Геодезический контроль деформаций сооружений на основе косвенных способов геодезического ориентирования

Geodesic Control of Deformation of Constructions Based on Proxy Techniques of Geodesic Bearings

Алексеев / Alekseev V.
Виктор Федорович
(Vfalex_vti@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ФГКВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского)
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Сергеев / Sergeev D.
Дмитрий Викторович
(sergeevdmitriyV@yandex.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательской лаборатории,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Козлов / Kozlov N.
Николай Аифалович
(Kna.32@yandex.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Прокофьев / Prokofjev A.
Александр Валерьевич
(prokofyev_alexander@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник научно-исследовательского отдела.
г. Санкт-Петербург

Аксенова / Aksenova T.
Татьяна Николаевна
(tatyanaaksenova@yandex.ru)
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»,
аспирант кафедры ГИС.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: геодезический контроль – geodesic control; уникальные сооружения – unique constructions; ориентирующий угол – orienting angle; точность измерения – measurement accuracy.

Статья посвящена оценке точности методики геодезического контроля деформаций сложных (уникальных) сооружений, разработанной на основе косвенных способов геодезического ориентирования.

The paper is dedicated to assessing the accuracy of the technique of geodesic control of deformations of complex (unique) constructions, developed on the basis of proxy techniques of geodesic bearings.

Введение

Несмотря на развитие геодезического приборостроения, применение традиционных методов (методик) при выполнении геодезического контроля деформаций сложных (уникальных) сооружений (гидроэлектростанции, стационарные антенные комплексы [1], стартовые космические сооружения) зачастую не позволяет обеспечить требуемую точность геодезических построений. Решение данной задачи возможно с устранением погрешностей центрирования приборов, нестабильности центров пунктов, температурных перемещений точек и минимизацией других сопутствующих погрешностей [2].

Методика геодезического контроля деформаций крупноапертурных стационарных фазированных антенных решеток (ФАР) [3], разработанная на основе

косвенных способов геодезического ориентирования [4], позволяет обеспечить точность контроля деформаций со средней квадратической погрешностью (СКП) 0,5–0,9 мм. К основным достоинствам косвенного ориентирования следует отнести независимость от места установки тахеометра, координат центров опорной геодезической сети и высокую точность ориентирования прибора, превышающую точность измерения направлений. Стабильность сторон исходной ориентирной сети обеспечивается выполнением требований к взаимному размещению ориентирных пунктов (Орп) на стабильных грунтах (рис. 1).

Порядок выполнения измерений

На этапе строительства измерения выполняют со штатива или с наблюдательного столба. На стадии эксплуатации, ввиду недостаточной устойчивости штатива, измерения следует выполнять только с наблюдательных столбов в следующей последовательности:

1. Тахеометр устанавливают на наблюдательном столбе (рис. 1), измеряют горизонтальные направления на ориентирные пункты «Способом круговых приемов».

2. Зрительную трубу наводят на начальное направление – опорную марку (Ом) и приводят отсчет по горизонтальному кругу близким к нулю.

3. Измеряют горизонтальные направления и расстояния с регистрацией отсчетов на Ом и ориентирные пункты Орп1, Орп2, Орп3, Орп4 (в полуприемах измерения направлений осуществляют вращением трубы в противоположных направлениях).

4. Не меняя ориентировки тахеометра, круговыми приемами измеряют направления на Ом и деформационные марки (М).

5. Каждое наведение на контролируемые точки сопровождают регистрацией измеряемых величин (расстояний, превышений, вертикальных и горизонтальных направлений).

Обработка результатов измерений

1. Результаты измерений записываются в память тахеометра для последующей обработки с использованием ЭВМ и представлением отчетных материалов.

2. Обработку результатов очередного цикла измерений выполняют в следующей последовательности:

2.1. Вычисляют дважды значение ориентирующего угла [6] (дирекционного угла нулевого диаметра горизонтального круга тахеометра) относительно треугольника Орп1Орп2Орп4 по измерениям, выполняемым до и по завершению наблюдений деформационных марок:

$$\mathrm{tg}\alpha_0 = \frac{k_2 \cdot \sin(\alpha_{21} - N_1) + k_1 \cdot \sin(\alpha_{24} - N_4)}{k_2 \cdot \cos(\alpha_{21} - N_1) + k_1 \cdot \cos(\alpha_{24} - N_4)};$$

$$k_1 = \sin(\alpha_{14} - \alpha_{12}) \cdot \sin(N_2 - N_1);$$

$$k_2 = \sin(\alpha_{42} - \alpha_{41}) \cdot \sin(N_4 - N_2),$$

2.2. Аналогично дважды вычисляют значение ориентирующего угла относительно треугольника Орп1Орп3Орп4 по формуле:

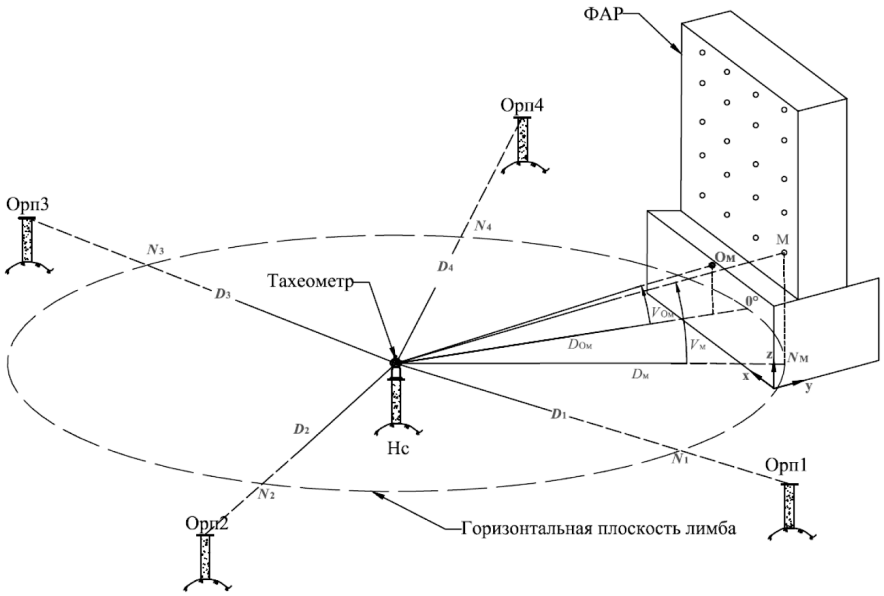


Рис. 1. Схема ориентирной геодезической сети

$$\mathrm{tg}\alpha_0 = \frac{k_4 \cdot \sin(\alpha_{31} - N_1) + k_3 \cdot \sin(\alpha_{34} - N_4)}{k_4 \cdot \cos(\alpha_{31} - N_1) + k_3 \cdot \cos(\alpha_{34} - N_4)};$$

$$k_3 = \sin(\alpha_{14} - \alpha_{13}) \cdot \sin(N_3 - N_1);$$

$$k_2 = \sin(\alpha_{43} - \alpha_{41}) \cdot \sin(N_4 - N_3),$$

где

α_0 – ориентирующий угол;

α_i – дирекционный угол направлений i-ой стороны между ориентирными пунктами;

N_i – отсчеты по горизонтальному кругу направления на Орп.

2.3. Расхождение в значениях ориентирующего угла не должны превышать 6″. При допустимости их расхождений находят среднее арифметическое ориентирующего угла из четырех его значений.

2.4. Координаты (x_i, y_i, z_i) деформационных марок вычисляют относительно опорной марки по формулам:

$$x_i = D_i \cdot \cos(\alpha_0 + N_i) - D_{\text{ом}} \cdot \cos(\alpha_0 + N_{\text{ом}});$$

$$y_i = D_i \cdot \sin(\alpha_0 + N_i) - D_{\text{ом}} \cdot \sin(\alpha_0 + N_{\text{ом}});$$

$$z_i = L_i \cdot \sin V_i - L_{\text{ом}} \cdot \sin V_{\text{ом}},$$

где

$D_i(D_{\text{ом}})$ – горизонтальное расстояние от тахеометра до деформационной (опорной) марки;

$L_i(L_{\text{ом}})$ – наклонное расстояние от тахеометра до деформационной (опорной) марки;

$V_i(V_{\text{ом}})$ – вертикальное направление на деформационную (опорную) марку.

2.5 Рассчитывают отклонения координат деформационных марок $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ от их значений, полученных в предыдущем цикле измерений $\left(x_i^{\text{пр}}, y_i^{\text{пр}}, z_i^{\text{пр}}\right)$:

$$\Delta x_i = x_i - x_i^{\text{пр}};$$

$$\Delta y_i = y_i - y_i^{\text{пр}};$$

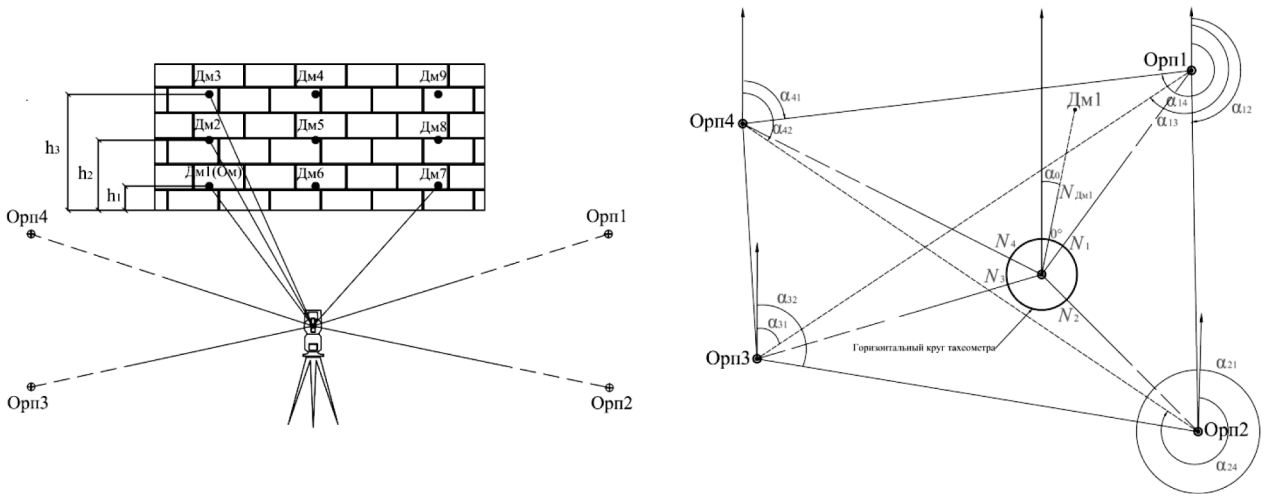
$$\Delta z_i = z_i - z_i^{\text{пр}},$$

2.6 Определяемые параметры записываются в журнал.

Оценка точности результатов геодезических определений

Исследования точности определения взаимного положения деформационных марок по данной методике проводились на модели [5], в качестве которой послужило кирпичное сооружение, по размерам сопоставимое с существующими конструкциями ФАР. Предполагалось, что с изменением температуры окружающей среды деформационные марки (Дм1–Дм9), закрепленные на теневой поверхности сооружения, будут перемещаться на пренебрежимо малые величины. При выполнении данного условия представлялось возможным оценить точность определения взаимного положения деформационных марок по приращениям их координат, полученным между смежными циклами наблюдений.

Необходимым условием являлось создание ориентирной сети на местности и сети деформационных марок на сооружении. Ориентирная сеть создавалась в виде четырехугольника из ориентирных пунктов (Орп1, Орп2, Орп3, Орп4), закрепленных пленочными отражателями на сооружении. Для создания сети контрольных точек использовались шарикоподшипники различного диаметра (5, 7, 10 мм), установленные на различных высотах контролируемой поверхности $(h_1 \approx 3$ м, $h_2 \approx 10$ м, $h_3 \approx 16$ м,)(рис.2, а). Наблюдения осуществлялись поверенным тахеометром «*Leica 1201+*».



а) сеть контролируемых точек

б) ориентирная сеть

Рис. 2. Схема измерений

Программой наблюдений предусматривалось выполнение двойной серии измерений (наведение трубы тахеометра и регистрация отсчетов по контрольным точкам) по десяти циклам наблюдений:

1. Произвольная установка тахеометра на штативе внутри ориентирной сети перед контролируемой поверхностью (рис.2, а).

2. Измерение направления на Дм1 (принимаемого в качестве исходного) и направлений на Орп1, Орп2, Орп3, Орп4 (рис.2, б).

3. Наведение трубы тахеометра на деформационные марки (Дм 1...Дм 9) с регистрацией отсчетов (расстояний, превышений, горизонтальных направлений и вертикальных углов).

5. Выполнение второй серии измерений при неизменной ориентировке прибора и положения штатива.

6. Повторное измерение направлений на Дм1 и Орп1, Орп2, Орп3, Орп4.

7. Изменение положения тахеометра (перестановка прибора на 1–3 см в плане и по высоте) для выполнения следующего цикла наблюдений.

При обработке результатов измерений значение ориентирующего угла вычислялось дважды для каждого цикла наблюдений по формулам определения ориентирующего угла:

$$\alpha_0' = \frac{[\sin(\alpha_{32}-\alpha_{31})\cdot\sin(N_3-N_2)\cdot\sin(\alpha_{21}-N_1)+}{[\sin(\alpha_{32}-\alpha_{31})\cdot\sin(N_3-N_2)\cdot\cos(\alpha_{21}-N_1)+}$$

$$\frac{+\sin(\alpha_{13}-\alpha_{12})\cdot\sin(N_2-N_1)\cdot\sin(\alpha_{23}-N_3)]}{+\sin(\alpha_{13}-\alpha_{12})\cdot\sin(N_2-N_1)\cdot\cos(\alpha_{23}-N_3)]};$$

$$\alpha_0'' = \frac{[\sin(\alpha_{42}-\alpha_{41})\cdot\sin(N_4-N_2)\cdot\sin(\alpha_{21}-N_1)+}{[\sin(\alpha_{42}-\alpha_{41})\cdot\sin(N_4-N_2)\cdot\cos(\alpha_{21}-N_1)+}$$

$$\frac{+\sin(\alpha_{14}-\alpha_{12})\cdot\sin(N_2-N_1)\cdot\sin(\alpha_{24}-N_4)]}{+\sin(\alpha_{14}-\alpha_{12})\cdot\sin(N_2-N_1)\cdot\cos(\alpha_{24}-N_4)]},$$

где

α_0' – значение ориентирующего угла, полученное из комбинации ориентирных пунктов Орп1, Орп2, Орп3;

α_0'' – значение ориентирующего угла, полученное из комбинации ориентирных пунктов Орп1, Орп2, Орп4;

α_i – дирекционный угол направления между ориентирными пунктами;

N_i – отсчет по горизонтальному кругу i-го направления.

Прямоугольные пространственные координаты деформационных марок (X_i, Y_i, Z_i) рассчитывались по формулам:

$$X_i = D_i\cdot\cos(\alpha_0+N_i);$$
$$Y_i = D_i\cdot\sin(\alpha_0+N_i);$$
$$Z_i = (L_i+R_i)\cdot\sin V_i;$$
$$D_i = (L_i+R_i)\cdot\cos V_i,$$

где

α_0 – среднее значение ориентирующего угла в каждом цикле наблюдений;

D_i – горизонтальное проложение до i-ой деформационной марки;

N_i – отсчет по горизонтальному кругу на контролируемую точку;

L_i – наклонное расстояние до i-ой деформационной марки;

R_i – радиус наблюдаемой i-ой деформационной марки;

V_i – вертикальный угол на i-ую деформационную марку.

Взаимное положение марок рассчитывалось в условной системе координат (УСК) с началом на опорной марке (Ом). В качестве Ом принималась Дм1 с координатами $(X_{\text{Ом}}, Y_{\text{Ом}}, Z_{\text{Ом}})$:

$$x_i = X_i - X_{\text{Ом}};$$
$$y_i = Y_i - Y_{\text{Ом}};$$
$$z_i = Z_i - Z_{\text{Ом}},$$

где

x_i, y_i, z_i – координаты i-ой деформационной марки в УСК.

Средняя квадратическая погрешность определения взаимного положения контрольных точек в УСК m_Δ рассчитывалась по формуле:

$$m_\Delta = \sqrt{\frac{\sum\varepsilon_i^2}{2(n-1)}},$$

где

ε – значение отклонений от средней разности двойных измерений [2];

n – количество измерений.

В ходе эксперимента выполнено 90 двойных измерений, содержащих 360 наведений на деформационные марки. Средняя квадратическая погрешность определяемых величин одним приемом по 90 двойным измерениям составила 0,6 мм.

Средняя квадратическая погрешность измерения направления одним приемом на ориентирные пункты по 80 отсчетам, выполненным в ходе определения ориентирующего угла, составила:

$$m_N = \frac{m_n}{\sqrt{2}} = 2{,}9''$$

где

m_n – СКП измерения направления полуприемом.

Средняя квадратическая погрешность ориентирующего угла m_{α_0}, рассчитанная по 20 разностям начальных и конечных значений в каждом цикле наблюдений, составила $1{,}62''$, что соответствует её ожидаемому значению.

Выводы

1. Определяемые величины получены со СКП 0,6 мм, что соответствует ожидаемой точности геодезических определений разработанной методики [1].

2. На реальных объектах измерения должны выполняться со стационарных наблюдательных столбов, поскольку штативы не обладают достаточной устойчивостью.

Литература

1. Волков, А. А. Особенности геодезического обеспечения стационарных антенных устройств системы предупреждения о ракетном нападении Войск воздушно-космической обороны / А.А. Волков // Материалы III Всероссийской науч. конф., Москва, 2015 г. – М.: РТИ Системы ВКО-2015. – С. 630–639.

2. Беликов, А. Б. Математическая обработка результатов геодезических измерений: учебное пособие / А.Б. Беликов, В.В. Симонян. – М.: МГСУ, 2015.–432 с.

3. Сергеев, Д. В. Основы единой методики комплексного геодезического контроля с применением косвенного ориентирования в процессе жизненного цикла РЛС ВЗГ / Д.В. Сергеев // Материалы II Всероссийской науч. конф., Москва, 2014 г. – М.: РТИ Системы ВКО-2014.– С. 345–354.

4. Козлов, Н. А. Общая теория косвенных способов геодезического и астрономического ориентирования / Н.А. Козлов. – МО СССР, 1979. – 153 с.

5. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов : учеб. пособие / Н.В. Голубева. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 192 с.