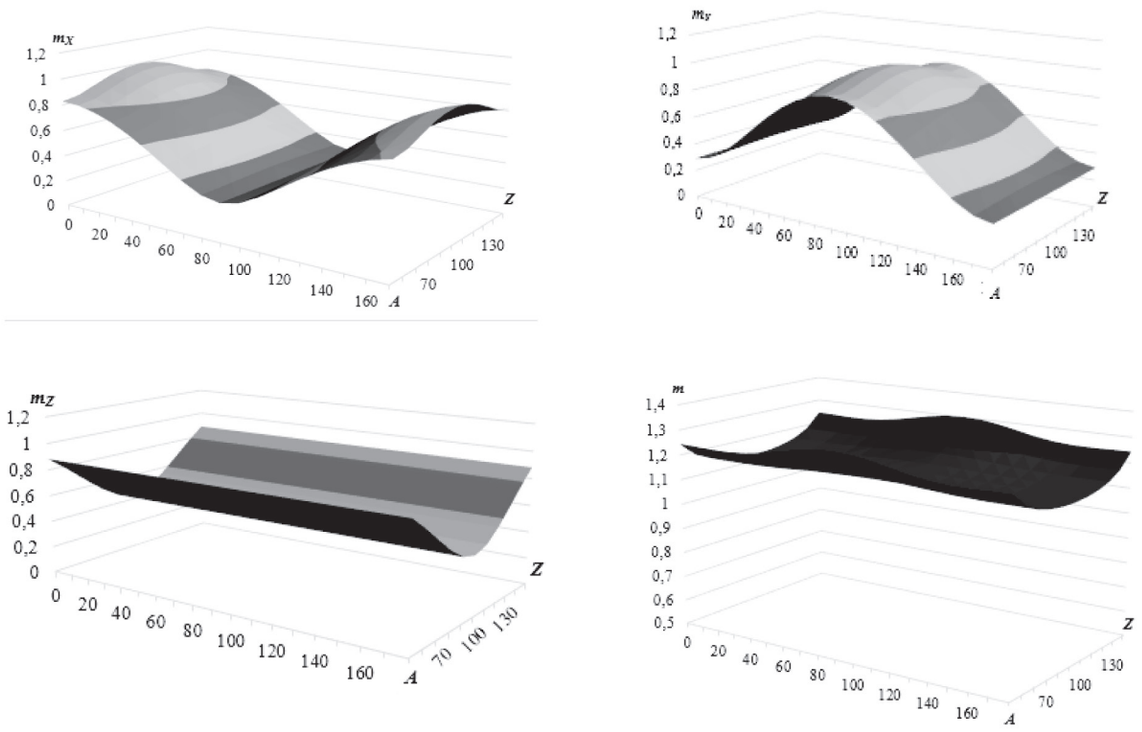

Рис. 2. Зависимость СКО координат от измеренных величин при съёмке округлого объекта из его центра; а) зависимость СКО координаты X от A и z, б) зависимость СКО координаты Y от A и z, в) зависимость СКО координаты Z от A и z, г) результирующее отклонение

2 2020.indd 132 23.06.2020 9:27:11

тельно объекта, исходя из протяжённости и высоты контролируемого сооружения и допустимых точностей контроля деформаций.

Обоснование критерия выбора положения точек для съёмки деформаций сооружений. Положение точек съемки относительно объекта (контролируемого сооружения) целесообразно представить в топоцентрической системе координат *ODAz* (рис. 1). Области допустимых значений *ODAz* будут иметь ограничения. Стоит учесть тот факт, что для современных тахеометров существуют ограничения по измерению зенитных расстояний, обусловленные конструкцией вертикального круга. На малых (менее 40−50˚) и на больших зенитных расстояниях измерение z тахеометром не реализуемо, что определяет диапазон $z \in (40^\circ, 130^\circ)$.

Важной технической характеристикой тахеометра является разрешающая способность ψ трубы. Под разрешающей способностью трубы понимают способность оптической системы давать раздельные изображения двух близкорасположенных точек (способность различить объект). Разрешающую способность ψ трубы тахеометра можно рассчитать, зная ее увеличение Г по формуле [5]

$$\psi = 60''/\Gamma. \qquad (9)$$

Для рассматриваемой группы тахеометров разрешающая способность составит $\psi = 2''$.

Измерения при контроле деформаций сооружений, как правило, проводятся с использованием марок-отражателей, наклеиваемых на сооружение. Размеры марок составляют около 50×50 мм. Линии на марке, отображающие цель, имеют толщину порядка 1 мм. Учитывая $\psi = 2''$, с использованием формулы (9) нетрудно рассчитать, что линии марки будут различимы на расстояниях до ≈103 м. Не всегда существует возможность вынести точку съёмки на указанное расстояние. Кроме того, поиск марки на таком расстоянии затруднителен. В результате на практике чаще выбираются точки для измерений на расстояниях 30−50 м. Также для тахеометров существует ограничение минимальной длины линии. Отсюда $D \in [1\text{ м}, 50\text{ м}]$.

Учитывая описанные ограничения, можно сформулировать критерий пригодности D положения точек съёмки относительно объекта

$$G:\begin{cases} D_0 \in \left\{D_0^{\partial}\right\} \cong [(m_X \le m_X^{\partial}) \cap (m_Y \le m_Y^{\partial}) \cap (m_Z \le m_Z^{\partial})]; \\ A \in \left\{A^{\partial}\right\} \cong [(m_X \le m_X^{\partial}) \cap (m_Y \le m_Y^{\partial}) \cap (m_Z \le m_Z^{\partial})]; \\ z \in \left\{z^{\partial}\right\} \cong [(m_X \le m_X^{\partial}) \cap (m_Y \le m_Y^{\partial}) \cap (m_Z \le m_Z^{\partial})], \end{cases} \qquad (10)$$

где D_0^{∂} − допустимые значения D_0, A^{∂} − допустимые значения A, z^{∂} − допустимые значения z, m^{∂} − допустимые значения СКО определения координат контролируемого объекта.

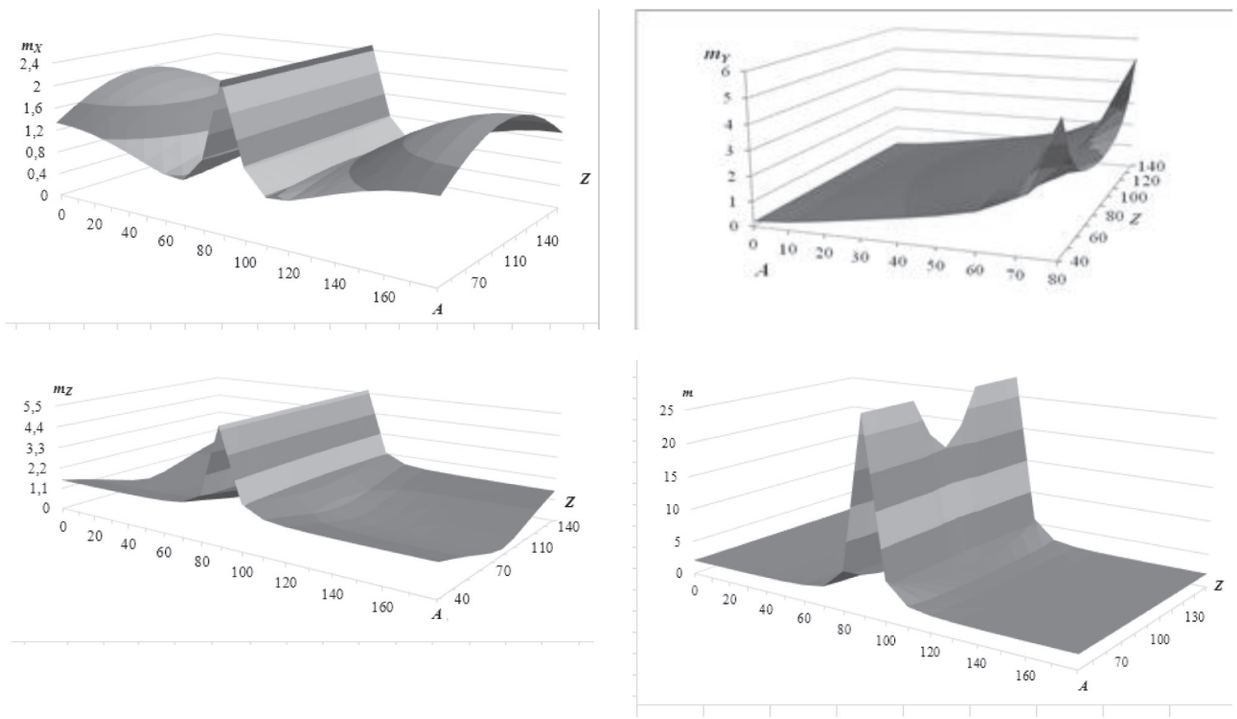

Рис. 3. Зависимость СКО координат от измеренных величин; а) зависимость СКО координаты X от A и z, б) зависимость СКО координаты Y от A и z, в) зависимость СКО координаты Z от A и z, г) результирующее отклонение

2 2020.indd 133 23.06.2020 9:27:12

Пример обоснования числа точек для геодезических наблюдений за деформациями сооружения с заданной точностью. Рассмотрим для примера оценивания деформаций здание в плотной городской застройке, протяжённость которого составляет порядка 250 метров. Из-за плотной городской застройки вести наблюдения возможно с расстояния D_0 порядка 20–25 метров от фасада. Пусть для съемки объекта доступен тахеометр со следующими характеристиками: m_D=3 мм, m_A=5″ и m_z=5″. В соответствии с действующим ГОСТом [6] это здание необходимо контролировать с применением измерений, обеспечивающих погрешность измерения вертикальных деформаций 2 мм и горизонтальных 5 мм.

Тогда для уменьшения СКО определения координат необходимо ограничить диапазон измерения горизонтальных углов (азимутов) A от 0° до 60° (рис. 3). Приняв D_0 = 20 м, возможно рассчитать расстояние l, через которое следует устанавливать вдоль фасада точки съемки по формуле:

$$l=D_0\mathrm{tg}A.$$

Получим, что l=35м. То есть для контроля деформаций с заданной точностью необходимо выполнить съёмку исследуемого здания с четырёх точек. В этом случае ожидаемые СКО составят m=3,4 мм (m_X=2,2 мм, m_Y=1,6 мм, m_Z=2,1 мм).

При наблюдении высоких зданий для уменьшения величины СКО необходимо придерживаться диапазона углов $z\in[60^\circ, 90^\circ]$, этого можно достичь при удалении точки съемки от объекта. Тогда с каждым перемещением прибора для наблюдений будут доступны новые области контролируемого объекта.

Заключение

Предложенный в статье подход позволяет решать задачи контроля деформаций сооружений исходя из заданной точности. Это позволяет проектировать геодезические работы с завышенными требованиями к точности выявления деформаций, сопоставимых с предельно достижимым уровнем точности тахеометрических измерений. Предложенный подход позволяет не только обосновывать положение точек установки прибора и их число, но и требования к техническим характеристикам тахеометров. Это достигается раздельным проектированием съёмки для определения горизонтальных и вертикальных деформаций.

Литература

1. Уралов, С. С. Курс геодезической астрономии. Часть 2. Разделы 1, 2: Учебник / С.С. Уралов. – М.: ВИА, 1971. – 366 с.

2. Обоснование эмпирического коэффициента понижения точности гироскопических наблюдений / В.Ф. Алексеев, Ю.В. Левадный, И.В. Чернов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 665. – С. 132–138.

3. Чернов, И. В. Модель интегрированной спутниково-гироскопической системы оперативного определения высокоточного азимута / И.В. Чернов // Геодезия и картография. – 2017. – № 7. – С. 2–8.

4. Астапович, А. В. Теория математической обработки измерений. Часть 1. Ошибки измерений: учеб. пособие / А.В. Астапович. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2017. – 191 с.

5. Заказнов, Н. П. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

6. ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – Введ. 2013–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

2 2020.indd 134 23.06.2020 9:27:12