УДК 528.11

Б.Н.ДЬЯКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ОБ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

Надежность геодезических сетей рассматривается в статье с позиций ее практического применения. Предлагается расширить понятие «надежность геодезической сети», а именно: считать основным параметром надежности саму возможность или невозможность обнаружения грубой ошибки в каждом измерении без исключения. Показана роль метода обнаружения грубых ошибок; утверждается, что из всех известных методов поиска грубых ошибок измерений только метод наложения графиков поправок дает максимально полную информацию о грубых ошибках измерений в конкретной геодезической сети.

Reliability of a geodetic network is discussed in article from positions of its practical application. It is offered to expand the concept «reliability of a geodetic network», namely to consider the basic parameter of reliability a opportunity or impossibility to locate a gross blunder in each separate measurement. The role of a method of detection of gross blunders is shown; affirms, that from all known methods only the method of imposing of shedules of amendments gives the most full information on gross blunders of measurements in a concrete geodetic network.

Понятие надежности геодезической сети связано с возможностями сети реагировать на факторы, искажающие картину нормального распределения ошибок измерений, т.е., на грубые или систематические ошибки измерений. «Различают внутреннюю надежность (контролируемость сети от искажающих факторов) и внешнюю надежность (как показатель влияния невыявленных малых помех на оценки параметров и их функций)» [4, с.134]. Как видно из этого определения, показатели надежности геодезической сети не менее важны, чем показатели точности сети, однако в инструкциях по построению и плановых и высотных сетей пока нет перечня параметров надежности и допусков на их значения. По нашему мнению, для практического использования показателей надежности следует решить несколько вопросов.

Прежде чем исследовать надежность геодезической сети, нужно установить, может ли быть обнаружена в данной сети грубая ошибка одного любого измерения; если нет, то сама постановка вопроса о надежности сети в целом теряет смысл. По нашему мнению, для определенного ответа на этот вопрос следует ввести понятие «параметр надежности первой степени», который бы показывал, в скольких измерениях из n (n – общее количество измерений в сети) может быть обнаружена одна грубая ошибка. Этот параметр выражается обыкновенной дробью, например, 5/9. Это означает, что в геодезической сети всего девять измерений, и грубая ошибка с помощью какого-либо теста может быть обнаружена только в пяти измерениях; грубая ошибка в остальных четырех измерениях не может быть локализована никакими тестами. Если обозначить параметр надежности первой степени через P_1, то показатели внутренней надежности всех измерений в сети имеет смысл вычислять только при условии $P_1 = 1$.

В работе [5, с.189] сказано, что если диагональный элемент G-матрицы сети, соответствующий i-му измерению, равен нулю ($g_{i,i} = 0$), то грубая ошибка в этом измерении не может быть обнаружена. Такая ситуация соответствует измерению, не участвующему в уравнивании сети (например, примычному углу в замкнутом линейно-угловом ходе, либо измерению, имеющему бесконечно большой вес). В реальных сетях эти ситуации встречаются чрезвычайно редко, но зато давно известны ситуации, когда

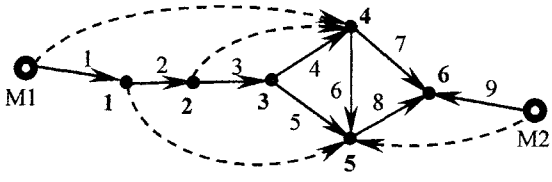


Схема нивелирной сети [1]

грубая ошибка какого-либо измерения действительно не может быть обнаружена никакими средствами, хотя диагональный элемент этого измерения далеко не равен нулю. Так, например, нивелирная сеть, схема которой приведена на с.138 работы [4], имеет параметр надежности равный 5/9, так как грубая ошибка ни в первом, ни во втором, ни в третьем, ни в девятом превышениях не может быть обнаружена никакими тестами независимо от ее значения (см. рисунок). В этой сети два исходных репера М1 и М2, шесть определяемых реперов (1, 2, 3, 4, 5, 6) и девять нивелирных линий, по которым измерены превышения. Однако в табл.23 на с.138 работы [4] приведены показатели внутренней надежности этой сети и написано, что «грубая ошибка t_i в первом превышении, равная менее 7,6 см, не может быть выявлена при уравнивании. Если ошибка имеет место, то $t_i > 7{,}6$ см может быть обнаружена с вероятностью 0,80» (имеется в виду рекуррентный способ уравнивания).

В нивелирных сетях с параметром $P_1 = 1$ от исходных реперов должны отходить не менее двух ходов, а в каждом определяемом репере должны сходиться не менее трех ходов. Чтобы параметр P_1 сети, приведенной на рисунке, стал равным единице, нужно добавить к ней четыре нивелирные линии (на рисунке показаны штрихами); только после этого показатели внутренней надежности можно вычислять для всех 13 измеренных превышений.

В работе [2] при проектировании оптимальной по точности и надежности нивелирной сети один репер (номер 12) не удовлетворяет условию надежности, поскольку в нем сходится всего два хода (см. рис.4 работы [2]); эту сеть необходимо дополнить еще одним нивелирным ходом от репера 12 либо до репера 11, либо до репера 7, либо до репера 8.

Аналогичная ситуация имеет место и в работе [1], где вычисляются показатели внутренней надежности для измеренных сторон прямолинейного полигонометрического хода (схема 1 работы [1]), хотя давно известно, что грубая ошибка в любой стороне прямолинейного хода обнаружена быть не может (в работе [1] такая ошибка размером более 12 см уже обнаруживается).

Эти и другие подобные им примеры показывают, что формальный подход к оценке надежности геодезических сетей может привести к ошибочным выводам.

Подобно параметру P_1 можно ввести понятие «параметр надежности второй степени P_2», который бы показывал возможность обнаружения в геодезической сети всех комбинаций по две грубые ошибки, «параметр P_3» – всех комбинаций по три грубые ошибки и так далее. Данная проблема, конечно же, требует дополнительных исследований, особенно для ответственных геодезических сетей, в которых надежность результатов обработки измерений имеет первостепенное значение.

Второй важный вопрос – какую методику следует использовать для уверенного поиска грубых ошибок измерений? К настоящему времени разработано достаточно много способов локализации одной и более грубых ошибок измерений, применяя которые можно значительно ослабить (а иногда и почти полностью исключить) влияние грубых ошибок на результаты уравнивания.

Из всех известных нам методов поиска грубых ошибок наиболее «мощным» и в теоретическом и в практическом отношении является, на наш взгляд, метод наложения графиков поправок (МНГП), краткое описание которого дано в работе [3]. В этом методе последовательно проверяется гипотеза о присутствии грубых ошибок во всех возможных комбинациях по s измерений из n. Величина s сначала принимается равной 1, затем 2, затем 3 и так далее, пока не будет обнаружена искомая комбинация ошибочных измерений.

Для каждой комбинации составляются s уравнений, линейных относительно неизвестных истинных ошибок измерений. Ко-

эффициенты при неизвестных в левой части уравнений суть соответствующие элементы G-матрицы, а правая часть – это поправки V, полученные при уравнивании сети методом наименьших квадратов. Например, для комбинации трех измерений с номерами i, j, k система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} g_{i,i}\Delta_i + g_{i,j}\Delta_j + g_{i,k}\Delta_k &= -V_i; \\ g_{j,i}\Delta_i + g_{j,j}\Delta_j + g_{j,k}\Delta_k &= -V_j; \\ g_{k,i}\Delta_i + g_{k,j}\Delta_j + g_{k,k}\Delta_k &= -V_k. \end{aligned} \qquad (1)$$

Сначала из решения системы уравнений (1) вычисляют истинные ошибки $\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k$, затем для всех n измерений находят приведенные поправки по формуле

$$\varepsilon_t = V_t + g_{t,i}\Delta_i + g_{t,j}\Delta_j + g_{t,k}\Delta_k, \qquad (2)$$

где t изменяется от 1 до n.

График величин $(-g_{t,i}\Delta_i - g_{t,j}\Delta_j - g_{t,k}\Delta_k)$ накладывается на базовый график поправок из уравнивания V и подсчитывается среднее квадратическое несовпадение графиков по всем n точкам:

$$\delta = \sqrt{[p_t\varepsilon_t^2]/n}. \qquad (3)$$

Поскольку приведенные поправки ε_i в границах проверяемой гипотезы представляют собой случайные составляющие поправок V_i, для величины δ существует допуск

$$\delta_0 = \mu_0\sqrt{r/n}, \qquad (4)$$

где μ_0 – проектное значение ошибки единицы веса; r – количество избыточных измерений в сети.

Если условие $\delta \le \delta_0$ выполняется, то гипотеза о наличии грубых ошибок в измерениях с номерами i, j, k подтверждается; в противном случае гипотеза отвергается.

Если условию $\delta \le \delta_0$ удовлетворяет больше одной комбинации ошибок, то вектору поправок V соответствует несколько альтернативных комбинаций грубых ошибок измерений, и для выделения одного наиболее вероятного решения необходимо использовать дополнительную информацию (например, о невязках условных уравнений и т.п.). Если определитель системы уравнений (1) для какой-либо комбинации измерений равен нулю, то это означает, что данную комбинацию грубых ошибок невозможно локализовать вообще.

Принципиальным отличием МНГП от большинства способов поиска грубых ошибок является вычисление и оценка истинных ошибок измерений. Другим, не менее важным отличием является способность МНГП обнаруживать все альтернативные комбинации грубых ошибок, соответствующие вектору поправок V. Так, при тестировании нивелирной сети, изображенной на рисунке, получается четыре альтернативных решения для всех четырех вариантов расположения одной грубой ошибки либо в первом, либо во втором, либо в третьем, либо в девятом превышении. Третье отличие – выявление всех комбинаций измерений, в которых грубая ошибка не может быть обнаружена в принципе; это позволяет еще на стадии проектирования строить геодезические сети с параметрами надежности, равными единице.

Кроме того, алгоритм МНГП легко программируется, и при параметрическом способе уравнивания выходные данные программы уравнивания являются входными данными программы МНГП.

И, наконец, следует определиться с самим понятием «грубая ошибка измерения». Традиционное определение грубой ошибки как случайной ошибки, значение которой по абсолютной величине превышает допуск tm (где m – средняя квадратическая ошибка измерения, t – коэффициент, равный 2,0; 2,5 или 3,0), для поиска грубых ошибок является недостаточно четким. При нормальном распределении случайных ошибок измерений в интервал от $-m$ до $+m$ попадает 68,3 % ошибок; в интервал от $-2m$ до $+2m$ попадает 95,4 % ошибок и в интервал от $-3m$ до $+3m$ – 99,7 % ошибок. Поэтому в небольших по размеру сетях, имеющих достаточно большое количество избыточных измерений, с помощью МНГП можно попытаться оценить истинные ошибки до уровня $2{,}5m$. Для этого нужно уравнять сеть и выполнить тестирование ее по МНГП на одну и две грубые ошибки при уменьшенном значении

ошибки единицы веса по сравнению с проектным ее значением. При этом все обнаруженные комбинации «грубых ошибок» расположатся по возрастанию абсолютных значений ошибок, и можно ожидать, что вычисленные значения одной или двух наибольших по абсолютной величине ошибок будут близки к их действительным значениям.

Таким образом, решение перечисленных вопросов должно способствовать внедрению в геодезическую практику показателей надежности геодезических построений на уровне требований соответствующих инструкций. Решающая роль в этом процессе принадлежит, по нашему мнению, тестированию этих построений с помощью метода наложения графиков поправок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вагин В.А.* Исследования по надежности полигонометрических ходов и сетей // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1990. № 1. С.3.

2. *Вагин В.А.* Оптимизация геодезических сетей по критериям точности и надежности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1992. № 1. С.25.

3. *Дьяков Б.Н.* Поиск грубых ошибок измерений методом наложения графиков поправок / Б.Н.Дьяков, Ю.В.Родионова // Геодезистъ. 2002. № 5.

4. *Маркузе Ю.И.* Основы уравнительных вычислений: Уч. пос. для вузов. М.: Недра, 1990.

5. *Маркузе Ю.И.* Геодезия. Вычисление и уравнивание геодезических сетей: Справочное пособие / Ю.И.Маркузе, Е.Г.Бойко, В.В.Голубев. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1994.