

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

А.Г. Малков

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ. ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Утверждено редакционно-издательским советом академии в качестве учебно-методического пособия для студентов специальностей «Прикладная геодезия», «Астрономогеодезия», «Космическая геодезия», «Аэрофотогеодезия»

Новосибирск
СГГА
2011

УДК 528.2
М18

Рецензенты:
доцент НГАСУ П.Н. Губонин
кандидат технических наук, профессор СГГА В.А. Падве

Малков, А.Г.

М18 Высшая геодезия. Высокоточные измерения [Текст]: учеб.-метод. пособие / А.Г. Малков. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 46 с.

ISBN 978-5-87693-469-7

Учебно-методическое пособие подготовлено кандидатом технических наук, профессором кафедры высшей геодезии СГГА А.Г. Малковым. Одобрено кафедрой и рекомендовано к изданию Ученым советом Института геодезии и менеджмента.

В пособии рассматриваются основные методы высокоточных измерений направлений, углов, зенитных расстояний и превышений по определению взаимного пространственного положения объектов на поверхности Земли. Пособие предназначено для студентов 2-го и 3-го курсов очного обучения специальностей «Прикладная геодезия», «Астрономогеодезия», «Космическая геодезия», «Аэрофотогеодезия», а также для заочного и дистанционного обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

УДК 528.2

ISBN 978-5-87693-469-7

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Методика высокоточных угловых измерений и их обработка.....	5
1.1. Способы измерения горизонтальных направлений и углов, их теоретическое обоснование, достоинства и недостатки.....	5
1.1.1. Способ круговых приемов.....	6
1.1.2. Способ измерения горизонтальных углов во всех комбинациях.....	9
1.2. Способ круговых приемов: методика, контроль и обработка результатов измерений.....	13
1.3. Способ измерения горизонтальных углов во всех комбинациях: методика, составление рабочей программы, контроль и обработка результатов измерений.....	15
1.4. Определение элементов центрировки.....	18
2. Тригонометрическое нивелирование.....	22
2.1. Сущность метода тригонометрического нивелирования.....	22
2.2. Методика измерений зенитных расстояний, контроль результатов.....	24
2.3. Определение высоты инструмента и знака над центром пункта ...	25
3. Высокоточное геометрическое нивелирование.....	28
3.1. Сущность метода геометрического нивелирования.....	28
3.2. Методика измерений превышений, контроль на станции.....	30
Библиографический список.....	33
Приложение 1.....	34
Приложение 2.....	36
Приложение 3.....	37
Приложение 4.....	38
Приложение 5.....	40
Приложение 6.....	41

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое внедрение в геодезическое производство спутниковых методов определения координат наземных пунктов, существующие традиционные методы измерения углов, линий, зенитных расстояний и превышений не утратили своего значения. Построение сетей сгущения в городах и на объектах специального назначения не обходится без использования указанных методов измерений. К тому же, для реализации высокоточного дифференциального режима измерений спутниковыми системами необходимо иметь точные координаты нескольких пунктов, определенных обычными геодезическими методами.

Следует также отметить, что спутниковые методы не дают высокой точности определения нормальных высот определяемых пунктов и пока не могут заменить традиционное высокоточное геометрическое нивелирование. В то же время следует отметить отсутствие необходимой учебной литературы по данной тематике, так как инструкция по созданию опорных сетей [1] была выпущена еще в 1966 г., после того не обновлялась и в настоящее время является библиографической редкостью.

В связи с указанными причинами выпуск данного учебно-методического пособия является вполне обоснованным. Пособие будет широко использоваться как для очного, так и для заочного и дистанционного обучения.

1. МЕТОДИКА ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

1.1. Способы измерения горизонтальных направлений и углов, их теоретическое обоснование, достоинства и недостатки

Под методикой высокоточных угловых измерений понимается комплекс работ, выполняемых на пунктах геодезических сетей с целью определения их планового положения. К ним относятся:

- Выбор способа измерений и их производство;
- Обработка результатов измерений и оценка их качества;
- Определение элементов центрировки в случае несовпадения проекции центра инструмента и центра пункта.

Рассмотрим более подробно указанные этапы производства высокоточных угловых измерений.

При выполнении разного рода геодезических работ, связанных с определением планового положения объектов на поверхности Земли, широко используются два классических способа измерения горизонтальных направлений и углов, применяемых в разных геодезических построениях для решения указанной задачи. К ним относятся: способ круговых приемов и способ измерения отдельных углов во всех комбинациях. В силу их особенностей выбор того или иного способа обусловлен точностью конечных результатов измерений, числом измеряемых направлений на пунктах сети, простотой и удобством измерений и их обработки. В геодезических сетях, где точность измерения углов задается средней квадратической ошибкой, равной или более 1", возможно одновременное применение на разных пунктах сети обоих способов, но с одинаковым значением весов измерений.

Заданная точность измерения углов обеспечивается применением теодолитов соответствующего класса и числом приемов необходимых измерений на пункте сети. Независимо от выбранного способа измерений, перед их началом составляется рабочая программа наблюдений, представляющая собой таблицу установок лимба для каждого приема измерений. Она обеспечивает независимость измерений направлений и углов в отдельных приемах и исключает систематическое влияние погрешностей нанесения штрихов диаметров лимба.

Для обеспечения точных и надежных результатов измерений необходимо соблюдать следующие правила наблюдений:

1. Перед началом измерений на объекте необходимо выполнить исследования теодолита, а перед началом работ на пункте – поверки теодолита.
2. Использовать для наведения сетки нитей на визирные цели среднюю часть наводящих винтов, работая ими только на «завинчивание».
3. Для исключения влияния «люфта подъемных винтов» вращение алидады в каждом полуприеме должно быть в одну сторону, при случайном

пропуске направления делается дополнительный оборот в том же направлении.

4. Не изменять фокусировку зрительной трубы в процессе измерений на данном пункте.

5. Равномерно распределять приемы измерений на утреннюю и вечернюю видимость.

6. При наблюдении визирных целей, зенитные расстояния на которые с наблюдаемого пункта отличаются более чем на $\pm 1^\circ$ для 1-го класса и $\pm 2^\circ$ для 2-го класса, необходимо дополнительно брать отсчеты по концам пузырька уровня при алидаде горизонтального круга.

7. Строго соблюдать методику измерений в соответствии с требованиями инструкции [1].

Исходя из общих требований, предъявляемых каждому способу измерений горизонтальных направлений и углов, рассмотрим теоретические основы двух известных способов, упомянутых выше.

1.1.1. Способ круговых приемов

Сущность способа круговых приемов заключается в следующих положениях. Каждый прием измерений состоит из двух полуприемов. В первом полуприеме, после установки лимба на определяемый программой наблюдений отсчет, вращают алидаду по часовой стрелке, последовательно наводя зрительную трубу на визирные цели пунктов, и берут отсчеты по лимбу. Установка лимба, первое наведение и завершение наблюдений в полуприеме (замыкание горизонта) делается на начальное направление, выбираемое наблюдателем самостоятельно, обычно хорошо видимое и расположенное в южном или северном направлении от наблюдаемого пункта. Во втором полуприеме, после перевода зрительной трубы через зенит, вращают алидаду в обратном направлении от начального и также берут отсчеты по лимбу при наведении трубы на каждый наблюдаемый пункт. В обработку берутся средние значения отсчетов по лимбу при круге лево (КЛ) и круге право (КП)

$$N_{\text{ср}} = \frac{\text{КЛ} + \text{КП} \pm 180}{2}. \quad (1)$$

Для исключения ошибок нанесения штрихов лимба перестановку лимба σ между приемами, от начальной установки $0^\circ 00'$ делают на величину, определяемую следующей формулой:

$$\sigma = \frac{180^\circ}{m} + i, \quad (2)$$

где m – число приемов; i – цена деления лимба.

Определение по результатам измерений наиболее надежных значений углов, отсчитываемых от начального направления, выполняют, используя параметрический способ метода наименьших квадратов.

Обозначим на наблюдаемом пункте через W_K установку лимба на начальное направление в каждом приеме

$$W_K = \left(\frac{180^\circ}{m} + i \right) (k - 1), \quad (3)$$

где k – порядковый номер приема.

В качестве параметров выберем истинные значения углов: x_1, x_2, \dots, x_{n-1} , а средние значения отсчетов по наблюдаемым направлениям A, B, C, \dots, N обозначим через $\alpha_K, \beta_K, \gamma_K, \dots, v_K$ (рис. 1). Из чертежа видно, что между параметрами x_j и результатами измерений существуют такие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} W_K - \alpha_K &= v_\alpha^k \\ W_K + x_1 - \beta_K &= v_\beta^k \\ W_K + x_2 - \gamma_K &= v_\gamma^k \\ \dots\dots\dots \\ W_K + x_{n-1} - v_K &= v_v^k \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где v^k – поправки к результатам измерений.

Подобные уравнения можно составить для всех m приемов наблюдений. Перейдем от уравнений поправок (4) к нормальным уравнениям и путем преобразований получим их в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} mx_1 + [\alpha] - [\beta] &= 0 \\ mx_2 + [\alpha] - [\gamma] &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ mx_{n-1} + [\alpha] - [v] &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Каждая строка системы (5) содержит одно неизвестное x_i :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{[\beta]}{m} - \frac{[\alpha]}{m} \\ x_2 &= \frac{[\gamma]}{m} - \frac{[\alpha]}{m} \\ \dots\dots\dots \\ x_{n-1} &= \frac{[v]}{m} - \frac{[\alpha]}{m} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Из полученного выражения (6) следует, что любое неизвестное x_i представляет собой разность средних значений $(i + 1)$ -го и начального направлений. Для получения единой сводки измеренных направлений из m приемов необходимо в каждом приеме приводить результаты измерений к начальному направлению, вычитая из их значений среднюю величину

$$W_K = \frac{[\alpha]}{m}. \text{ Тогда}$$

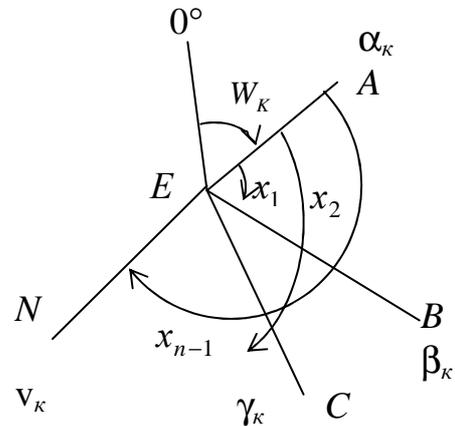


Рис. 1. Схема наблюдаемых направлений

$$x_i = \frac{\sum_i^m x'_i}{m}, \quad (7)$$

где x'_i – приведенные к начальному результаты измерений по i -му направлению.

Надежность получения неизвестных определяется значениями их весов. Для определения этих величин за единицу веса примем вес измерения направления одним приемом. Тогда каждому равноточно полученному направлению должен быть присвоен вес, равный числу приемов наблюдений:

$$P_N = m. \quad (8)$$

Результатом измерений на пункте является таблица приведенных к начальному направлений, измеренных, в зависимости от точности получения конечного результата, разным числом приемов m . В связи с этим на каждом пункте сети производятся уравнивание и оценка точности измеренных и уравненных величин. Так как за единицу веса принята средняя квадратическая ошибка измерения направления одним приемом, то ее значение определяется по известной формуле метода наименьших квадратов (МНК)

$$\mu = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-t}}, \quad (9)$$

где v – МНК поправки ко всем результатам измерений во всех приемах; n – число этих измерений; t – число независимых неизвестных.

При строгой оценке значения v получают из уравнений поправок (4), однако, в целях упрощения вычислений, находят значения направлений по формуле (7), а для определения средней квадратической ошибки направления применяют формулу Петерса:

$$\mu = k \frac{\sum^n |v|}{n}, \quad (10)$$

где $|v|$ – абсолютные уклонения каждого результата измерений от соответствующего среднего по всем наблюдаемым направлениям; n – число наблюдаемых направлений; $k = \frac{1,253}{\sqrt{m(m-1)}}$ – постоянная, зависящая от числа приемов m на пункте.

Средняя квадратическая ошибка уравненных направлений, полученных из m приемов, находится по формуле

$$M = \frac{\mu}{\sqrt{m}}. \quad (11)$$

Основным достоинством способа круговых приемов является экономичность, простота производства наблюдений и их математической обработки, а также быстрое оценивание результатов измерений на их соответствие требуемым допускам инструкции [1]. Недостатком способа является требование наличия хорошей одновременной видимости по всем

направлениям. Затягивание времени измерений в полуприеме приводит к снижению точности полученных результатов измерений за счет влияния внешних условий, вызывающих закручивание знака с установленным на нем теодолитом, что способствует получению больших значений незамыкания горизонта при повторном наведении на начальное направление. При вычислении же направлений, приведенных к начальному, в каждом приеме наблюдений величина незамыкания горизонта распределяется пропорционально номерам в каждое направление, что может привести к искажению результатов измерений, так как точно неизвестен характер смещений лимба за счет указанного фактора.

1.1.2. Способ измерения горизонтальных углов во всех комбинациях

Наряду со способом круговых приемов в полигонометрии и при высокоточных измерениях, в геодезических сетях находит применение способ измерения углов во всех комбинациях. Сущность способа заключается в том, что на каждом пункте измеряются все углы, составленные парами направлений на наблюдаемые пункты. Их число определяется формулой числа сочетаний из n элементов по два

$$C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (12)$$

Для получения равноточных измерений на пункте каждый угол измеряется одним и тем же числом приемов. В то же время при использовании в одной сети разных способов измерений углов их веса должны быть одинаковыми. Каждый прием измерений состоит из двух полуприемов.

С целью исключения систематических погрешностей штрихов диаметров лимба измерения углов выполняются на разных частях лимба. В связи с этим перед началом измерений составляется рабочая программа, обеспечивающая независимость и удобство измерений отдельных углов. Установки лимба в рабочей программе находятся, исходя из заданного веса измерений

$$P = m_1 n, \quad (13)$$

где m_1 – число приемов измерений каждого угла; n – число направлений.

Для исключения люфта подъемных винтов вращение алидады при наведении на левое и правое направление при круге лево и круге право выполняется в одну сторону. Отыскание вероятнейших значений углов, полученных из непосредственных измерений и их комбинаций, покажем применительно к рис. 2 на основе использования аппарата способа наименьших квадратов при уравнивании их значений методом необходимых неизвестных. На рис. 2 обозначим наблюдаемые

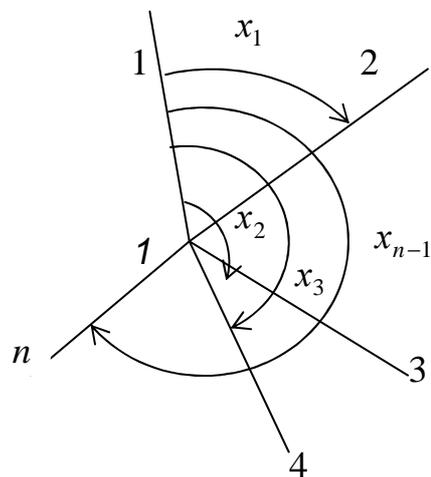


Рис. 2. Схема сети

пункты через 1, 2, 3, ..., n, а углы, отсчитываемые от начального направления, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}$.

Через эти значения можно выразить любой измеренный угол

$$\begin{array}{cccccc} 12 & 13 & 14 & \dots & 1n \\ & 23 & 24 & \dots & 2n \\ & & 34 & \dots & 3n \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & n-1n \end{array}$$

Зависимость между значениями неизвестных и результатами измерений можно выразить в виде уравнений поправок, имеющих следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 - 12 = v_{12} \\ x_2 - 13 = v_{13} \\ \text{-----} \\ x_{n-1} - 1n = v_{1n} \end{array} \right\} (n-1); \quad (14)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_2 - x_1 - 23 = v_{23} \\ x_3 - x_1 - 24 = v_{24} \\ \text{-----} \\ x_{n-1} - x_1 - 2n = v_{2n} \end{array} \right\} (n-2)$$

и т. д.

В выражении (14) через v_{ij} обозначены поправки к измеренным углам. Общее число уравнений поправок будет равно числу измеряемых углов

$$(n-1) + (n-2) + (n-3) + \dots + [n - (n-1)] = \frac{n(n-1)}{2} = C_n^2. \quad (15)$$

Если за единицу принять вес среднего результата угла, измеренного m приемами, то вес суммы или разности двух углов будет равен $1/2$, а вес уравненного значения угла будет равен среднему весовому из всех $(n-1)$ значений этого угла, полученных как из непосредственных измерений, так и из комбинаций. При этом после преобразований вес угла, полученного непосредственно по измерениям, будет равен 2, а вес данного угла из комбинаций равен 1. Данное положение подтверждается переходом от уравнений поправок (14) к нормальным. Решение последних дают значения искомым неизвестных в виде следующих выражений:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = \frac{2(12) + (13 - 23) + (14 - 24) + \dots + (1n - 2n)}{n} \\ x_2 = \frac{2(13) + (12 + 23) + (14 - 34) + \dots + (1n - 3n)}{n} \\ \text{.....} \\ x_{n-1} = \frac{2(1n) + (12 + 2n) + (13 + 3n) + \dots + (1, n-1 + n-1, n)}{n} \end{array} \right\}. \quad (16)$$

Оценка точности измерений выполняется по известной формуле определения средней квадратической ошибки единицы веса, т. е. СКО угла, измеренного одним приемом:

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{N-t}}, \quad (17)$$

где v – отклонения средних значений измеренных углов от их уравненных значений; N – число всех измерений; t – число необходимых измерений; p – вес измеренных углов. В данной формуле $t = n - 1$; $p = 1$, $N = \frac{n(n-1)}{2}$, а

$$N - t = \frac{(n-1)(n-2)}{2}. \quad (18)$$

Теперь средняя квадратическая ошибка угла, измеренного одним приемом, примет вид

$$\mu = \sqrt{\frac{2\sum v^2}{(n-1)(n-2)}}, \quad (19)$$

а средняя квадратическая ошибка угла, измеренного m приемом, будет равна

$$\bar{\mu} = \sqrt{\frac{2m_1\sum v^2}{(n-1)(n-2)}}. \quad (20)$$

Средняя квадратическая ошибка уравненного на пункте угла M находится как

$$M = \frac{\bar{\mu}}{\sqrt{p}}. \quad (21)$$

Если за единицу веса принять вес угла, измеренного m приемами, то вес весового среднего равен $n/2$, если же за единицу веса принять результат измерения угла одним приемом, то он будет равен

$$p = \frac{m_1 n}{2}. \quad (22)$$

Тогда, с учетом формул (20) и (22), получим среднюю квадратическую ошибку уравненных углов

$$M = \sqrt{\frac{4\sum v^2}{n(n-1)(n-2)}} \quad (23)$$

и среднюю квадратическую ошибку уравненного направления

$$M_H = \frac{M}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{2\sum v^2}{n(n-1)(n-2)}}. \quad (24)$$

Вычисления интересующих нас оценочных характеристик выполняются в сводке результатов измерений на пункте в следующей последовательности:

– Вычисляют средние значения непосредственно измеренных углов и углов, полученных из комбинаций;

– По формулам (16) вычисляют средние весовые значения всех уравненных углов;

– По найденным отклонениям среднего значения угла, полученного из непосредственных измерений, от средневесового с учетом всех комбинаций, вычисляют среднюю квадратическую ошибку измеренного угла одним приемом (формула (20)) и среднюю квадратическую ошибку уравненного направления (формула (24)).

Основными достоинствами этого способа являются:

– Небольшая продолжительность времени измерений отдельного угла, что позволяет исключить или приуменьшить влияние внешних факторов на результаты измерений (кручение знака, ветровые и температурные воздействия, рефракция и т. п.);

– Не требуется одновременной видимости по всем направлениям.

К недостаткам способа относятся:

– При заданном значении веса $P = m_1 n$ с увеличением числа направлений уменьшается число приемов измерения непосредственного угла, что снижает надежность его получения, в результате очень трудно выдержать допуск на его отклонение от значений данного угла, полученного из комбинаций других углов;

– Более сложная, чем в способе круговых приемов, обработка результатов измерений при составлении сводок.

При выполнении измерений в геодезических сетях наблюдателями могут быть использованы оба рассмотренных способа, но при условии равенства их весов с целью получения равноточных результатов измерений. Выбор их значений обуславливается следующими рассуждениями. Как было показано выше, вес P в способе круговых приемов равен числу приемов наблюдений (формула (8)), т. е. $P = m$, а в способе всевозможных комбинаций он соответственно равен $P = \frac{m_1 n}{2}$ (формула (22)).

Приравняв значение весов, получим

$$2m = m_1 n. \quad (25)$$

Задавая значения числа приемов наблюдений в способе круговых приемов, с целью обеспечения требуемой точности измерений, мы получим значения заданных весов в способе во всевозможных комбинациях. Например, для триангуляции 2-го класса ($\mu = 1''$) в способе круговых приемов $P = m = 12$, а для способа во всех комбинациях $P = m_1 n = 21-25$ (получение целых m_1 при разных n).

1.2. Способ круговых приемов: методика, контроль и обработка результатов измерений

В силу простоты и несложности обработки результатов измерений способ круговых приемов находит применение в разных видах геодезических построений, где число наблюдаемых направлений не менее трех и, из-за его недостатков, не более пяти. При большем числе направлений увеличивается время измерений в каждом приеме, что значительно увеличивает отрицательное влияние внешних условий на результаты измерений. Из-за указанных причин данный способ обеспечивает измерение углов с погрешностью m_{β} , равной $1''$ и грубее в зависимости от числа приемов измерений на каждом пункте сети. Как было указано выше, вес P результата измерений зависит от числа приемов m , т. е. независимо от числа направлений на каждом пункте выполняется одно и то же число приемов, что обеспечивает равнозначность всех измерений в сети. Перед началом измерений выполняются необходимые поверки теодолита [1].

Методику измерений и пример обработки на пункте A 2-го класса сети покажем для 4 направлений (рис. 3), обеспечивающих при измерении углов с весом $P = 12$ среднюю квадратическую ошибку угла, равную $1''$.

Перед началом измерений составляется рабочая программа наблюдений. Установки лимба вычислены по формуле (3) и приведены в табл. 1.

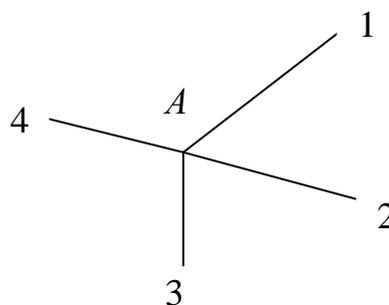


Рис. 3. Схема наблюдаемых направлений

Таблица 1. Теодолит ОТ- 02М (УВК)

Номера приемов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Установки лимба	00°00'	15°10'	30°20'	45°30'	60°40'	75°50'	90°00'	105°10'	102°20'	135°30'	150°40'	165°50'

Перед началом наблюдений выполняются необходимые поверки теодолита (поверка уровня, установка оси вращения теодолита в отвесное положение, определение коллимационной ошибки (в случае превышения допуска $2C \leq 20''$ производится ее исправление).

В каждом приеме наблюдателем производятся следующие действия:

- Отыскиваются направления на соседние пункты сети и выбирается начальное;
- На все наблюдаемые пункты сети измеряются до минут значения зенитных расстояний, и в случае их отклонения на величину больше допустимой, во время наблюдений берутся отсчеты по концам пузырька уровня при алидаде и вычисляется поправка в их результаты;
- Делается несколько оборотов алидады вокруг оси по часовой стрелке;

– При круге право наводим зрительную трубу на начальное направление и ставим по шкале оптического микрометра отсчет, равный 20–25", а затем на лимбе нужную установку, отличающуюся от найденной при КЛ на 180°;

– Переводим трубу через зенит и, вращая алидаду по часовой стрелке, при круге лево наводим трубу на начальное направление и берем отсчет по лимбу;

– Далее, вращая алидаду по часовой стрелке, последовательно наводим на 2, 3, 4-е направления и вновь на первое начальное направление и берем отсчеты, разность между повторным и первым наведением на начальное направление не должна превышать 6" для УВК, 5" для Т05, Т1 и 8" для Т2 (при большем отклонении прием бракуется и наблюдения повторяются на этой же установке лимба);

– Переводим трубу через зенит и, вращая алидаду против часовой стрелки, при КП последовательно наводим зрительную трубу на 1, 4, 3, 2, 1-е направления и берем отсчеты; величина незамыкания горизонта также не должна превышать указанных допусков;

– Затем ставим на лимбе при КП следующую установку и выполняем такие же действия в следующем приеме измерений.

Текущие контроли:

– Разность отсчетов по шкале оптического микрометра при совмещении одноименных штрихов не должна быть более 1" для Т05, Т1, УВК и 2" для Т2;

– Незамыкание горизонта (не более 6");

– Двойное значение коллимационной ошибки $2C \leq 20''$;

– Колебания коллимации $\Delta(\text{Л} - \text{П}) = \Delta 2C$ (разность между наибольшим и наименьшим ее значением с учетом знаков) не должна превышать 10" для УВК, 8" для Т05, Т1 и 12" для Т2;

– Расхождение значений измеренных направлений во всех приемах измерений не должно превышать 6" для УВК, 5" для Т05 и 8" для Т2.

Записи в журналах ведутся шариковой ручкой. Не допускается никаких исправлений отсчетов по оптическому микрометру и отсчетов по уровню. Ошибка в записи градусов и минут объясняется соответствующими пояснениями после их зачеркивания и написании правильных значений. Ошибки в вычислениях не поясняются, категорически запрещаются исправления цифра по цифре. В случае превышения указанных допусков прием не заканчивается, а зачеркивается с пояснением причины и с подсчетом повторных измерений (не более 30 %) не учитывается.

Пример записи и обработки результатов измерений на пункте 2-го класса в одном из наблюдаемых приемов приведен в прил. 1.

В каждом приёме измерений вычисление значений направлений и приведение их к начальному ведется в следующей последовательности:

– Вычисляются незамыкания горизонта при левом и правом кругах измерений $\Delta_{\text{Л}}$ и $\Delta_{\text{П}}$, как разность нижнего и верхнего значений направлений на начальный пункт;

– По средним отсчетам по микрометру находятся значения $2C = \text{КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ$:

– Находятся средние отсчеты на наблюдаемые направления при двух положениях круга;

– Вычисляется, а затем вводится в средние отсчеты при приведении к начальному направлению поправка за распределение незамыкания горизонта

$$\delta_K = -\frac{\Delta_{\text{ср}}(k-1)}{n}, \quad (26)$$

где $\Delta_{\text{ср}} = (\Delta_{\text{Л}} + \Delta_{\text{П}}) / 2$; k – порядковый номер наблюдаемого направления; n – число направлений;

– Измеренные направления приводятся к начальному путем вычитания полученного его значения из каждого направления.

По результатам всех приемов измерений составляется сводка, образец которой для 4 направлений приведен в прил. 2. Контролем качества измерений является допустимая величина расхождений значений направлений из отдельных приемов программы наблюдений, указанная выше. В случае превышения указанного допуска по какому-либо направлению делаются на тех же самых установках лимба повторные измерения для минимального и максимального его значения. При этом в повторный прием включают начальное и два смежных направления или два смежных, если одно из них является начальным. В обработку берутся повторные измерения по основному направлению (прежние недопустимые вычеркиваются) и средние значения из повторных и основных измерений по смежным направлениям.

Здесь же, в сводке производится оценка точности выполненных измерений на пункте по приведенным выше формулам.

1.3. Способ измерения горизонтальных углов во всех комбинациях: методика, составление рабочей программы, контроль и обработка результатов измерений

В данном способе измеряют отдельные углы, составленные любыми двумя направлениями во всех комбинациях. Перед началом измерений составляется рабочая программа наблюдений, обеспечивающая независимость и удобство измерений углов на различных установках лимба. Исходя из заданного веса для соответствующего класса измерений и числа направлений на наблюдаемом пункте, наблюдатель определяет число приемов измерений каждого отдельного угла. Полученные значения установок лимба составляют теоретическую программу наблюдений. Она является общей для всех пунктов с данным числом направлений и заданным весом и приведена в инструкции [1].

Опираясь на теоретическую программу, составляем рабочую программу, отличающую от теоретической установками лимба для углов, не связанных с первым направлением. Составление рабочей программы, в качестве примера на

пункте триангуляции 2-го класса, выполняется в следующей последовательности:

1. На пункте выбирается начальное направление (установка лимба $0^{\circ}00'$) и от него с точностью до минуты измеряются значения всех последующих направлений (рис. 3).

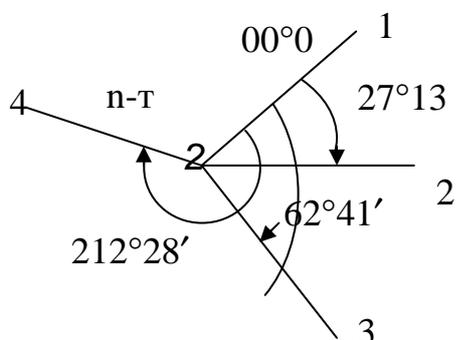


Рис. 3. Схема сети

Исходя из заданного веса $P = m_1 n = 24$, для $n = 4$ находим число приемов $m_1 = 6$ и определяем перестановки лимба σ между приемами по известной формуле (2)

$$\sigma = \frac{180}{m_1} + i. \quad (27)$$

2. Вычисляем начальные установки лимба для углов, связанных с начальным направлением по формулам:

$$\delta = \frac{\sigma^{\circ}}{n} + i \text{ (при } n \text{ – нечетном);} \quad (28)$$

$$\delta = \frac{\sigma^{\circ}}{n-1} + i \text{ (при } n \text{ – чётном).}$$

3. Начальные установки остальных углов выбираем по принципу их независимости от полученных установок углов, связанных с начальным. (Принцип независимости состоит в том, что углы не должны иметь общих направлений). Так, угол 23 имеет установку угла 14, 24 – установку угла 13, а угол 34 – установку угла 12 (табл. 2).

Таблица 2. Рабочая программа наблюдений

Номера приемов	I	II	III	IV	V	VI
Названия углов	Теоретическая					
12	$0^{\circ}00'$	$30^{\circ}10'$	$60^{\circ}20'$	$90^{\circ}30'$	$120^{\circ}40'$	$150^{\circ}50'$
13	$10^{\circ}10'$	$40^{\circ}20'$	$70^{\circ}30'$	$100^{\circ}40'$	$130^{\circ}50'$	$160^{\circ}00'$
14	$20^{\circ}20'$	$50^{\circ}30'$	$80^{\circ}40'$	$110^{\circ}50'$	$140^{\circ}00'$	$170^{\circ}10'$
23	$20^{\circ}20'$	$50^{\circ}30'$	$80^{\circ}40'$	$110^{\circ}50'$	$140^{\circ}00'$	$170^{\circ}10'$
24	$10^{\circ}10'$	$40^{\circ}20'$	$70^{\circ}30'$	$100^{\circ}40'$	$130^{\circ}50'$	$160^{\circ}00'$
34	$0^{\circ}00'$	$30^{\circ}10'$	$60^{\circ}20'$	$90^{\circ}30'$	$120^{\circ}40'$	$150^{\circ}50'$
	Рабочая					
23	$47^{\circ}35'$	$77^{\circ}45'$	$107^{\circ}55'$	$137^{\circ}05'$	$167^{\circ}15'$	$197^{\circ}25'$
24	$37^{\circ}25'$	$67^{\circ}35'$	$97^{\circ}45'$	$127^{\circ}55'$	$157^{\circ}05'$	$187^{\circ}15'$
34	$62^{\circ}40'$	$92^{\circ}50'$	$122^{\circ}00'$	$152^{\circ}10'$	$182^{\circ}20'$	$212^{\circ}30'$

$$\sigma = \frac{180^{\circ}}{6} + i = 30^{\circ}10'; \quad \delta = \frac{30^{\circ}}{3} + i = 10^{\circ}10'.$$

Примечание: накопившиеся градусы от прибавления i отбрасываются.

4. Составляем рабочую программу с целью удобства измерений и исключения использования одних и тех же установок лимба для углов, не связанных с начальным направлением. Для этого к установкам углов 23 и 24 прибавляем предварительно измеренные до целых минут значения углов, дополняющих их до начального, т. е. 12 ($12 = 27^{\circ}13'$), а к установке угла 34 – значение угла 13 ($13 = 62^{\circ}41'$) с точностью до минут с округлением их суммы, кратной половине цены деления (см. табл. 2).

После составления программы приступают к измерениям. Теодолит приводится в рабочее состояние, для чего выполняются необходимые поверки. Далее приступают к измерению отдельных углов последовательно в каждом приеме. Измерение отдельного угла для теодолитов с неповторительной системой осей (Т2, Т1, Т05 УВК) выполняется по следующей методике:

1. Устанавливают по шкале оптического микрометра отсчет от 20 до 50" и при круге право наводят зрительную трубу на начальное направление 1;

2. Устанавливают отсчет по лимбу $180^{\circ}00'$ и, переведя трубу через зенит, наводят ее на начальное направление при круге лево и берут отсчет, дважды совмещая диаметрально противоположные штрихи лимба барабаном оптического микрометра;

3. Вращая теодолит по часовой стрелке, наводят зрительную трубу на направление 2 и берут отсчет (КЛ);

4. Переводят трубу через зенит и, вращая теодолит по часовой стрелке, повторно при КП наводят трубу на направление 2 и берут отсчет;

5. Далее вращают теодолит по часовой стрелке, повторно при КП наводят трубу на начальное направление 1 и берут отсчет;

6. При КП делают следующую установку для угла 13 и выполняют измерения по той же методике и далее для всех углов в первом приеме. Обычно в одну из видимостей выполняют половину программы, вторую – в следующую видимость, желательно использовать утреннюю и вечернюю видимости, для уменьшения влияния рефракции.

Контроль измерений:

1. Разность отсчетов по шкале оптического микрометра для одноименных штрихов должна соответствовать ранее указанным допускам для способа круговых приемов;

2. $2C = КЛ - КП \pm 180^{\circ} \leq 20''$;

3. Значение расхождений угла в полуприемах $\Delta(Л-П)$ не должно быть более 8".

Форма журнала и пример измерения одного из углов программы наблюдений на пункте приведены в прил. 3. Порядок записи и вычислений угла в силу их простоты не требуют особых пояснений.

По окончании измерений на пункте составляется сводка результатов измерений и производится оценка их точности (прил. 4). Уравнивание углов на

пункте производится путем вычислений весового среднего из его непосредственно измеренного значения, полученного как среднее из t приемов, и вычисленных его значений по разности или сумме двух других непосредственно измеренных углов. При этом непосредственно измеренному значению угла придается удвоенный вес. В рассмотренном примере, если обозначить средневесовое значение углов 12, 13, 14 через x , y , z , можно записать следующие выражения получения их значений:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{4} \{2(12) + (13 - 23) + (14 - 24)\}; \\ y &= \frac{1}{4} \{2(13) + (12 + 23) + (14 - 34)\}; \\ z &= \frac{1}{4} \{2(14) + (12 + 24) + (13 + 34)\}. \end{aligned} \quad (29)$$

В результате мы получаем равноточные значения углов.

При составлении сводки результатов измерений на пункте должны выполняться следующие контроли:

1. Расхождение между значениями одного и того же угла из разных приемов не должны превышать 4,0" в первом классе триангуляции и 5,0" во втором классе;
2. Колебания средних значений одного и того же угла, полученного из непосредственных измерений и вычислениям их из комбинаций не должны превышать 3" для числа направлений менее 5 и 4" при большем числе направлений.

Оценка точности полученных измерений производится по формулам (20), (24).

1.4. Определение элементов центрировки

Для обеспечения прямой видимости между пунктами геодезической сети при использовании традиционных наземных методов их построения (триангуляция, трилатерация, линейно-угловые сети, полигонометрия) во многих случаях наблюдения ведутся с различных типов знаков. В связи с этим отвесная линия, проходящая через ось вращения алидады теодолита, не совпадает с центром пункта, и их проекции на какую-либо горизонтальную плоскость определяют величину линейного элемента центрировки, обозначаемую через l . Угловой элемент центрировки Θ отсчитывается от линии, соединяющей проекцию центра пункта C и проекцию центра инструмента I по часовой стрелке до начального направления в точку A .

Определение элементов центрировки производят дважды: перед началом измерений и после их окончания с целью контроля неизменности положения оси вращения алидады теодолита. В зависимости от величины линейного элемента центрировки определение ее значения выполняют графическим ($l < 20$

см) или аналитическим ($l > 20$ см) способами. Рассмотрим методику выполнения измерений обоими способами.

При графическом способе определения элементов центрировки вначале над центром пункта устанавливают горизонтально столик, высотой около 50 см и размерами, позволяющими прикрепить к нему центрировочный лист формата А4 с указанием направления на север. Затем с помощью вспомогательного теодолита типа Т30, установленного в 2–3 метрах от центра пункта, наводят сетку нитей на центр и проектируют на центрировочный лист при двух положениях вертикального круга (КП и КЛ), отмечая точки выноса на листе карандашом на противоположных краях. Проектирование выполняют с трех установок теодолита, расположенных друг к другу под углом, близким к 60 или 120°.

Пересечение проектируемых линий определит положение проекции центра пункта. В случае образования треугольника погрешностей, его стороны не должны превышать 3 мм.

Для выноса на центрировочный столик проекции центра инструмента вспомогательный теодолит располагают на расстоянии, примерно равном полуторной высоте знака, и аналогичным образом с трех стоянок проектируют ось вращения теодолита. Наведение осуществляется на вертикально установленную зрительную трубу теодолита. Сторона треугольника погрешностей в этом случае не должна превышать 5 мм. Центры проекций в треугольниках погрешностей соединяют прямой линией. Она и определяет величину линейного элемента центрировки l .

Для ориентирования этого элемента наблюдаемых пунктов сети с целью вычисления и введения поправок за центрировку в измеренные направления, определяют величину углового элемента центрировки Θ . Для этого из центра проекции инструмента I с помощью визирной линейки проводят направления на начальное и какой-либо хорошо видимый пункт наблюдаемой сети и подписывают полученные на листе направления. В качестве примера элементы центрировки в соответствии с принятыми в инструкции [1] обозначениями представлены на рис. 4.

На рис. 4: C – проекция центра пункта; I – проекция вертикальной оси инструмента; l , Θ – линейный и угловой элементы центрировки; M – угол между начальным и другим пунктом наблюдаемой сети.

Линейный элемент центрировки измеряется с точностью до 1 мм, угловой – с точностью до 15' с помощью транспортира. Контролем точности графического измерения

углового элемента является расхождение в угле $M = \Theta_B - \Theta_A$ из графических и

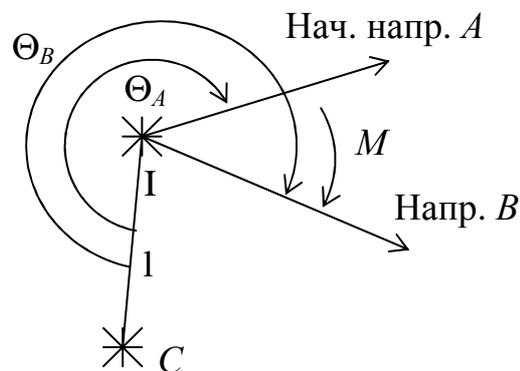


Рис. 4. Элементы центрировки на пункте

непосредственных измерений. Его величина не должна превышать 1° при $l < 20$ см.

Как было указано выше, при значительных элементах центрировки ($l > 20$ см) их определение выполняют аналитическим путем.

Для этого вблизи пункта на ровном месте на расстоянии, примерно равном полуторной высоте знака разбивают базис b длиной, близкой к высоте знака, с которого должна быть видна труба теодолита. Над центром пункта устанавливают небольшой столик, хорошо видимый с точек базиса, и выносят на столик проекцию центра пункта с трех точек стояния с помощью вспомогательного теодолита, как это было описано выше. В проекцию центра пункта вбивают гвоздь, на который производят визирование при выполнении измерений углов с точек базиса между центрами пункта и центром инструмента (зрительная труба теодолита, установленная вертикально).

На концах базиса A и B измеряют горизонтальные углы α и β между вертикальной трубой теодолита и проекцией центра пункта. Кроме того, основным теодолитом измеряют угол γ между начальным направлением и направлением на базисную точку A .

Для решения задачи аналитического определения элементов центрировки воспользуемся рис. 5, на котором показаны все измеренные и подлежащие вычислению величины l и Θ .

Для определения l и Θ построим условную систему плоских прямоугольных координат с началом в базисной точке A и направлением на точку B по оси x и перпендикулярной к ней оси y . Из точки I опустим перпендикуляр на базис b в точку K . Обозначим отрезок AK через x_I , а KB через $b - x_I$. Из $\triangle AKI$

$$KI = x_I \operatorname{tg} \alpha_I,$$

а из $\triangle BKI$

$$KI = (b - x_I) \operatorname{tg} \beta_I.$$

Отсюда

$$x_I = \frac{b \operatorname{tg} \beta_I}{\operatorname{tg} \alpha_I + \operatorname{tg} \beta_I}; \quad y_I = KI = x_I \operatorname{tg} \alpha_I.$$

Таким же путем можно получить координаты точки C в приведенной условной системе координат

$$x_C = \frac{b \operatorname{tg} \beta_C}{\operatorname{tg} \alpha_C + \operatorname{tg} \beta_C}, \quad y_C = x_C \operatorname{tg} \alpha_C.$$

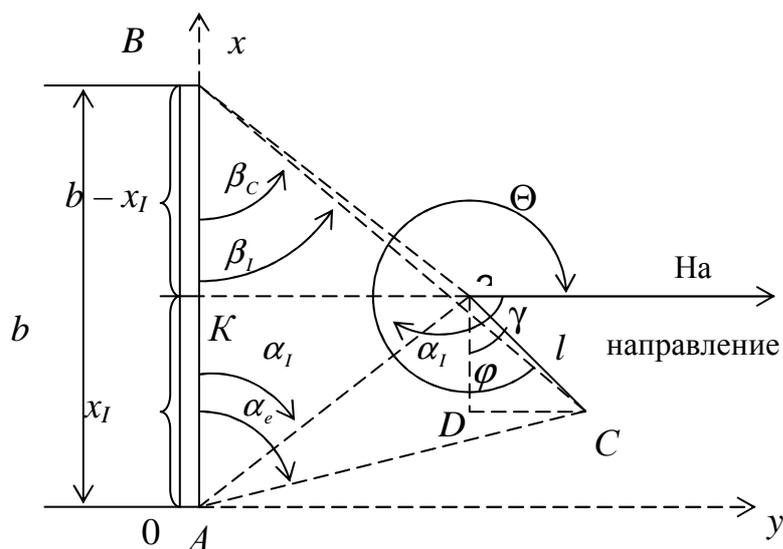


Рис. 5. Аналитическое определение элементов центровки на пункте

Разности абсцисс $x_I - x_C$ и ординат $y_C - y_I$ будут катетами построенного прямоугольного треугольника ICD с гипотенузой $IC = l$. Из этого треугольника вычислим l по формуле

$$l = \sqrt{(x_I - x_C)^2 + (y_C - y_I)^2},$$

а угловой элемент Θ найдем по рис. 5

$$\Theta = 360^\circ - \gamma + \alpha_I + \varphi.$$

Угол α_I равен измеренному как накрест лежащий при параллельных по построению b и ID . Вспомогательный угол φ определится из $\triangle ICD$ по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y_C - y_I}{x_I - x_C}.$$

Для контроля и повышения точности результатов измерений элементы приведения определяют с двух базисов различной длины.

2. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

Одним из видов работ, выполняемых на пунктах геодезической сети, является метод нивелирования наклонным лучом, называемый тригонометрическим нивелированием. Несложная методика измерений, простота обработки их результатов и высокая экономическая эффективность применения данного метода при определении отметок пунктов геодезических сетей предопределяют его широкое использование.

2.1. Сущность метода тригонометрического нивелирования

Тригонометрическое нивелирование, как метод определения отметок пунктов путем вычисления превышений между исходными и определяемыми пунктами по измеренным зенитным расстояниям или углам наклона, находит применение в горной местности, где использование геометрического нивелирования затруднено. В то же время оно может быть использовано для приведения к горизонту расстояний, измеренных светодальномером, и для выполнения специальных работ в прикладной геодезии. Точность определения превышений в основном зависит от длины сторон, выбора времени измерений и точности вертикальных кругов используемых приборов и уровней при алидаде вертикального круга.

Измерение зенитных расстояний выполняется по вертикальному кругу, жестко скрепленному со зрительной трубой, при наведении горизонтальной нити сетки нитей на верхний срез визирного цилиндра или марки и выведенном в нуль-пункт пузырьке уровня при алидаде ВК перед взятием отсчета. Зенитное расстояние отсчитывается от отвесной линии АО в точке стояния теодолита (рис. 6).

Пояснения к рис. 6: AO и BO – отвесные линии в точках A и B ; R – радиус Земли; кривая AB_2 – след уровенной поверхности точки A ; AB_1 – линия горизонта в точке A ; AB – хорда; AB_3 – касательная к кривой AB , определяющей направление визирного луча; r – угол земного преломления; f_1 – поправка за кривизну Земли; f_2 – поправка за рефракцию; h – превышение между пунктами A и B ; H_A^γ и H_B^γ – нормальные высоты пунктов A и B .

На пункте A мы измеряем зенитное расстояние Z , отличающееся от истинного зенитного расстояния Z' на величину угла вертикальной рефракции r .

$$Z' = Z + r. \quad (30)$$

Вычисление превышений h производится с учетом влияния на результаты измерений кривизны Земли и рефракционного искажения визирного луча. На основе выводов, приведенных в [1], применительно к рис. 1 получают результирующую формулу вычисления превышения h между пунктами по измеренному зенитному расстоянию

$$h_{AB} = S_{AB} \text{ctg} Z_{AB} + \frac{(1-K)}{2R} S_{AB}^2 + i - l, \quad (31)$$

где S_{AB} – расстояние между пунктами; приведенное к горизонту; Z_{AB} – измеренное зенитное расстояние; K – коэффициент земного преломления (рефракции); i – высота инструмента от центра пункта до оси вращения трубы; l – высота от центра пункта до верха визирного цилиндра; R – средний радиус кривизны земного эллипсоида для средней широты объекта.

Расстояние S_{AB} берется до целых метров, i и l до сантиметров, коэффициент рефракции K для средних широт обычно принимается равным 0,14. Значение K можно определить по взаимнообратным зенитным расстояниям

$$K = 1 - \frac{R}{S\rho} (Z_{12} + Z_{21} - 180^\circ) - \frac{R}{S^2} [(l_1 + l_2) - (i_1 + i_2)] \quad (32)$$

и данным геометрического нивелирования

$$K = \frac{2R}{\rho'' S} (Z'' - Z'), \quad (33)$$

где $Z'' = 90^\circ + S \frac{\rho''}{2R} - \frac{h}{S} \rho''$ – истинное зенитное расстояние;

$Z' = Z + \frac{l-i}{S} \rho''$ – измеренное зенитное расстояние, приведенное к центру

пункта;

$h = (H_B^\gamma + l_B) - (H_A^\gamma + l_A)$ – разность нормальных высот из геометрического нивелирования.

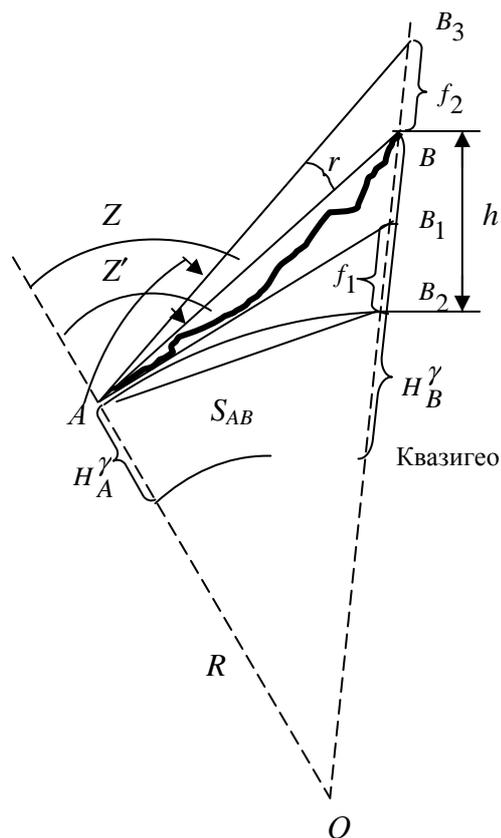


Рис. 6. Измерение Z

2.2. Методика измерений зенитных расстояний, контроль результатов

Измерение зенитных расстояний в триангуляции 2-го класса выполняется 4 приемами по каждому направлению в периоды четкой видимости изображений соседних пунктов, спустя 2-3 часа после восхода и за 2-3 часа до захода солнца. Измерения в каждом приеме выполняются последовательно по всем направлениям в следующем порядке:

- Теодолит приводится в рабочее положение и горизонтальная нить сетки наводится на верх визирного цилиндра или марки;
- Пузырек уровня при алидаде ВК выводится в нуль-пункт и берется отсчет по лимбу ВК;
- Труба переводится через зенит и предыдущие действия повторяются при другом положении круга.

Отсчеты записываются в журнале измерений зенитных расстояний до целых секунд (прил. 5) и в силу простоты вычислений не требуют пояснений. По формулам вычисления зенитных расстояний для разных типов теодолитов находятся значения места зенита MZ и зенитных расстояний Z . Для Т2

$$\left. \begin{aligned} MZ &= \frac{1}{2}(KL + KP - 360^\circ) = \frac{KL + KP}{2} - 180^\circ \\ Z &= \frac{1}{2}(KL - KP + 360^\circ) = KL - MZ = MZ - KP \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

в теодолитах УВК (ОТ-О2М, ОТ-1)

$$\left. \begin{aligned} MZ &= KL + KP - 180^\circ \\ Z &= P - L + 90^\circ \end{aligned} \right\}. \quad (35)$$

В теодолитах Т05 и Т1 находятся место нуля (MO) и угол наклона ν

$$\begin{aligned} MO &= \frac{KL + KP \pm 180^\circ}{2}; \\ \nu &= MO \pm 180^\circ - KP = KL - MO = \frac{KL - KP \pm 180^\circ}{2}. \end{aligned} \quad (36)$$

Угол наклона отсчитывается от плоскости горизонта и связан с зенитным расстоянием формулой

$$\nu + Z = 90^\circ. \quad (37)$$

Место зенита MZ – это отсчет по вертикальному кругу, когда визирная ось трубы вертикальна, а уровень при алидаде ВК находится в нуль-пункте. Место нуля MO – это отсчет по вертикальному кругу при горизонтальном положении визирной оси и выведенном в нуль-пункт пузырьке уровня при алидаде ВК.

Контролем качества измерений служит постоянство MZ и колебание зенитных расстояний по каждому направлению, вычисленных из отдельных приемов. Колебания MZ и Z не должны превышать 15".

Вычисленные значения MZ и Z выписываются в сводку зенитных расстояний (прил. 6), где приводятся значения Z по каждому наблюдаемому направлению и вычисляется их средняя величина, используемая для

дальнейшей обработки. На каждом пункте выполняются измерение высоты теодолита и знака до верха визирного цилиндра или марки с точностью до 1 см, необходимые для вычисления превышений между пунктами сети. Оценка точности измерений на пункте не производится. Она выполняется лишь по результатам уравнивания.

2.3. Определение высоты инструмента и знака над центром пункта

При определении превышений между пунктами методом тригонометрического нивелирования необходимо знать высоты инструмента и наблюдаемого знака (марки) над центром пункта (см. формулу (31)). Для знаков высотой менее 20 м от центра пункта до верха визирного цилиндра измерения высоты инструмента и знака выполняются дважды 20-метровой рулеткой с точностью до 1 см. Расхождения между результатами измерений не должны превышать 10 см. Для знаков высотой более 20 м определение их высот выполняется аналитическим способом.

Аналитическое определение высоты выполняется с помощью вспомогательного теодолита типа Т30. Для этого на расстоянии, примерно равном полуторной высоте знака, разбивают на ровном месте базис такой же длины (рис. 7).

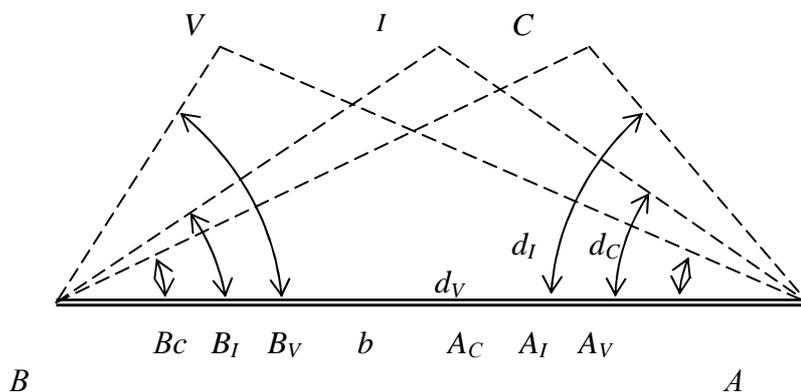


Рис. 7. Измерение горизонтальных углов на точках базиса

Затем на точках базиса B и A устанавливают вспомогательный теодолит и измеряют горизонтальные углы между осью визирного цилиндра V , осью инструмента I , центром пункта C и одной из точек базиса. Данные измерения необходимы для определения расстояний d_V , d_I , d_C , с одной из точек базиса A , используемых при вычислении превышений V , I , C над центром пункта. Указанные расстояния вычисляют в образовавшихся треугольниках (см. рис. 7) по теореме синусов

$$\left. \begin{aligned} d_V &= \frac{b \sin B_V}{\sin[180^\circ - (A_V + B_V)]}; \\ d_I &= \frac{b \sin B_I}{\sin[180^\circ - (A_I + B_I)]}; \\ d_C &= \frac{b \sin B_C}{\sin[180^\circ - (A_C + B_C)]}. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

После измерения горизонтальных углов на точке A выполняют измерение вертикальных углов $\alpha_V, \alpha_I, \alpha_C$ (рис. 8).

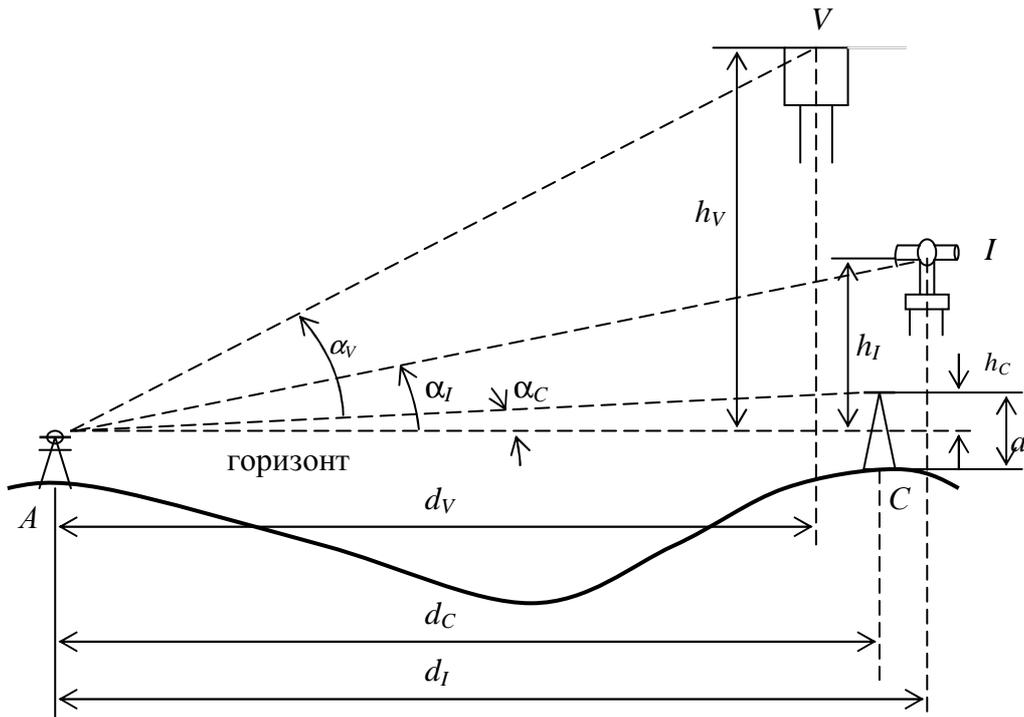


Рис. 8. Измерение вертикальных углов с точки A базиса

Измерение вертикальных углов выполняется от линии горизонта, фиксируемой установкой в нуль-пункт уровня при алидаде ВК, до направления на установленный над центром пункта штатив α_C , на середину оси вращения трубы теодолита α_I и на середину визирного цилиндра α_V . По вычисленным расстояниям и измеренным углам наклона вычисляют превышение V, I и C над горизонтом и определяют неизвестные значения высот по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} h_C &= d_C \operatorname{tg} \alpha_C \\ h_I &= d_I \operatorname{tg} \alpha_I \\ h_V &= d_V \operatorname{tg} \alpha_V \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

и

$$\left. \begin{aligned} H_I &= h_I + a - h_C \\ H_V &= h_V + a - h_C \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Высоту штатива a над центром пункта измеряют рулеткой с точностью до 1 см.

Для контроля результатов измерений их выполняют повторно с другого базиса.

3. ВЫСОКОТОЧНОЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Сущность метода геометрического нивелирования

Высокоточное геометрическое нивелирование как метод нивелирования горизонтальным лучом является в настоящее время самым точным и надежным методом определения превышений между наземными объектами и их высот, отнесенных к единой отсчетной уровенной поверхности.

Одной из важных задач геодезии является определение взаимного высотного положения объектов, находящихся на поверхности Земли. Наиболее точным методом, позволяющим решать данную задачу, является метод геометрического нивелирования. В этом методе измерение превышений между объектами выполняется по разностям горизонтальных плоскостей, задаваемых визирной осью нивелира, ориентированного во время измерений относительно отвесной линии в точке стояния с помощью цилиндрического уровня или заменяющего его устройства. Для сравнения полученных высот между собой их нужно отнести к единой отсчетной поверхности. В качестве таковой в РФ принята уровенная поверхность, проходящая через начало счета высот (нуль Кронштадского футштока) и совпадающая в данной точке с поверхностью квазигеоида, принятого за поверхность относимости счета высот. Поверхность квазигеоида определяется высотами, отсчитываемыми по нормали к референц-эллипсоиду от поверхности Земли. Они называются нормальными высотами и обозначаются через H^l . При ориентировании же нивелира относительно отвесной линии на практике мы получаем так называемые ортометрические высоты H^s , определяющие поверхность геоида. На морской поверхности $H^l = H^s$ и, следовательно, в начале счета высот они совпадают между собой. На суше их отличие ввиду несовпадения отвесной линии с нормалью не превышает двух метров.

В то же время в геодезической практике вводится понятие высот, определяющих поверхность референц-эллипсоида. Это отметки точек земной поверхности, исчисленные относительно референц-эллипсоида по нормали к нему, так называемые геодезические высоты H_G . Они необходимы для вычисления поправок в измеренные длины линий при их редуцировании на поверхность референц-эллипсоида и затем на плоскость в проекции Гаусса – Крюгера с целью выполнения уравнительных вычислений при их обработке.

Для более наглядного представления указанных высот покажем их на рис. 9.

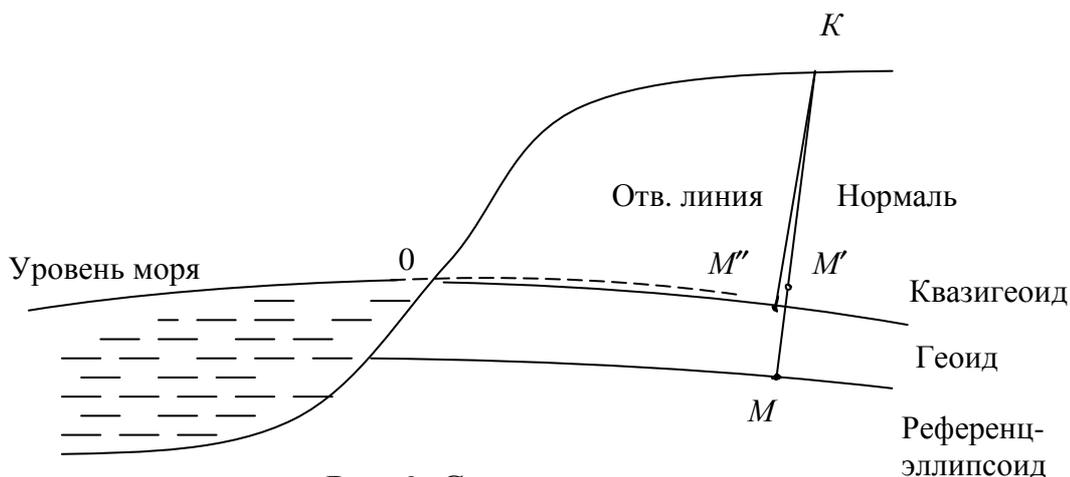


Рис. 9. Система высот

На приведенном рис. 9:

KM – геодезическая высота H_G ;

KM' – нормальная высота H^N ;

KM'' – ортометрическая высота H^o ;

$MM' = \zeta$ – высота квазигеоида над эллипсоидом или аномалия высоты;

$M''M' = f$ – поправка за переход от ортометрических к нормальным

высотам.

Угол между направлениями нормали и отвесной линии в точке на земной поверхности составляет в среднем 3–5" в равнинной местности и достигает 15–30" в горной местности. Поэтому практически направление нормали совпадает с направлением отвесной линии и на рисунке они обычно отождествляются.

При измерении превышений на каждой точке стояния нивелира направления отвесных линий, определяемых положением его пузырька уровня, не параллельны между собой. Это вызвано изменением центробежной силы при удалении точек земной поверхности от оси вращения Земли и аномалиями силы тяжести вследствие неравномерного распределения масс Земли. Непараллельность отвесных линий приводит к непараллельности связанных с ним уровневых поверхностей и вследствие этого сумма измеренных превышений не даст действительной разности высот над исходной уровневой поверхностью и не образует единой системы высот.

Данные погрешности будут незначительны для точек, расположенных на одной и той же параллели, и будут возрастать для точек, расположенных по меридиану, а также находящихся в горных районах. В связи с этим в результаты непосредственно измеренных превышений вводятся поправки f за переход к системе нормальных высот, определяемых по следующей формуле:

$$f = \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_A - \gamma_B) H_m + \frac{h}{\gamma_m} (g - \gamma)_m, \quad (41)$$

где γ_m – приближенное значение нормального ускорения силы тяжести, равное $9,8 \text{ м/с}^2$; γ_A и γ_B – нормальное ускорение силы тяжести на отсчетном

эллипсоиде, соответствующее реперам A и B ; $(g - \gamma)_m$ – среднее из аномалий силы тяжести на реперах A и B ; H_m – среднее из высот реперов A и B ; h – измеренное превышение между реперами A и B .

Отметки точек, полученных в избранной системе высот, входят в высотные нивелирные сети I, II, III и IV классов. Построение высотных сетей осуществляется последовательно – от высших сетей нивелирования I и II классов к полигонам и ходам III и IV классов. Наличие тех или иных ступеней их развития обуславливаются точностью конечных результатов измерений. Проложение нивелирных ходов выполняется в соответствии с требованиями инструкции по нивелированию [2].

3.2. Методика измерений превышений, контроль на станции

Превышения между точками земной поверхности находятся по разностям отсчетов задней и передней реек, определяемых горизонтальным положением визирного луча нивелира при его наведении на шкалы реек. В зависимости от требуемой точности конечного результата измерений, могут быть использованы разные типы нивелиров и реек и рекомендована соответствующая методика измерений.

Для высокоточных измерений (нивелирование I и II классов), используются высокоточные нивелиры с плоскопараллельными пластинками, обеспечивающими высокую точность наведения на штрихи инварной рейки способом биссектрирования, помещенные в термоизоляционный кожух. При выполнении измерений предъявляются более жесткие требования к методике измерения превышений на каждой станции нивелирования путем ограничения высот и длин луча визирования, разности плеч, выбором времени измерений и оценкой точности результатов по разностям основной и дополнительной шкал рейки на станции и разностям измерений превышений в прямом и обратном направлениях по нивелирным ходам. Методика измерений предусматривает уменьшение влияния как можно большего количества инструментальных ошибок и внешней среды на измеренное превышение.

Методика высокоточного нивелирования может быть применима для измерения превышений в различных видах высотных сетей. Рассмотрим ее применительно к наиболее распространенному нивелированию – нивелированию II класса. Методика нивелирования I класса аналогична методике нивелирования II класса, только превышения измеряются по двум парам костылей, т. е. прокладывается двойной ход нивелирования II класса.

Нивелирование II класса производят в прямом и обратном направлениях по костылям или кольям. Нивелирование II класса выполняется высокоточными уровенными и компенсаторными нивелирами, удовлетворяющими следующим требованиям:

1. Увеличение трубы не менее $40\times$;
2. Цена деления контактного уровня не более $12''$ на 2 мм;

3. Ошибка самоустановки линии визирования для нивелиров с компенсаторами не более 0,2";
4. Цена деления шкалы отсчётного барабана – 0,05 мм;
5. Ошибка метровых интервалов шкал рейки не должна превышать 0,20 мм, в горных районах – 0,10 мм.

Перед началом измерений выполняются необходимые поверки и исследования нивелира [2]. Главной поверкой нивелира является требование параллельности проекций визирной оси и оси цилиндрического уровня при их проектировании на отвесную плоскость. Величина угла между проекциями называется углом i нивелира. Его значение не должно превышать 10". Методика определения угла i для уренных и компенсаторных нивелиров приведена в инструкции [2].

При нивелировании в прямом направлении измерения на станции выполняются в следующем порядке:

1. Нечетная станция $З_0 П_0 П_Д З_Д$.
2. Четная станция $П_0 З_0 З_Д П_Д$.

(Примечание. З, П – отсчеты по шкалам «задней» и «передней» реек; индексы О, Д – основная и дополнительная шкалы реек).

При нивелировании в обратном направлении (обратный ход) наблюдения на нечетных станциях начинают с передней рейки, на четных – с задней. Длина плеч на станции не должна превышать 65 м, а их разность не более 1 м. Накопление разностей плеч по секции не должно превышать 2 м. Высота луча визирования должна быть не менее 0,5 м. Для длин плеч менее 30 м она допускается до 0,3 м.

Для уренных нивелиров наблюдения на каждой станции выполняются в следующей последовательности.

1. Приводят нивелир в рабочее положение по установочным уровням.
2. Наводят трубу на основную шкалу рейки, устанавливая на шкале оптического микрометра отсчет 50, совмещают элевационным винтом изображение концов пузырька уровня и берут отсчеты по верхней и нижней дальномерным нитям.
3. Вращением элевационного винта точно совмещают изображение концов пузырька уровня и вращением барабана на ввинчивание точно наводят биссектор на ближайший штрих основной шкалы рейки и берут отсчет по рейке и шкале барабана до целых делений.
4. Далее наводят трубу на вторую рейку, выполняя все действия, перечисленные в пп. 2, 3.
5. Наводящим винтом трубы наводят биссектор на дополнительную шкалу второй рейки и выполняют действия согласно п. 3.
6. Наводят трубу на дополнительную шкалу первой рейки и действуют согласно п. 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. – М.: Недра, 1966.
2. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М.: Недра, 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Прием 1

Дата 14.09.08.

Время 11 ч. 43 мин.

Название направления	Круг	Отсчет по штрихам лимба	Отсчеты по микрометру		$\frac{a_1 + a_2}{2}$ μ	Л-П	$\frac{Л + П}{2}$	Значение направления
			1-й отсчет	2-й отсчет				
1 – Лесной	Л	0°00'	10,5	10,9	10,7	-14,6	18,0	00°00'00,0"
2 – МТФ	П	180°00'	25,0	25,6	25,3			
3 – Сад	Л	02°22'	19,3	20,0	19,7	-16,1	-1,2 27,8	02°22'08,6"
	П	182°22'	36,0	35,6	35,8			
4 – Калдарайк	Л	08°43'	15,0	15,8	15,4	-16,0	-2,5 23,4	08°43'02,9"
	П	188°43'	31,4	31,4	31,4			
1 – Лесной	Л	11°16'	18,7	19,3	19,0	-15,5	-3,8 26,8	11°16'05,0"
	П	191°16'	34,2	34,8	34,5			
	Л	0°00'	15,2	15,6	15,4	-15,2	-5,0 23,0	
	П	180°00'	30,5	30,7	30,6			
	Л							
	П							
	Л							
	П							
	П							

Незамыкание $\Delta Л = +4,7''$; $\Delta П = +5,3''$; $\Delta_{ср} = +5,0''$.

Замечания _____ . Наибольшее $\Delta(Л-П) = -1,5''$.

$$\delta_K = \frac{\Delta_{ср}}{n} (K - 1) = -1,25(K - 1).$$

Прием 2

Пункт № 1 СГГА

Дата 14.09.08 $t = +12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Погода *ясно*. Ветер *нет*.

Время 11 ч. 43 мин. Видимость *хорошая*. Изображение *четкое*.

Название направления	Круг	Отсчет по штрихам лимба	Отсчеты по микрометру		$\frac{a_1 + a_2}{2} \mu$	Л-П	$\frac{Л + П}{2}$	Значение направления
			1-й отсчет	2-й отсчет				
1 – Лесной	Л	15°10'	12,3	12,7	12,5			0°00'00,0"
2 – МТФ	П	195°10'	26,8	27,4	27,1	-14,0	19,8	02°22'02,9"
	Л	17°32'	16,7	16,2	16,4		-0,5	
3 – Сад	П	197°32'	29,7	30,1	29,9	-13,4	23,2	08°43'03,4"
	Л	23°53'	17,8	18,2	18,0		-1,1	
4 – Калдарайк	П	203°53'	30,4	30,8	30,6	-12,6	24,3	11°16'00,9"
	Л	26°26'	15,3	15,9	15,6		-1,6	
1 – Лесной	П	206°26'	28,7	29,3	29,0	-13,4	22,3	
	Л	15°10'	14,2	14,6	14,4		-2,1	
	П	195°10'	29,6	29,4	29,4	-15,0	21,9	
	Л							
	П							
	Л							
	П							
	Л							

Незамыкание $\Delta Л = +1,9''$; $\Delta П = +2,3''$; $\Delta ср = +2,1$.

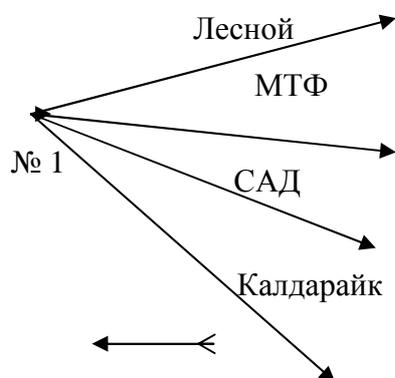
Замечания _____ . Наибольшее $\Delta(Л-П) = -2,4''$.

$$\delta_K = -\frac{\Delta ср}{n}(K - 1) = -0,525(K - 1).$$

Наблюдатель: *Попов А.*
 Записатор: *Легачев С.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Сводка результатов наблюдений горизонтальных направлений



Дата: 12.10.08.; Пункт № 1 СГГА
 Наблюдатель: *Легачев С.*
 Записатор: *Попов А.*
 Инструмент: ОТ-02М № 1436

Чертеж направлений
на пункте

Вывод средних направлений на пункте № 1 СГГА.

Начальное направление Лесной 00°00'00,0"

Дата наблюдений	Номер приема	Установка лимба ° ' "	МТФ		САД		Калдарайк		Примечание
			° ' "	V	° ' "	V	° ' "	V	
12.10	1	0 00	2 22	+2,85	8 43 02,9	+0,40	11 16 05,0	+3,00	Максимальные незамыкания = 53" ≤ 60" Max Δ(Л-П) = 65" ≤ 10" Максимальные расхождения направлений в приемах = 55" ≤ 6"
12.10	2	15 10	08,6	-2,65	03,4	+0,90	00,9	-1,30	
19.10	3	30 20	02,9	-2,12	01,6	-0,90	01,5	-0,70	
19.10	4	45 30	05,6	-0,05	02,2	-0,30	01,3	-0,90	
		Среднее	2 22		8 46 02,50		11 16 02,20		
		Σ(+v)	05,75	+2,85		+1,30		+3,01	
		Σ(-v)		-2,85		-1,20		-2,90	

$$\mu = -K \frac{[|v|]}{n} = 0,36 \frac{14,1}{n} = 1,27'';$$

$$M = \frac{\mu}{\sqrt{m}} = 0,64''.$$

Сводка измеренных направлений

№	Название направлений	Уравненные на станции направления
1	Лесной	0 00 00,00
2	МТФ	2 22 05,75
3	Сад	8 43 02,50
4	Калдарайк	11 16 02,20

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Дата 15.10.08; $t = +12\text{ }^{\circ}\text{C}$ Погода *ясно*. Ветер *слабый*.
 Время 11 ч. 15 мин. Видимость *хорошая*. Изображение *спокойное*.

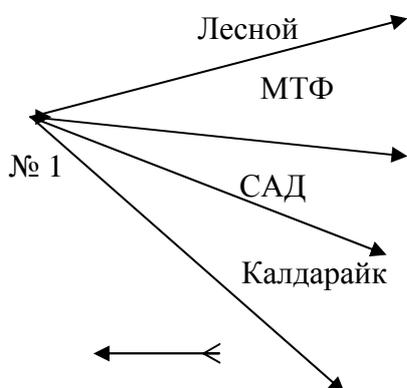
Угол, прием	Круг	Номер направления, визирная цель	Отсчеты		Значения в полуприеме		Среднее значение угла ° ' "
			по штрихам лимба ° ' "	по шкале микрометра	направление ' "	угла ' "	
14	КЛ	1	50 15	21,0	15 20,7	16 02,3	11 16 02,0
		4	61 31	22,6			
2	КП	4	241 31	23,3	31 23,0	16 01,8	
				22,4			
		1	230 15	21,9	31 22,2	16 01,8	
				20,3			
				20,6	15 20,4		$\Delta(\text{Л}-\text{П}) =$
23	КЛ	2	52 35	20,4	35 20,6	20 57,6	06 20 57,5
		3	58 55	20,8			
2	КП	3	238 55	18,3	55 18,2	20 57,4	
				18,1			
		2	232 35	19,0	55 19,2	20 57,4	
				19,4			
				21,4	35 21,8		$\Delta(\text{Л}-\text{П}) =$
				22,3			

Замечания:

Наблюдатель: *Легачев С.*
 Записатор: *Попов А.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Сводка результатов измерений горизонтальных углов на пункте



Дата: 15.10.08. Пункт № 1 СГГА

Наблюдатель: *Кондратьев С.*

Записатор: *Семенов А.*

Инструмент: ОТ-02М № 1436

$\mu_B = 0,25''$; $M_H = 0,56''$; $\Sigma V^2 = 3,82''$.

Чертеж направлений
на пункте

Сводка измеренных углов на пункте № 1

Дата наблюдений	Номер приема	Установка лимба	Значение угла			Дата наблюдений	Номер приема	Установка лимба	Значения угла		
			I полу-прием	II полу-прием	Среднее				I полу-прием	II полу-прием	Среднее
15.10	1	0 00	Угол	12	(02°26')	15.10	1	22 45	Угол	23	(06°25')
	2	30 10	13,4	13,2	13,3				41,0	45,2	43,1
»	2	30 10	14,5	13,5	14,0	»	2	50 55	43,0	43,8	43,4
16.10	3	60 20	14,2	13,8	14,0	16.10	3	82 05	40,5	42,5	41,5
»	4	90 30	12,1	18,7	15,4	»	4	112 15	43,5	47,5	45,5
		ср	Угол	13	14,18 (08°51')			ср	Угол	24	43,38 (08°50')
15.10	1	10 10	54,4	55,0	54,7	15.10	1	12 35	42,4	46,6	44,5
»	2	40 20	53,0	53,4	53,2	»	2	42 45	43,6	44,2	43,9
16.10	3	70 30	54,2	55,6	54,9	16.10	3	72 55	43,0	45,2	44,1
»	4	100 40	52,4	26,4	54,4	»	4	102 05	40,7	46,0	43,4
		ср	Угол	14	54,30 (11°16')			ср	Угол	34	43,98 (02°25')
15.10	1	20 20	58,3	57,4	57,9	15.10	1	8 50	01,0	02,6	01,3
»	2	50 30	58,0	57,1	57,6	»	2	38 00	00,4	04,3	02,4
16.10	3	80 40	57,5	57,8	57,6	16.10	3	68 10	01,2	03,9	02,6
»	4	110 50	56,0	58,8	57,4	»	4	90 20	04,3	02,1	03,4
		ср			57,62			ср			02,42

Уравнивание измеренных углов на пункте

	12 (02°26')	13 (03°51')	14 (11°16')	23 (06°25')	24 (08°50')	34 (02°25')
	14,18	54,30	57,62	43,38	43,98	02,42
	14,18	54,30	57,62	43,38	43,98	02,42
	10,92	57,56	58,16	40,12	43,44	03,32
	13,64	55,20	56,72	41,56	45,80	00,54
Ср.	12,23	55,34	57,53	42,11	44,30	02,18
V	+0,95	-1,04	+0,09	+1,27	-0,32	+0,24

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Пункт № 5 СГГА

Прием 1

Дата 08.12.08.

Погода ясно.

Ветер слабый.

Время 10 ч. 19 м.

Видимость хорошая. Изображение спокойное.

Название направления, место наведения	Отсчеты по вертикальному кругу		Среднее	Место зенита	Зенитное расстояние
	I	II			
<u>Лесной Л</u> <u>верх ВЦ</u>	00	17,5 17,3	00 17,4	-4,2"	87°59'21,0"
П	59	38,2 38,6	59 38,4		
МТФ Лверх ВЦ	01	40,1 40,4	01 40,2	+0,3	87°56'39,9"
П	58	20,0 20,2	58 20,1		
<u>Сад Лверх ВЦ</u>	02	07,2 07,3	02 07,2	+5,0	87°55'50,6"
П	57	57,7 57,9	57 57,8		
<u>Калдарайк</u> <u>Лверх ВЦ</u>	03	48,5 48,7	03 48,6	-1,7	87°52'21,1"
П	88 56	09,4 10,0	56 09,7		

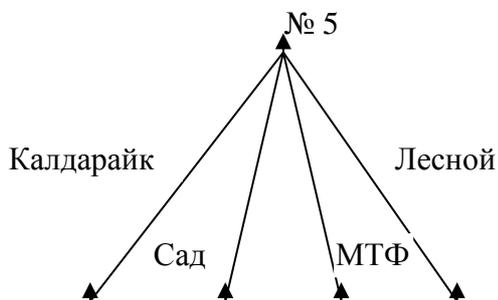


Схема сети

Наблюдатель: *Попов А.*

Записатор: *Легачев С.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Сводка измеренных зенитных расстояний на пункте № 1 СГГА

Номер приёма	Измеренные направления			
	Лесной о ' "	МТФ о ' "	Сад о ' "	Калдарайк о ' "
1	87 59 21,0	86 56 39,9	87 55 50,6	87 52 21,1
2	23,4	35,4	47,3	28,7
3	19,0	37,0	52,5	30,2
4	22,5	32,0	53,4	25,4
Среднее	87 59 21,5	86 56 36,1	87 55 51,0	87 52 26,4

Наблюдатель: *Попов А.*