МЕТОД БЕЗОПОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Кухта Александр Всеволодович
Старший научный сотрудник Научно-исследовательской и проектно-производственной лаборатории «Проектирование и конструирование» МГСУ, старший научный сотрудник Фрязинского отделения Института радиотехники и электроники РАН, ассистент кафедры «Инженерная геодезия» МГСУ

Одним из этапов организации геодезических наблюдений является выбор опорных точек на существующих объектах или установка специальных геодезических знаков, которые могут быть использованы в качестве опорных точек. Наличие опорных точек позволяет при правильном их выборе и соответствующей обработке данных измерений обеспечить высокую точность определения изменения координат контролируемых точек.

Однако в ряде случаев такой подход к организации геодезических наблюдений оказывается технически невозможным и/или экономически нецелесообразным. В качестве примера можно привести задачу контроля состояния реконструируемого объекта в условиях масштабных работ в его окрестностях. Другим примером может быть задача наблюдения за геометрическими параметрами внутренних конструкций сооружения при отсутствии в зоне доступности заведомо неподвижных точек. И в том, и в другом случае организация опорной сети оказывается весьма затруднительной, если вообще осуществимой. Дополнительные проблемы при геодезических измерениях возникают в том случае, когда невозможно обеспечить неизменность точки стояния измерительного прибора при проведении разных циклов измерений. При наличии опорной сети координаты точки стояния могут корректироваться методом обратных засечек, но при ее отсутствии необходимо искать иные методы организации измерений и принципы обработки их результатов.

Предлагаемый ниже метод, который называется далее для определенности методом безопорных геодезических наблюдений или методом БГН, не предусматривает развертывания опорной геодезической сети и применим в том случае, когда от цикла к циклу координаты точки стояния измерительного прибора изменяется.

Предположим, что в результате проведения двух циклов измерений C_1 и C_2 получены два массива координат, контролируемых точек строительного объекта. Выбранные для контроля точки выделяются на строительном объекте закреплением отражательных марок или иным способом. Каждый из массивов описывает геометрические параметры строительного объекта через координаты точек, выбранных для наблюдения. Таким образом, в действительности объектом геодезических наблюдений является геометрический объект, представляющий собой совокупность контролируемых точек. Суть метода безопорных геодезических наблюдений (метод БГН) состоит в следующем:

- при проведении каждого цикла измерений используется собственная система координат, неизменная в течение данного цикла;
- выбор опорных точек осуществляется на этапе анализа, при этом в зависимости от целей текущего анализа могут выбираться разные совокупности опорных точек; для того, чтобы избежать путаницы, далее по тексту будем называть опорные точки, выбираемые на этапе анализа, *базовыми опорными* точками или просто *базовыми* точками;
- после выбора совокупности базовых точек отыскивается преобразование координат, которое обеспечивает наилучшее, в заданном смысле, совмещение одноименных базовых точек анализируемых циклов и вычисляется значение параметра совмещения;
- на основе заданного статистического критерия и с учетом значения параметра совмещения оценивается «качество» выбранной совокупности базовых точек, и при необходимости состав базовых точек корректируется;
- найденное преобразование координат применяется ко всем контролируемым точкам;
- разности координат одноименных точек характеризуют смещения контролируемых точек за период между циклами измерений.

Таким образом, основной особенностью предлагаемого метода является принципиальное отсутствие на этапе измерения выделенных (опорных) точек. Все точки, включая точку стояния измерительного прибора, являются равноправными. Выбор системы координат в этой ситуации становится формальной процедурой и определяется, главным образом, соображениями удобства. Существенным обстоятельством является неизменность координат контролируемых точек, а также точки стояния измерительного прибора за время проведения цикла измерений. Проверке справедливости такого предположения следует уделять особое внимание.

Рассмотрим более подробно математический аспект предлагаемого метода. Пусть в результате двух циклов измерений, проведенных через промежуток времени T получены два массива координат контролируемых точек $C_1 = \{X_{1i},\ Y_{1i}, Z_{1i}, \}$ и $C_2 = \{\ X_{2i},\ Y_{2i}, Z_{2i}\}$. Предположим, что в качестве массива опорных точек выбран массив $C_{12} = \{X_{1k}, X_{2k}, Y_{1k}, Y_{2k}, Z_{1k}, Z_{2k}\}$, состоящий из 2K точек. В качестве параметра совмещения выберем среднее расстояние между одноименными базовыми точками, $\overline{L} = \frac{1}{K}\sum_{1}^{K} L_k$, где $L_k - \sqrt{(X_{2k} - X_{1k})^2 + (Y_{2k} - Y_{1k})^2 + (Z_{2k} - Z_{1k})^2}$. Пусть преобразование координат, описываемое оператором $\ddot{A}$, минимизирует значение $\overline{L}$.

Для множества $L - \{L_k\}$, полученного в результате минимизации $\overline{L}$, могут быть получены такие его статистические характеристики, как выборочная дисперсия $D(Lk)$ среднеквадратичное отклонение $S(Lk)$, асимметрия $A(Lk)$ и эксцесс $E(Lk)$:

$$D(Lk) = \frac{\sum_1^K (Lk - \bar{L})^2}{(K-1)}$$

$$S(Lk) = \sqrt{D(Lk)};\ A(Lk) = \frac{1}{(K-1)S^3}\sum_1^K \left(Lk - \bar{L}\right)^3;\ E(Lk) = \frac{1}{(K-1)S^4}\sum_1^K \left(Lk - \bar{L}\right)^4 - 3.$$

Считая Lk случайной величиной, можно построить гистограмму распределения для этой величины. На основе сравнения с полученной гистограммой выбирается наиболее подходящий теоретический вид распределения. Для оценки правильности подбора теоретического распределения используется тот или иной критерий согласия.

После выбора теоретического распределения появляется возможность выделить точки, смещения которых нельзя считать принадлежащими выбранной статистике, и которые, по этой причине, не следует использовать в качестве базовых. Такие точки подлежат отбраковке, а описанная процедура повторяется еще раз. Детальный анализ статистических характеристик величины Lk может дать дополнительную информацию об особенностях выбранных базовых точек, например, о совместном смещении групп точек.

Если при соответствующем выборе множества C_{12} все выбранные точки множества $L - \{Lk\}$ могут быть описаны единой статистикой, характеризующейся нормальным распределением, то, определенные в рамках этой статистики стандартное $S(Lk)$, следует сравнить с паспортной точностью измерительного прибора или с оценкой точности измерений, принимаемой для данного эксперимента. Если $S(Lk)<S_0$, то в пределах точности измерений можно считать, что конфигурация выбранных базовых точек остается неизменной (точки смещаются как единое целое). Применив преобразование $\hat{A}$ ко всему множеству C_2 контролируемых точек, получим множество $C_P - \{X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}\}$. Вычисляя смещения $\Delta X - X_{Pi} - X_{1i}$, $\Delta Y = Y_{Pi} - Y_{1i}$ и $\Delta Z = Z_{Pi} - Z_{1i}$ можно получить информацию о перемещениях контролируемых точек конструкции в системе координат, связанной с выбранными базовыми точками за промежуток времени T.

Выбор в качестве параметра совмещения среднего расстояния между одноименными базовыми точками не является единственно возможным. Исходя из особенностей задач анализа, в качестве параметра совмещения могут быть выбраны и другие величины. Так, например, большой интерес представляет выбор в качестве параметра совмещения коэффициента кросс корреляции для массивов одноименных опорных точек, а также анализ кросс корреляции для полных массивов C_1 и C_2.