Повышение точности определения азимутов с использованием гиротеодолитных комплектов

Improving the azimuth accuracy by using gyrotheodolite sets

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),
преподаватель кафедры высшей геодезии.
г. Санкт-Петербург

Кокорев / Kokorev A.
Андрей Валерьевич
(litinskij1990@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
начальник лаборатории –старший бортовой оператор.
г. Санкт-Петербург

Сенин / Senin V.
Виктор Дмитриевич
(4ern86@bk.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
доцент кафедры высшей геодезии.
г. Санкт-Петербург

Литинский / Litinskiy E.
Евгений Игоревич
(litinskij1990@mail.ru)
ВКА им. А. Ф. Можайского,
адъюнкт.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: азимут – azimuth; автономное ориентирование – autonomous orientation; высокоточное ориентирование – high-precision orientation; оперативное ориентирование – operating orientation; гиротеодолит – gyrotheodolite; гирокомпас – gyro compass; схемы ориентирования – orientation diagrams.

В случаях гироскопического ориентирования с точностями менее 10'' определение азимута выполняется гиротеодолитными комплектами по следующим схемам: ориентирование по створу; ориентирование по обратным направлениям; ориентирование по связующим направлениям; ориентирование комбинацией угловых и гироскопических измерений. Проведены исследования для выявления схемы, наиболее подходящей для высокоточного ориентирования. Результатом исследования явились рекомендации по высокоточному ориентированию с применением комплектов гиротеодолитов.

For gyroscopic orientation with the accuracy less 10'', the azimuth is calculated by means of gyrotheodolite sets, using the following procedures: line orientation; orientation by backward directions; orientation by linking directions; orientation by combination of angular and gyroscopic measurements. R&D efforts have been made to find the most suitable scheme for high-precision orientation. The findings allows to give recommendations for high-precision orientation with the use of gyrotheodolite sets.

При определении азимутов и дирекционных углов традиционно используются два подхода. Это ориентирование одиночным гиротеодолитом и ориентирование с применением гиротеодолитного комплекта (ГТК). Для того чтобы исключить промахи в измерениях при работе с одиночными гиротеодолитами, ориентирование направлений, как правило, производят минимум двумя пусками. В связи с тем, что приборная поправка гиротеодолита изменяется в процессе эксплуатации прибора, ориентирование направлений одиночными гиротеодолитами без принятия специальных мер будет бесконтрольным. В этом случае увеличение числа измерений (пусков) на определяемом пункте не гарантирует освобождение от ошибок в конечных азимутах. Такие ошибки возможны из-за недопустимого изменения приборной поправки гиротеодолита между эталонированиями. При определении азимутов и дирекционных углов одиночными приборами контроль стабильности приборной поправки гиротеодолита производят следующими способами [1, 2]:

– периодическим ориентированием контрольного направления, азимут которого получен другим гиротеодолитом или известен;

– эталонированием гиротеодолита в данном районе непосредственно перед и сразу же после ориентирования направления.

В первом случае о стабильности приборной поправки судят по результатам ориентирования контрольного направления. Поправку для исправления азимутов на определяемых направлениях получают из невязки,

2 2018.indd 101 04.07.2018 14:25:53

полученной по контрольному направлению в начале и конце контролируемого периода. Когда азимут контрольного направления получен с достаточно высокой точностью, его принимают в качестве эталонного.

Во втором случае в целях экономии времени и моторесурса гиротеодолита определение приборной поправки производят по сокращённой программе. Вывод конечных значений азимутов делают по среднему значению приборных поправок, полученных в районе работ, до и после наблюдений. Подобная методика определения азимутов и дирекционных углов распространена, например, в маркшейдерской практике.

Согласно заводской документации для каждого гиротеодолита определена СКО определения азимута одним пуском $m_{гир}$ (при исследовании группы гиротеодолитов (гирокомпасов) на эталонных азимутах значение $m_{гир}$ получают эмпирически). При увеличении числа пусков случайная составляющая ошибки определяемого азимута по теоретическим расчётам уменьшиться в $n^{1/2}$, где n – количество пусков [1, 2], а систематическая останется практически неизменной. Теоретически рассчитанная СКО определения азимута n пусками приведена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что после 2–4 пусков результирующая СКО изменяется незначительно. Таким образом, затраченный временной и моторесурс будут неоправданы по сравнению с полученным улучшением СКО. Можно сделать вывод, что оптимальное количество пусков при ориентировании одним гиротеодолитом составит 2–4. При 2–4 пусках одним прибором результирующая СКО теоретически составит $0{,}75m_{гир}$–$0{,}5m_{гир}$. Однако в результате эмпирических исследований (Ги-Б2) показано [1, 2], что СКО ориентирования при двух пусках составит $0{,}85m_{гир}$, при трёх и четырёх пусках составит $0{,}75m_{гир}$ и $0{,}7m_{гир}$ соответственно, а при увеличении числа пусков до 9–12 (при эталонировании) СКО ориентирования составляет около $0{,}5m_{гир}$ [1, 2].

Для современных гиротеодолитов и гирокомпасов $m_{гир}$ составляет 3''. Для перспективных гирокомпасов $m_{гир}$=1,5''. Опираясь на эмпирические исследования [1, 2], получено, что в случае эталонирования (9–12 пусков), при достаточных точностях эталонных азимутов, СКО приборной поправки $m\Delta$ составит порядка 1,5'' и 0,8'' соответственно. СКО ориентирования одним гиротеодолитом при трёх пусках $m_{гирn}$ составит порядка 2,3'' имеющимися гиротеодолитами (гирокомпасами) и перспективными порядка 1,1''.

Можно сделать вывод, что максимально достигаемая точность ориентирования одиночным гиротеодолитом достигается при 9–12 пусках и составит примерно треть от $m_{гир}$. Временные затраты при этом составят около 12 часов на эталонирование по сокращённой программе до и после определения азимута и около 9–12 часов на непосредственные измерения азимутов на ориентируемом направлении. Суммарно для повышения точности ориентирования одиночным гиротеодолитом на треть потребуются сутки, что крайне невыгодно.

Второй подход при определении азимута гиротеодолитами предполагает ориентирование с применением ГТК. Под ГТК понимается группа из N гиротеодолитов. Применение при ориентировании ГТК позволяет быстро выявить промахи в измерениях, ослабить влияние ошибок измерений и ошибок, обусловленных нестабильностью приборных поправок и ошибок их определения. В случае применения ГТК систематические ошибки каждого гиротеодолита (изменение приборной поправки, дрейф и т.д.) в сумме приобретают частично стохастический характер для всего ГТК. Следовательно, для ГТК результирующая ошибка ориентирования уменьшится примерно в $N^{1/2}$, где N – количество приборов в комплекте. Это аналогично зависимости СКО определения азимута от количества пусков одиночным прибором (рис. 1). Из вышеописанного можно сделать вывод, что минимальное количество гиротеодолитов в комплекте – 2. Использование более 4 гиротеодолитов в комплекте не приведёт к существенному повышению точности ориентирования.

Определение азимутов с применением ГТК выполняется по следующим схемам [2, 3]:

– ориентирование по створу;

– ориентирование по обратным направлениям;

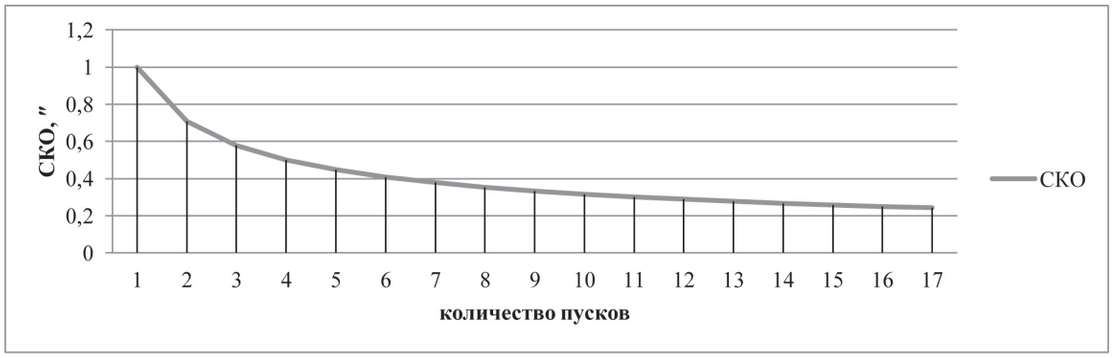

Рис. 1. Зависимость СКО определения азимута от количества пусков

2 2018.indd 102 04.07.2018 14:25:53

– ориентирование по связующим направлениям;

– ориентирование комбинацией угловых и гироскопических измерений.

Ориентирование по створу. При работе по этой схеме точку установки второго гиротеодолита намечают по створу одного из направлений, подлежащих ориентированию, выбирая её в 2–3 метрах впереди или сзади от центра пункта, над которым развёртывают первый гиротеодолит комплекта. Вычисления начинают с перевода азимута или дирекционного угла второго направления в створ первого.

После чего определяется невязка W. Невязка W вычисляется как разность дирекционных углов или геодезических азимутов створного направления.

Следует отметить, что дополнительно:

– перед уравниванием необходимо привести все измеренные азимуты к центру одного пункта (дополнительно измерить нестворность и получить расстояние до ориентирных пунктов (ОРП));

– поправки вводятся равномерно;

– схема проста и удобна в реализации;

– не требуется наличие радиосвязи;

– достаточно одного автомобиля на ГТК.

Ориентирование по обратным направлениям. Ориентирование по обратным направлениям применяется, когда по тем или иным причинам невозможно установить один из гиротеодолитов комплекта непосредственно над центром пункта. В этих условиях приборы комплекта выставляют рядом друг с другом на удалении 150–200 м от центра пункта, над которым устанавливается обычный теодолит с визирной вешкой, укреплённой на его мостике. Одновременно с измерением гиротеодолитами азимутов направлений на этот теодолит им измеряют углы β между направлениями на визирные вешки гиротеодолитов и конечные пункты ориентируемых направлений.

Для получения прямых азимутов необходимо учитывать сближение меридианов δγ, проходящих через центр пункта и точку установки гиротеодолита.

Величину δγ допустимо не учитывать, если гиротеодолиты установлены примерно в меридиане ($\Delta Y = D\sin A\Gamma_{ij} \leq 10$ м, для широты порядка 45°). Строгая обработка результатов измерений должна предусматривать совместное уравнивание полученных из гироскопических определений дирекционных углов или геодезических азимутов направлений на гиротеодолиты и измеренного теодолитом угла между ними. При значительном превосходстве точностей угловых измерений над гироскопическими допустимо не прибегать к такому решению и полагать, что получаемые невязки целиком относить к погрешностям гироскопических определений [1].

Следует отметить, что:

– достаточно одного автомобиля на ГТК;

– необходимо наличие радиосвязи между расчётами.

– для получения прямых азимутов необходимо учитывать сближение δγ меридианов.

Ориентирование по связующим направлениям. При ориентировании направлений по этой схеме гиротеодолиты комплекта устанавливаются над центрами пунктов, имеющих между собой прямую видимость с земли. Эту схему выгодно применять в тех случаях, когда одновременно требуется ориентировать направления на ряде соседних пунктов. Для оперативной обработки результатов измерений и установления четкого взаимодействия гиротеодолитные комплекты должны иметь средства радиосвязи.

Иногда для ускорения работы и повышения точности ориентирования направлений к оперативному выполнению задания в районе определений привлекают одновременно не две, а три и даже четыре гиротеодолитные группы.

При двух гиротеодолитах, установленных на двух пунктах, связанных взаимными наблюдениями, измерения на одном из них будут избыточными, что позволяет составить одно условное уравнение поправок.

Следует отметить, что перед уравниванием азимуты приводятся на плоскость (т.е. преобразуются в дирекционные углы).

Ориентирование комбинацией угловых и гироскопических измерений. К рассматриваемой схеме, основанной на сочетании угловых и гироскопических измерений, прибегают в тех случаях, когда необходимо ориентировать направления на большом числе пунктов, не имея возможности сделать это гиротеодолитами на каждом из них. С этой целью все такие пункты связывают между собой угловыми ходами, а иногда и их системами с узловыми точками и на части пунктов азимуты (дирекционные углы) направлений получают из гироскопических измерений. При надлежащей организации работ и взаимодействии между командами, занимающимися проложением угловых ходов и гироскопическими измерениями, такая схема ориентирования позволяет сравнительно быстро обеспечить нужный район исходными направлениями.

В практике работ наибольшее распространение получил случай, когда для определения ориентирных направлений на ряде пунктов прокладывается одиночный угловой ход, связывающий эти пункты. На конечных пунктах этого хода дирекционные углы примычных направлений получают из гироскопических измерений, выполненных различными гиротеодолитами комплекта.

Следует отметить, что:

– необходимо дополнительное время для рекогносцировки для проложения углового хода.

– не достаточно одного автомобиля на ГТК;

– не требуется наличие радиосвязи между расчётами;

– полученные азимуты для уравнивания необходимо пересчитывать в дирекционные углы;

– необходимо задействовать дополнительное транспортное средство и расчёт для проложения углового хода.

2 2018.indd 103 04.07.2018 14:25:53

Априорная оценка точности азимута полученного при применении комплекта из *N* гиротеодолитов. Как было показано ранее, в случае применения ГТК систематические ошибки каждого гиротеодолита (изменение приборной поправки, дрейф и т.д.) в сумме приобретают частично стохастический характер для всего ГТК, что аналогично зависимости СКО определения азимута от количества пусков одиночным прибором (рис. 1). Также доказано, что минимальное количество гиротеодолитов в комплекте – 2. Использование более 4 гиротеодолитов в комплекте не приведёт к существенному повышению точности ориентирования. Примем количество ГТ в ГТК равным трём. Пусть каждый гиротеодолит (гирокомпас) комплекта эталонировался на одном и том же эталоном направлении в примерно одинаковых метеорологических условиях одинаковым количеством пусков. Тогда приборные поправки этих гиротеодолитов будут получены с равной СКО.

Одним из способов априорного оценивания СКО после уравнивания измерений является вычисление СКО ориентирования как отношения вида [4]:

$$m^2 = \mu^2 / P \qquad (1)$$

где μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса;

P – вес определяемого азимута (*P=n/k, n* – количество полученных измерений, *k* – количество необходимых измерений).

Для оценки достигаемых точностей рассчитаем μ для каждой схемы ориентирования. Если при ориентировании по створу пренебречь ошибками приведения азимутов в створ определяемого направления, то получим $\mu = m_{гирп}$.

Для удобства расчётов примем *mгирп* одинаковой для каждой схемы ориентирования. Кроме того, примем ошибки пересчета обратных азимутов в прямые и приведения азимутов в створ пренебрежимо малыми. Тогда, согласно формуле (1), ожидаемая СКО определения азимутов ГТК по приведённым схемам ориентирования, будет различаться только на величину *P=n/k*.

Следовательно:

для ориентирования по створу для ГТК из трёх гиротеодолитов *P* = 3;

для ориентирования по обратным направлениям для ГТК из трёх гиротеодолитов *P*= 3/2= 1,5;

для ориентирования по связующим направлениям для ГТК из трёх гиротеодолитов *P*= 6/3=2;

для ориентирования комбинацией угловых и гироскопических измерений для ГТК из трёх гиротеодолитов *P*= 4/3=1,3.

Таким образом, из априорных расчётов видно, что наиболее выгодной схемой ориентирования является ориентирование по створу. Несущественно ей уступает только схема ориентирования по связующим направлениям. Но обработка и вычисление результирующих азимутов при ориентировании ГТК по створной схеме осложняется необходимостью приведения азимутов в створ. Для этого в измеренные азимутов вводятся поправки. При остальных схемах ориентирования обязателен учёт поправок за сближение меридианов. Для исключения указанных дополнительных вычислений предлагается использовать «микросхемы». Расстояния между гиротеодолитами комплекта должно обеспечивать визирование внутри схемы автоколлимационным методом и незначительную величину поправок за сближение меридианов. Дополнительно автоколлимационный метод обеспечит повышение точности наведения в два раза. Такой подход позволит:

– существенно сократить время рекогносцировки и время развёртывания ГТК;

– существенно облегчит взаимодействия между расчётами;

– разгрузить полевые и камеральные вычисления.

В итоге описанный подход существенно упростит и облегчит процесс наблюдений, повысит его скрытность и оперативность. Использование ГТК позволит проконтролировать стабильность приборной поправки гиротеодолитов комплекта, а значит и качество измерений.

Из описанного можно сделать вывод, что наибольшее повышение точности определения азимутов достигается при ориентировании по створу и по связующим направлениям с визированием внутри схемы автоколлимационным методом. Именно эти схемы целесообразно применять при высокоточном ориентировании.

При ориентировании с применением ГТК целесообразно один из гиротеодолитов устанавливать над центром определяемого пункта. Выбор мест установки остальных гиротеодолитов комплекта зависит от условий местности, заданных сроков выполнения наблюдений и требуемой точности ориентирования.

Литература

1. Воронков, Н. Н., Гироскопическое ориентирование / Н.Н. Воронков – М.: «ВИА», 1968. – 342 с.

2. Воронков, Н. Н., Гироскопическое ориентирование / Н.Н. Воронков, В.В. Кутырев, Н.М. Ашимов. – М.: «Недра», 1980. – 295 с.

3. Чернов, И. В. Метод оперативного определения высокоточного азимута с использованием интегрированной спутниково-гироскопической системы / И.В. Чернов, Е.И. Литинский, Ю.В. Левадный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2017. – Т. 1, № 1 (29). – С. 4–12.

4. Русяева, Е. А. Теория математической обработки геодезических измерений: Часть I. Теория ошибок измерений / Е.А. Русяева. – М.: МИИГАиК, 2016. – 56 с.

2 2018.indd 104 04.07.2018 14:25:53