



## Тема лекции 6. СОЗДАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЪЕМОЧНОЙ СЕТИ

### Вопросы:

**6.1. Понятие о Государственной геодезической сети и съемочных сетях.**

**6.2. Понятие о спутниковых системах местоопределения и современных геодезических опорных сетях.**

**6.3. Вычислительная обработка теодолитных ходов.**

**6.3.1. Задачи вычислительной обработки и подготовительные работы.**

**6.3.2. Увязка углов замкнутого теодолитного хода.**

**6.3.3. Особенности увязки углов разомкнутого теодолитного хода.**

**6.3.4. Вычисление дирекционных углов. Проверка вычислений.**

**6.3.5. Вычисление и увязка приращений координат замкнутого теодолитного хода (полигона).**

**6.3.6. Особенности увязки приращений координат разомкнутого теодолитного хода. Вычисление координат точек хода.**

### Литература

1. Юнусов, А.Г. Геодезия: учебное пособие для вузов. / А.Г. Юнусов, А.Б. Беликов, В.Н. Баранов, Ю.Ю. Каширкин. – М.: Академический проект. 2011. 409 с.
2. Куштин, И.Ф. Геодезия: учебно-практическое пособие. / И. Ф. Куштин, В.И. Куштин. – Ростов н/Д. Феникс, 2009. – 909 с.
3. Ямбаев, Х.К. Геодезическое инструментоведение: учебник для вузов./ Х.К. Ямбаев. – М.: Академический проект, 2011. – 583 с.
4. Неумывакин, Ю.К., Практикум по геодезии / Ю.К.Неумывакин, А.С.Смирнов. – М.: Недра, 1995.
5. Подшивалов, В. П. Инженерная геодезия : учебник / В. П. Подшивалов, М. С. Нестеренок. – Минск : Выш. шк., 2011. – 463 с.
6. ТКП 120 – 2007(03150). Порядок создания фундаментальной астрономо-геодезической сети.
7. ТКП 119 – 2007(03150). Порядок создания спутниковой геодезической сети I класса.

### Вопрос 6.1. Понятие о Государственной геодезической сети и съемочных сетях

Геодезические сети подразделяются:

- по виду определяемых координат – плановые и высотные;
- по виду построения – триангуляция, полигонометрия, трилатерация и их сочетания;
- по назначению – государственные, сети сгущения и сети съемочного обоснования, сети специального назначения.

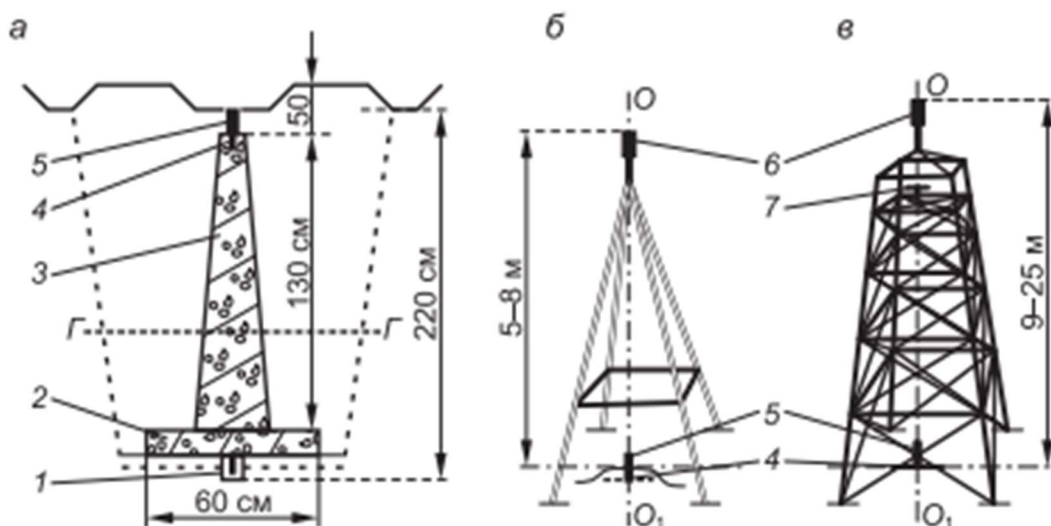


Рис.6.1. Геодезические пункты:

а – подземный центр; б – пирамида; в – сигнал; 1 – нижний центр; 2 – плита; 3 – пилон верхнего центра; 4 – верхний центр; 5 – опознавательный столбик; 6 – визирный цилиндр; 7 – столик; ГГ – граница промерзания грунта; OO1 – вертикальная ось

Государственная геодезическая сеть создается для распространения на всю территорию страны единой системы плановых координат и высот. Эта сеть представлена геодезическими пунктами, закрепленными на местности (рис.6.1, а). Носителем координат геодезического пункта служит метка в металлической пластине верхнего центра 4, которая заложена в пилоне – подземном центре пункта. Верхний центр дублируют нижним центром 1, который заложен на дне котлована под плитой 2. Глубина заложения нижнего центра – не менее 2 м.

После закладки центр окапывают и устанавливают опознавательный столбик. Над центром строят металлическую пирамиду (рис.6.1, б) или высокий сигнал (рис.6.1, в), если они необходимы для открытия взаимной оптической видимости между удаленными пунктами при измерениях углов и расстояний.

Плановые координаты пунктов государственных геодезических сетей в прошлом определялись геометрическими методами триангуляции и полигонометрии, в некоторых случаях методом трилатерации. В настоящее время координаты существующих геодезических пунктов уточняются, а координаты новых пунктов определяются при помощи спутниковых геодезических приборов. Применяются также методы триангуляции и полигонометрии и их комбинации. Метод триангуляции состоит в том, что в вершинах всех треугольных фигур, образованных пунктами сети, измеряют горизонтальные углы, а длины сторон, называемых базисными, измеряют только в нескольких треугольниках (базисы  $b_1$  и  $b_2$  – рис.6.2, а).

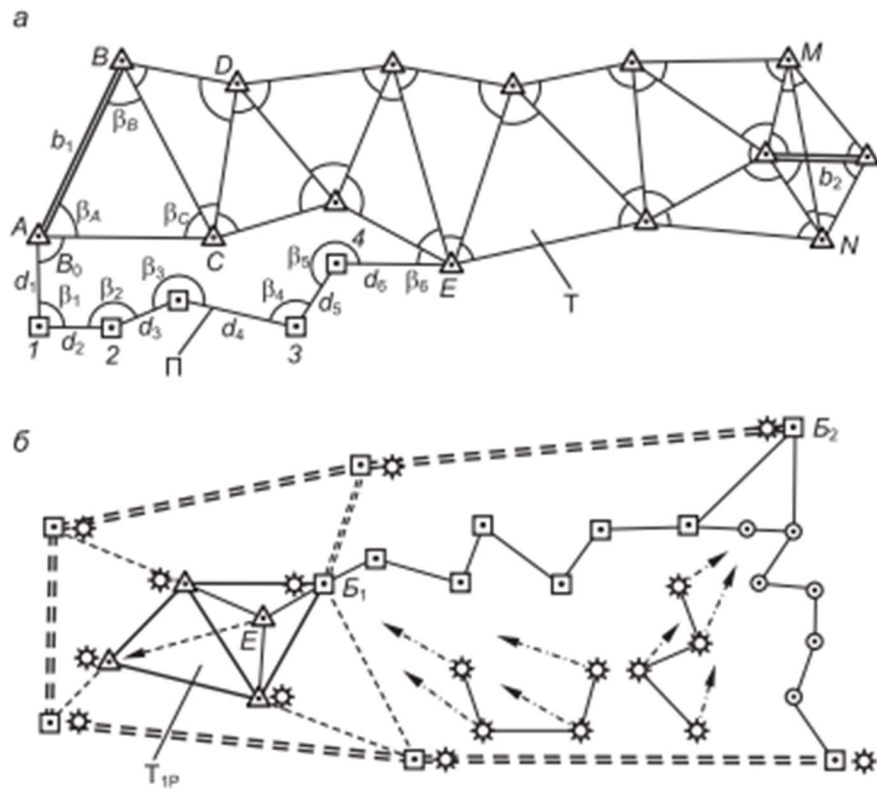


Рисунок 6.2. Схемы плановых геодезических сетей:

*a* – триангуляция (Т) и полигонометрия (П); *б* – спутниковые сети:  $\triangle$  – пункты триангуляции;  $\square$  – пункты полигонометрии;  $\odot$  – пункты теодолитных ходов;  $\square$   $\star$  – опорные пункты спутниковых геодезических сетей;  $B_1, B_2$  – базовые пункты спутникового позиционирования;  $\star$  – определяемые спутниковые пункты

Длины остальных сторон вычисляют по тригонометрическим формулам, находят дирекционные углы сторон и определяют координаты пунктов. Трилатерация – метод построения геодезических сетей в виде треугольных фигур, в которых измеряются только их стороны (расстояния между центрами геодезических пунктов), а углы между сторонами вычисляют решением треугольников.

Метод полигонометрии основан на построении геодезической сети, состоящей из ломаных линий, называемых ходами, вершины которых закреплены геодезическими пунктами (см. рис.6.2, а). Измеряются длины  $d$  сторон хода и горизонтальные углы  $\beta$  между ними. Полигонометрические ходы опираются на пункты триангуляции, относительно которых вычисляются плановые координаты пунктов хода, а их высотные координаты определяются нивелированием.

Пункты государственных геодезических сетей 1-го и 2-го классов являются исходными для развития геодезических сетей любого назначения на территории государства. Расстояния между ними составляют 7–25 км. Для увеличения плотности исходных геодезических пунктов внутри сетей 1-го и 2-го классов выполняется развитие сетей триангуляции и полигонометрии 3-го и 4-го классов (длины сторон 2–8 км). Погрешности расстояний между соседними

пунктами составили 5– 15 см (в относительной мере от 1 : 300 000 до 1 : 25 000).

Точность измерения углов триангуляции 1, 2, 3 и 4-го классов характеризуется средними квадратическими погрешностями 0,7"; 1"; 1,5" и 2", а средние квадратические относительные погрешности определения длины сторон в слабом месте (вдали от базисов) – относительными погрешностями 1/200 000; 1/150 000; 1/120 000; 1/25 000.

В государственных полигонометрических сетях 1, 2, 3 и 4-го классов горизонтальные углы измерялись со средними квадратическими погрешностями 0,4"; 1"; 1,5" и 2", длина сторон – с относительными средними квадратическими погрешностями 1/300 000; 1/250 000; 1/150 000 и 1/25 000.

Государственные нивелирные сети 1, 2, 3 и 4-го классов на местности закреплены постоянными знаками – реперами (рис.6.3), которые закладывают или в грунт (грунтовые реперы), или в стены капитальных зданий и сооружений (стенные реперы).

Высота репера в прошлом определялась только наземными способами нивелирования (измерения превышений), которые по точности подразделяются на нивелирование I, II, III и IV классов. Погрешности нивелирования в прямом и обратном направлениях, т.е. нивелирования двойным ходом, соответственно характеризуются величинами 0,5; 2; 4 и 8 мм на 1 км нивелирного хода, допустимые невязки превышений определяются соответственно классу нивелирования следующими величинами:

$$3\sqrt{L}, 5\sqrt{L}, 10\sqrt{L}, 20\sqrt{L}, \text{ мм}$$

где  $L$  – длина хода, км.

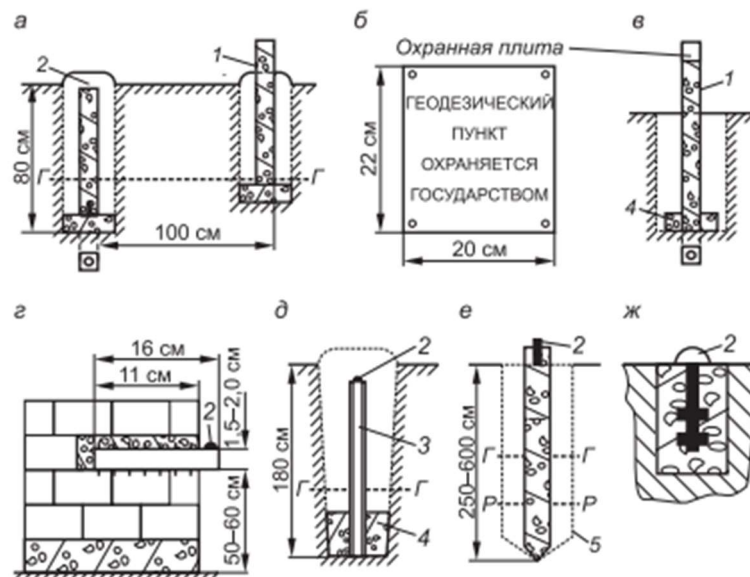


Рис. 6.3. Схемы реперов и знаков:

а, д – репер грунтовый для зоны сезонного промерзания; б, в – охранная плита и опознавательный столб; г – стенной репер; е – репер свайный для закладки в скважине ниже зоны рыхлых грунтов; ж – репер плиточный (цокольный) для закладки в конструкциях сооружений; 1 – опознавательный столб; 2 – носитель высотной координаты (выступ для постановки нивелирной рейки); 3 – труба диаметром 30–50 мм или отрезок рельса; 4 – якорь бетонный; 5 – скважина; Г – граница глубины промерзания грунтов; Р – основание слоя рыхлого грунта

*Плановые сети сгущения.* Сети сгущения необходимы для увеличения количества опорных пунктов на территории строительства или крупного промышленного предприятия при геодезическом обеспечении съемочных, строительных или горных работ. Сети сгущения создаются относительно пунктов более высокого класса точности методами триангуляции или полигонометрии (рис.6.3, б). Дополнительные пункты сетей сгущения (например, пункт Е) определяются раз личными способами: триангуляционным, прямой или обратной угловыми засечками и др.

По точности эти сети подразделяются на сети 1-го и 2-го разрядов. Они опираются на геодезические пункты более высокого класса точности. Средние квадратические погрешности измерения углов в разрядных сетях составляют 5" и 10", относительные погрешности сторон в слабом месте не более 1/20 000 и 1/10 000.

Съемочное геодезическое обоснование предназначено для координатной привязки в плане и по высоте материалов топографических съемок, изыскательских, инженерно-геодезических и других работ. Съемочное обоснование развивается внутри сетей сгущения. Места для пунктов съемочного обоснования выбирают с учетом технологии предстоящих съемочных и изыскательских работ и закрепляют постоянными или временными знаками (деревянными кольями или металлическими стержнями). Координаты пунктов съемочного обоснования определяют полигонометрией (рис.6.3, б), микротриангуляцией и различными засечками технической точности, при этом углы в треугольных фигурах не должны быть меньше 30° и больше 150°, а длина их сторон не больше 150–250 м.

Полигонометрический ход технической точности называют теодолитным ходом, в нем углы измеряются со средней квадратической погрешностью 0,5', стороны длиной от 20 до 350 м – с допустимой относительной погрешностью 1/1000–1/3000.

Сети специального назначения создаются для геодезического обеспечения строительства, как правило, уникальных энергетических, гидротехнических, мелиоративных и других сооружений. Методы создания таких сетей могут быть любыми из рассмотренных, но при этом точность определения взаимного положения пунктов может существенно превосходить любые из ранее рассмотренных. Этого добиваются применением специальных методик и приборов для производства измерений.

Для закрепления координированных точек используют специальные типы центров, обеспечивающие их стабильное пространственное положение на период строительства и эксплуатации объекта. Плановые и высотные координаты пунктов геодезической сети приводятся в отдельных каталогах координат или высот пунктов, которые хранятся в организациях, ведущих геодезические работы, и в районных, областных и республиканских органах геодезического надзора Государственного комитета по имуществу Республики Беларусь.

## Вопрос 6.2. Понятие о спутниковых системах местоопределения и современных геодезических опорных сетях

Общие характеристики спутниковых систем местоопределения. К концу 80-х гг. XX в. в результате практической реализации большого объема сложных научных и технических разработок в Соединенных Штатах Америки была создана спутниковая глобальная система позиционирования (определения координат или местоопределения) GPS – сокращение полного названия NAVSTAR GPS: NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System (навигационная система определения расстояний и времени, глобальная система позиционирования). Спутники GPS равномерно размещены в шести орбитальных плоскостях, наклоненных относительно плоскости экватора на  $55^\circ$ , высота над поверхностью Земли около 20 150 км. Период обращения спутников составляет 12 ч 58 мин. На рис.6.4 показан пример расположения таких спутников в трех орбитальных плоскостях В, Е и F (всего существует шесть орбитальных плоскостей).

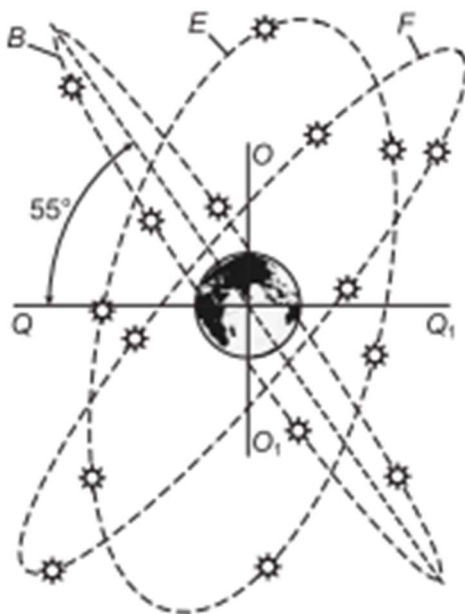


Рис. 6.4. Схема части космического сегмента спутниковой навигационной системы GPS: OO1 – ось вращения Земли; QQ1 – плоскость экватора

В России создана аналогичная система ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), состоящая из 24 спутников, 3 из которых резервные. Все спутники вращаются на средней высоте 19 100 км над геоидом.

Создана европейская спутниковая навигационная система «Galileo». При этом общая космическая группировка навигационных спутников достигнет 80 единиц, соответственно возрастет точность определения координат с помощью средств, способных принимать и обрабатывать сигналы всех трех спутниковых систем.

Каждая навигационная спутниковая система включает три составляющих: космический сегмент (созвездие спутников), сегмент контроля и управления (наземные станции слежения), сегмент пользователей (аппаратура пользователей). Пространственное положение спутников в геоцентрической системе координат (относительно центра масс Земли) известно в каждый момент времени.

Аппаратура спутников генерирует сложные числовые коды, которые повторяются каждую миллисекунду. Коды составлены так, чтобы обеспечивать компьютерное распознавание спутников, сравнение кодовых данных и устранение неоднозначностей при определениях расстояний от приемников до спутников.

Данные о конкретных параметрах орбиты каждого спутника вводятся в память компьютерного блока GPS-приемников в виде так называемого альманаха, который используется для выяснения того периода времени, когда снижается точность позиционирования вследствие неблагоприятного геометрического расположения созвездия наблюдаемых спутников. Данные о самых незначительных отклонениях спутников от их расчетных орбит выявляются наземными станциями слежения и передаются через спутники потребителям в виде информационных сообщений.

Электроэнергию спутник получает от двух солнечных батарей и от двух аккумуляторов при пролете в тени Земли. Бортовые стандарты частоты поддерживают стабильность часов спутника в пределах  $1 \cdot 10^{-12} \div 1 \cdot 10^{-13}$  с и управляют постоянством основной частоты 10,23 МГц. Из основной частоты формируются две или три рабочих частоты всех спутников GPS:

$$L1 = f_0 \cdot f_{L1} = 10,23 \cdot 154 = 1275,42 \text{ МГц (длина волны } \lambda_1 = 19,05 \text{ см);}$$

$$L2 = f_0 \cdot f_{L2} = 10,23 \cdot 120 = 1227,60 \text{ МГц (длина волны } \lambda_2 = 24,45 \text{ см);}$$

$$L3 = f_0 \cdot f_{L3} = 10,23 \cdot 115 = 1176,45 \text{ МГц (длина волны } \lambda_3 = 25,5 \text{ см).}$$

Сигналы  $L_i$  зашифрованы специальными кодами, которые предназначены для повышения точности определения координат GPS-приемника. Вычислительный модуль двухчастотного приемника осуществляет компьютерную обработку кодов, зашифрованных в сигналах  $L1$  и  $L2$ , и выдает в реальном времени геоцентрические широту  $\phi_g$  и долготу  $\lambda_g$  центра антенны приемника. В процессе обработки сигналов определяются текущие расстояния (дальности) между приемником и наблюдаемыми спутниками и решается пространственная обратная геодезическая задача по определению геоцентрических координат центра приемника.

В системе ГЛОНАСС спутники распределены по трем орбитам. Для формирования сигналов  $L1$  и  $L2$  на каждом спутнике установлен стабильный генератор основной частоты  $f_0 = 5,11$  МГц, а несущие частоты формируются с учетом номера спутника  $n$  согласно следующим зависимостям:

$$L1 = f_0 \cdot f_{L1} + 0,5625 \cdot n \text{ (} \lambda_1 = 18,7 \text{ см);}$$

$$L2 = f_0 \cdot f_{L2} + 0,4375 \cdot n \text{ (} \lambda_2 = 24,1 \text{ см).}$$

Аппаратура пользователей многообразна. В геодезических работах используют двухчастотные и одночастотные приемники. Первые принимают

сигналы на частотах L1 и L2 и специальные кодовые сигналы; вторые – сигналы только на одной частоте L1 или L2 и кодовый сигнал.

Сущность и точность спутниковых измерений расстояний. Измерения дальностей между приемником и спутниками, а также наземные расстояния между приемниками основаны на использовании кодовых и фазовых сигналов, излучаемых спутниками.

Кодовые измерения дальностей выполняются со значительными погрешностями (до нескольких метров), получаемые величины называют псевдодальностями. Аппаратура спутника и приемника синхронно генерируют однотипные кодовые сигналы. Кодовые сигналы от спутника поступают к приемнику с запозданием на время  $\tau$ , равное времени распространения радиоволны, и расстояние между спутником и приемником (псевдодальность) будет

$$S_{\Pi} = c\tau + \delta\tau \quad (6.1)$$

где  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $\delta\tau$  – искажение псевдодальности (или поправка), вызванное неполной синхронностью работы электронных модулей спутника и приемника.

Фазовые измерения расстояний основаны на определении целого числа  $N$  радиоволн длиной  $\lambda$  между спутником и приемником, и измерении дробной части волны  $\Delta\lambda$ , которую находят по разности фаз  $\Delta\phi$  излученной и принятой несущей частоты, исходя из соотношения  $\delta\lambda / \lambda = \delta\phi^{\circ} / 360^{\circ}$ , т.е.  $\delta\lambda = \lambda \cdot (\delta\phi^{\circ} / 360^{\circ})$ . При этом получим искомое расстояние  $S_{\phi}$ :

$$S_{\phi} = (N + \delta\phi^{\circ} / 360^{\circ})\lambda + \delta R \quad (6.2)$$

где  $\delta R$  – суммарная поправка, учитывающая влияние тропосферы, ионосферы, погрешностей мгновенных координат спутника, несовпадения хода часов спутника и приемника, инструментальных погрешностей, релятивистских эффектов и др.

При приеме сигнала L1 или L2 только от одного спутника в уравнении (6.2) невозможно определить целое число радиоволн  $N$ , поэтому для решения задачи сигналы принимаются от нескольких спутников. По данным одночастотных приемников в процессе компьютерной постобработки записанных фазовых и кодовых сигналов определяются расстояния  $D_i$  до спутников и решается обратная пространственная задача по определению координат антенны приемника. При использовании двухчастотных приемников принимаются сигналы на частотах L1 и L2 и по результатам совместной автоматической обработки фазовых и кодовых сигналов в реальном времени определяются геоцентрические координаты приемника. В процессе компьютерной постобработки вычисляют прямоугольные координаты точек позиционирования (например, в проекции Гаусса – Крюгера).

Геометрический фактор созвездия спутников. Для достаточно точного определения координат приемника количество наблюдаемых спутников должно быть не менее четырех, а для более точного позиционирования – не менее пяти или шести, при этом положение спутников должно отвечать благоприятному геометрическому фактору (ГФ). Хороший GF соответствует

наибольшему рассредоточению спутников в южном секторе небосвода, с запада на восток, при возвышении над горизонтом не менее  $15^\circ$ . При удовлетворительном ГФ точность позиционирования понижается, при плохом ГФ точные работы прерывают. Сведения о предстоящих изменениях ГФ передаются в навигационных сообщениях для планирования работ.

Точность непосредственного (абсолютного) позиционирования. Непосредственное позиционирование – это определение геоцентрических координат антенны автономного наземного приемника относительно спутников, координаты которых определены относительно центра масс Земли. Точность результата ограничена до 5–60 м следующими факторами:

- влияние на радиосигналы ионосферы Земли (слой электрически заряженных частиц на высотах 130–200 км над поверхностью Земли), в этой среде несколько снижается скорость радиосигналов и возникает эффект многолучевого распространения электромагнитных колебаний за счет неодинакового их преломления, соответствующая погрешность координат  $m_1 \approx 1,5$  м;

- малые неточности хода бортовых часов вызывают погрешность координат  $m_2 \approx 0,7$  м;

- погрешности позиции спутника по альманаху иногда снижают точность местоопределения до значений  $m_3 \approx 20$ –50 м; • погрешности от воздействия ионосферы и атмосферы на траекторию радиолуча составляют  $m_4 \approx 0,7$  м;

- погрешности дальностей за счет многолучевости возникают от тех частей электромагнитных волн, которые отражаются от земной поверхности или элементов ближайших высоких сооружений, проходят более длинный путь и вызывают искажения фазы основного сигнала, причем соответствующие погрешности расстояний достигают 5–6 см и больше, а при кодовых измерениях – нескольких метров.

Относительное позиционирование (метод базовой станции), его точность. Относительное позиционирование со стоит в том, что один из наземных приемников (базовый приемник) устанавливаются на пункте геодезической сети с известными координатами (базовом пункте). Мобильные приемники устанавливаются над пунктами, координаты которых требуется определить. Все приемники одновременно принимают сигналы с видимых спутников. При ограниченных расстояниях между базовым и мобильными приемниками (до 30–40 км) все основные погрешности непосредственного позиционирования оказываются практически равными на территории приема сигналов и незначительно влияют на разность спутниковых координат базового и мобильных приемников. В результате такой схемы приема сигналов искомые координаты мобильных приемников определяются относительно базового пункта с высокой точностью.

На базовой станции в процессе непрерывного приема сигналов для прилегающей территории определяются также дифференциальные поправки к измеренным фазовым дальностям или к координатам пунктов для перехода от геоцентрических координат системы WGS-84 или ПЗ-90 к координатам в нужной проекции.

По методу базовой станции при расстояниях  $D$  (км) наиболее точные GPS-приемники дают возможность определить:

- расстояния с погрешностью  $\Delta D = (3 \div 10)$  мм +  $D (1 \div 2)$  мм;
- превышения в 2 раза менее точно, т.е.  $\Delta H = (6 \div 20)$  мм +  $D (2 \div 4)$  мм;
- азимуты линий с погрешностью  $\Delta A = (3 \div 10)\rho / L + (1 \div 2'')$ , где  $\rho \approx 206\,000$  – число секунд в радиане.

Например, при  $D = 1$  км получаем абсолютную погрешность расстояния  $\Delta D = (4 \div 12)$  мм или относительную  $\Delta D/D = 1/250\,000 \div 1/83\,000$ ; для расстояний  $D = 10$  км соответственно находим  $\Delta D = (13 \div 30)$  мм;  $\Delta D/D = 1/770\,000 \div 1/330\,000$ .

Отметим, что в современной практике спутниковых геодезических работ разность фаз измеряется с погрешностью около 1%, следовательно, теоретически достижимая точность определения расстояний фазовым методом на ограниченных расстояниях в несколько километров равна  $\Delta \lambda \approx \lambda / 100$  и в настоящее время характеризуется пределом 2–2,5 мм.

В таблице 6.1 приведены показатели фактической точности местоопределения по методу базовой станции при различных режимах перемещений и установок мобильного приемника (ровера).

Режим статики является наиболее точным, но длительным (до нескольких часов). Используется при выполнении высокоточных геодезических работ. Режим быстрой статики – это разновидность статического режима. Продолжительность измерений ограничивают до нескольких минут при благоприятном геометрическом факторе созвездия спутников. Режим кинематики используют при выполнении съемочных работ с одночастотными или двухчастотными приемниками, когда мобильный приемник останавливают на определяемых пунктах на короткое время, после чего перемещают (без исключения) на другие определяемые точки. К режиму кинематики относят:

- режим «стой – иди» (Stop and Go) осуществляют с кратковременными остановками ровера над съемочными точками, координаты которых определяют при постобработке;

- режим RTK (кинематика в реальном времени – Real Time Kinematics) предполагает оснащение приемников радиомодемами и определение координат точек установки ровера в течение нескольких секунд с учетом поправок, полученных по радиомодему с базовой станции;

- режим OTF (On The Fly – в полете) используется для определения координат центров фотографирования при аэрофотосъемке с самолета, когда обеспечивается непрерывный прием сигналов с необходимого числа спутников. Одновременный прием сигналов со спутников двух систем ГЛОНАСС и GPS (или трех систем, включая «Galileo») позволяет при сокращении времени позиционирования обеспечить высокую точность определения искомым координат.

Таблица 6.1. Достижимая точность определения координат точек спутниковыми методами относительно базовой станции

Название режима позиционирования	Характеристики режима позиционирования мобильным приемником (ровером) относительно базовой станции	Достижимая точность плановых координат ровера, мм
Статика	Наблюдения 5–6 спутников в течение от 40 мин до нескольких часов, базисные линии до 30 км	$\pm(3 \div 5 + 1 \cdot 10^{-6}D)$
Быстрая статика	Малое время наблюдения 5–6 спутников (от 5 до 30 мин), короткие базисные линии (менее 10 км)	$\pm(10 \div 30 + 2 \cdot 10^{-6}D)$
Кинематика	Определение положения точек при работе ровера в движении или с короткими остановками	$\pm(10 \div 30 + 2 \cdot 10^{-6}D)$
«Стой–иди»	Остановки на 1–2 мин на определяемых пунктах	$\pm(10 \div 30 + 2 \cdot 10^{-6}D)$
RTK	Постоянная связь с базовой станцией по радиомодему и определение координат в реальном масштабе времени	$\pm(10 \div 20 + 2 \cdot 10^{-6}D)$
OTF (в полете)	Определение двухчастотным приемником координат центров фотографирования при аэрофотосъемке в полете	100–200

Спутниковые геодезические приемники. В Беларуси используют геодезические приемники фирм США, Германии, Швейцарии (TRIMBLE, LEICA и др.).

На рис.6.5 показан одночастотный полевой GPS-приемник LEICA SR20, обеспечивающий в режиме «статика» измерения базовых линий с погрешностью от 5 до 10 мм +  $2 \cdot 10^{-6}D$ .

GPS-приемник LEICA Sistem 1230 характеризуется временем инициализации 8 с (вхождения электроники в рабочий режим), действует на удалении от базовой станции до 30 км и больше при хороших условиях приема сигналов. Масса процессора – 1,20 кг, контроллера – 0,48 кг, антенного модуля – 0,44 кг, батареи – 0,19 кг (2 шт.); время непрерывной работы – до 15 ч.

Показатели точности определения рас стояний GPS-приемником LEICA 1200 по методу базовой станции:



Рис.6.5. GPS-приемник LEICA SR20: 1 – корпус антенного модуля; 2 – выдвижная (телескопическая) штанга; 3 – подставка; 4, 5 – дисплей и клавиатура процессора; ZZ – вертикальная ось приемной части.

- в режиме измерений статика  $\Delta D = 5 \text{ мм} + 10^{-6}D$ ;
- в режиме измерений кинематика  $\Delta D = 10 \text{ мм} + 10^{-6}D$ ;
- при камеральной обработке (постобработке) на компьютере данных режима статика  $\Delta D = 3 \text{ мм} + 10^{-6}D$ ;
- погрешность превышения  $\Delta H$  в 2 раза больше погрешности расстояния  $\Delta D$ .

Программное обеспечение GPS-приборов включает полный набор программ по определению систем координат и трансформированию координат из одной системы в другую, в частности геоцентрических координат WGS-84 и ПЗ-90 в проекцию Гаусса – Крюгера или в местную систему координат.

Спутниковая государственная геодезическая сеть. Для модернизации государственной геодезической сети СССР, созданной методами триангуляции и полигонометрии, ее пункты были заново определены спутниковыми методами в системе ПЗ-90. Погрешности расстояний в 10–15 км между соседними пунктами уменьшились с 10–15 см до 2–4 см.

Спутниковые технологии заложены в основу работ по дальнейшему повышению точности государственных и местных геодезических сетей. На территории России создается фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС), расстояния между ее пунктами приняты в 800–1000 км, а погрешности расстояний между ними составляют 1 мм на 100 км (1 : 100 000 000).

Внутри ФАГС размещаются пункты высокоточной геодезической сети (ВГС) при расстояниях между ними 150–500 км, определяемых с погрешностью 1 мм на 10 км (10 000 000). По результатам наблюдений за изменениями глобальных координат пунктов ФАГС и ВГС определяются элементы общих деформаций земной коры. Внутри ФАГС и ВГС определяются координаты пунктов спутниковой геодезической сети I класса СГС-1 при расстояниях между ее пунктами 20–40 км и погрешностями, близкими к 1 мм на 1 км (1 :

1000 000). Пункты СГС-1 предназначены для обеспечения исходными координатами других видов менее точных спутниковых и неспутниковых геодезических работ по развитию опорных и съемочных сетей, проведению топографических съемок, различных изысканий и др.

Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь создается в соответствии с нормативными документами: государственными стандартами СТБ 1653-2006 и СТБ 1820-2007, а также техническими кодексами установившейся практики: ТКП 120-2007 (03150 «Порядок создания фундаментальной астрономо-геодезической сети» и ТКП 119-2007 (03150 «Порядок создания спутниковой геодезической сети I класса»). Работы по сгущению сети опорных геодезических пунктов осуществляются спутниковыми методами. При этом отпала необходимость строить дорогостоящие высокие сигналы типа знаков, показанных на рис.6.1, в. Главной геодезической основой территории Беларуси служит спутниковая ВГС, созданная в 1998 г. (рис.6.6), координаты ее центрального пункта «Минск» определены также в системе ФАГС Российской Федерации.



Рис. 6.6. Схема высокоточной геодезической сети (ВГС) Республики Беларусь

Согласно СТБ 1653–2006 пространственное положение пунктов ВГС Беларуси должно определяться методами космической геодезии, обеспечивающими точность их взаимного положения со средними квадратическими погрешностями, не превышающими:

- в плане  $m_D = \pm 3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-8}D$ ;
- по высоте  $m_H = \pm 5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-8}D$ , где  $D$  – расстояние между пунктами.

Например, при  $D = 150 \text{ км}$  находим  $m_D = 10 \text{ мм}$  (или  $1 : 15\,000\,000$ ) и  $m_H = 15 \text{ мм}$ ;

при  $D = 300 \text{ км}$  определяем  $m_D = 20 \text{ мм}$  (или  $1 : 15\,000\,000$ ) и  $m_H = 26 \text{ мм}$ .

Спутниковая геодезическая сеть СГС-1 служит для сгущения пунктов ВГС. Расстояния между пунктами СГС-1 должно составлять 15–25 км. Погрешность взаимного положения пунктов допускается: • в плане  $m_D = \pm 3 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-7}D$ ; • по высоте  $m_H = \pm 5 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-7}D$ .

Ранее созданные плановые сети триангуляции 1–4-х классов модернизируются на основе спутниковых технологий, точность определения их координат не должна быть грубее  $\pm 10$  см.

Опорные плановые геодезические сети для съемочных работ. Для топографо-геодезических изысканий на территориях городов, промышленных предприятий, мест добычи полезных ископаемых, вдоль линий метрополитенов необходимо создавать местные плановые опорные геодезические сети всеми доступными современными методами с необходимой точностью. Спутниковые методы обеспечивают снижение затрат времени, трудоемкости работ и стоимости геодезических пунктов. При расчетах координат пунктов местной геодезической сети поверхность относимости следует совмещать со средним уровнем территории объекта – этим устраняется необходимость введения ряда поправок за проецирование геодезических точек на поверхность геоида.

Опорные пункты и пункты съемочного обоснования на освоенных территориях рекомендуется закреплять постоянными знаками для многократного использования длительное время.

Количество и местоположение опорных геодезических пунктов должны быть обоснованы в проекте съемочного обоснования, в котором основное место отводится теодолитным (полигонометрическим) ходам и при необходимости предусматриваются геодезические засечки.

Возможности модернизации традиционных методов создания опорных и съемочных геодезических сетей основаны на внедрении спутниковых технологий, а также электронных тахеометров. Спутниковыми приборами можно создавать плановое и высотное съемочное обоснование, а также выполнять съемки местности. Электронные тахеометры эффективны для угломерных и дальномерных измерений и съемочных работ.

### **Вопрос 6.3. Вычислительная обработка теодолитных ходов**

#### **Вопрос 6.3.1. Задачи вычислительной обработки и подготовительные работы**

*Вычислительная обработка теодолитных ходов* производится для получения координат точек этих ходов.

Обработку результатов полевых измерений начинают с проверки правильности всех записей и вычислений, сделанных в журнале, а также вычислений поправок за наклон сторон теодолитного хода. Если не произвести этих проверок, то нередко погрешности полевых вычислений вскрываются уже после полной обработки ходов, что вызывает необходимость переделывать всю работу заново. Поэтому на проверку полевых вычислений обращается серьезное внимание и предъявляется требование выписывать чернилами средние значения углов и длин линий в соответствующие графы полевого журнала. Неверные результаты зачеркивают одной чертой и сверху пишут правильные.

После проверки журналов, составляют *схематический чертеж* всех ходов, записывают на нем средние значения измеренных горизонтальных углов, горизонтальные проложения. На схематическом чертеже особо отмечают пункты геодезической сети, к которым производилась привязка теодолитных ходов, изображают линии привязки, записывают исходные дирекционные углы, горизонтальные проложения, измеренные при привязке.

Схематический чертеж теодолитных ходов с выписанными на нем значениями измеренных углов необходим для вычисления угловых невязок. Разность между тем, что имеется и тем, что должно быть, называется *невязкой*.

Дальнейшая обработка измерений складывается из следующих действий:

- обработка угловых измерений;
- вычисление дирекционных углов и румбов сторон;
- вычисление и увязка приращений и координат вершин теодолитного хода;
- вычисление координат.

Все вычисления при обработке теодолитного хода производятся в ведомости вычисления координат.

### Вопрос 6.3.2. Увязка углов замкнутого теодолитного хода

Проверив правильность вычислений в полевом журнале, средние значения измеренных углов теодолитного хода вписывают в соответствующую графу ведомости вычисления координат по порядку в направлении хода часовой стрелки. Затем вычисляют сумму углов и записывают ее в этой же графе внизу. Вычислив сумму углов полигона, определяют угловую невязку по формуле:

$$f_{\beta} = \sum \beta_n - \sum \beta_T \quad (6.3)$$

Где  $\sum \beta_n$  - сумма измеренных углов (практическая);  
 $\sum \beta_T$  - теоретическая сумма углов.

Для *замкнутого теодолитного хода* (полигона) теоретическая сумма углов определяется по формуле:

$$\sum \beta_T = 180^{\circ}(n - 2) \quad (6.4)$$

где  $n$  – число измеренных углов.

После определения невязки нужно определить допустима ли она. Допустимую невязку в геодезии устанавливают по правилам теории погрешностей. Так, для углов, измеренных техническим теодолитом Т30, допустимую угловую невязку в полигоне определяют по формуле:

$$f_{\beta_{дон}} = 1' \sqrt{n} \quad , \quad (6.5)$$

или

$$f_{\beta} \leq 1' \sqrt{n}$$

Если невязка в углах получилась больше, чем допустимая, то нужно второй раз проверить вычисление углов в полевом журнале, затем перемерить углы на местности.

Угловую невязку, если она допустима, распределяют на все углы поровну с обратным знаком, т. е. в измеренные углы вводят поправки по формуле:

$$v_{\beta} = \frac{-f_{\beta}}{n} \quad (6.6)$$

Если полученная невязка не делится на  $n$  без остатка, тогда в одни углы вводят поправки большие, чем в другие. Так как углы, заключенные между короткими сторонами измеряются с большей погрешностью, чем углы, заключенные между длинными сторонами, то большие поправки вводят в углы, заключенные между короткими сторонами.

Сумма поправок в углы должна точно равняться невязке, взятой с обратным знаком, т.е.

$$\sum v_{\beta} = -f_{\beta} \quad (6.7)$$

Сумма увязанных углов должна равняться теоретической сумме углов.

### Вопрос 6.3.3. Особенности увязки углов разомкнутого теодолитного хода

При увязке углов разомкнутого теодолитного хода с привязкой к пунктам геодезической сети (рис.6.7) в соответствующую графу ведомости вписывают измеренные углы по ходу, либо только правые, либо только левые, начиная и заканчивая примычными углами, измеренными при начальной и конечной точках.

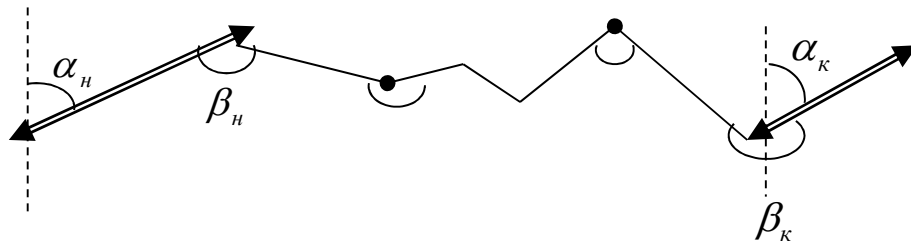


Рис. 6.7. Схема разомкнутого теодолитного хода

В графу *Дирекционные углы* ведомости вычисления координат вписывают исходные дирекционные углы ( $\alpha_n, \alpha_k$ ). После этого приступают к увязке углов разомкнутого хода.

Вычислим последовательно дирекционные углы всех сторон хода, используя формулу передачи дирекционного угла на последующую сторону хода (для правых измеренных углов) имеем:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_n + 180 - \beta_1 \\ \alpha_2 &= \alpha_1 + 180 - \beta_2 = \alpha_n + 2 \cdot 180 - (\beta_1 + \beta_2) \\ \alpha_3 &= \alpha_2 + 180 - \beta_3 = \alpha_n + 3 \cdot 180 - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \\ &\dots\dots\dots \\ \alpha_k &= \alpha_{n-1} + 180 - \beta_n = \alpha_n + n \cdot 180 - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n) \end{aligned}$$

В общем виде получаем

$$\alpha_k = \alpha_n - n \cdot 180^\circ + \sum \beta_n \quad (6.8)$$

Т.е. *дирекционный угол конечной линии равен дирекционному углу начальной (исходной) линии плюс  $n \cdot 180$ , минус сумма правых по ходу углов (включая примычные).*

Для левых по ходу углов формула будет иметь вид:

$$\alpha_k = \alpha_n - n \cdot 180^\circ + \sum \beta_n \quad (6.9)$$

Т.е. *дирекционный угол конечной линии равен дирекционному углу начальной (исходной) линии минус  $n \cdot 180$ , плюс сумма левых по ходу углов (включая примычные).*

Это равенство будет получено в теодолитном ходе, если все углы увязаны. То есть *теоретическая сумма углов в разомкнутом ходе* определяется по формуле:

для правых измеренных углов:

$$\sum \beta_T = \alpha_n - \alpha_k + n \cdot 180^\circ \quad (6.10)$$

а для левых измеренных углов:

$$\sum \beta_T = \alpha_k - \alpha_n + n \cdot 180^\circ \quad (6.11)$$

Это - математическая запись первого геометрического условия в разомкнутом теодолитном ходе.

Угловая невязка в разомкнутом ходе определяется по такой же формуле, как и для замкнутого:

$$f_\beta = \sum \beta_n - \sum \beta_m \quad (6.12)$$

Допустимая угловая невязка для разомкнутого хода, в котором углы измерялись тридцатисекундным теодолитом, определяется по формуле:

$$f_{\beta_{\text{дон}}} = 2' \sqrt{n} \quad (6.13)$$

где  $n$ - число углов, включая примычные.

Угловая невязка распределяется также, как в полигоне. Поровну на все углы. Исправленные значения углов вычисляются по формуле:

$$\beta_i = \beta_{i(\text{изм})} + v_i \quad (6.14)$$

### Вопрос 6.3.4. Вычисление дирекционных углов

Для получения координат точек полигона нужно знать дирекционные углы и горизонтальные проложения линий. Зная дирекционный угол одной линии, можно вычислить дирекционные углы всех остальных линий теодолитного хода. Например, пусть имеем замкнутый теодолитный ход из пяти вершин (рис.6.8), в качестве исходного дирекционного угла пример дирекционный угол линии 1-2, полученный в результате привязки этой линии к пунктам геодезической сети.

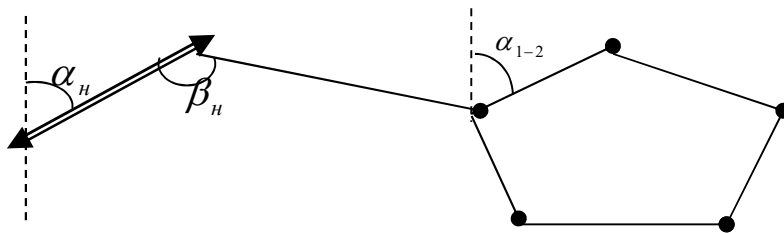


Рис. 6.8. Схема замкнутого теодолитного хода

Дирекционные углы остальных линий полигона вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_{2-3} &= \alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2 \\ \alpha_{3-4} &= \alpha_{2-3} + 180^\circ - \beta_3 \\ \alpha_{4-5} &= \alpha_{3-4} + 180^\circ - \beta_4 \\ \alpha_{5-1} &= \alpha_{4-5} + 180^\circ - \beta_5 \end{aligned} \quad (6.15)$$

Дирекционный угол исходной линии 1-2 можно получить снова, как:

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{5-1} + 180^\circ - \beta_5 \quad (6.16)$$

Эта запись означает, что, имея исходный дирекционный угол и последовательно вычисляя дирекционные углы всех остальных линий, должны получить исходный же дирекционный угол. Это служит контролем правильности вычисления дирекционных углов.

После определения дирекционных углов линии, определяют их румбы и записывают в соответствующую графу ведомости по известным формулам:

$$\begin{aligned}
 \text{для СВ: } r &= \alpha \\
 \text{для ЮВ: } r &= 180^0 - \alpha \\
 \text{для ЮЗ: } r &= \alpha - 180^0 \\
 \text{для СЗ: } r &= 360^0 - \alpha
 \end{aligned}
 \tag{6.17}$$

Правильность вычисления румбов, а также дирекционных углов контролируется зависимостью между увязанными углами, меньшими  $180^0$  и румбами, выражаемой четырьмя формулами:

- 1) если буквы названий румбов разные, то угол равен разности румбов (во всех случаях от большего румба отнимают меньший):  $\beta = r_1 - r_2$ ,  
 СВ:  $70^0 40'$  и ЮЗ:  $20^0 10'$   $\beta = 70^0 40' - 20^0 10' = 50^0 30'$ ;
- 2) если буквы названий румбов одинаковые, то угол равен  $180^0$  минус разность румбов:  $\beta = 180^0 - (r_1 - r_2)$ ,  
 СВ:  $70^0 40'$  и СВ:  $20^0 10'$   $\beta = 180^0 - (70^0 40' - 20^0 10') = 129^0 30'$ ;
- 3) если первые буквы названий румбов разные, а вторые одинаковые, то угол равен сумме румбов:  $\beta = r_1 + r_2$ ,  
 СВ:  $70^0 40'$  и ЮВ:  $20^0 10'$   $\beta = 70^0 40' + 20^0 10' = 90^0 30'$ ;
- 4) если первые буквы названий румбов одинаковые, а вторые разные, то угол равен  $180$  минус сумма румбов:  $\beta = 180^0 - (r_1 + r_2)$ ,  
 СЗ:  $20^0 10'$  и СВ:  $70^0 40'$   $\beta = 180^0 - (70^0 40' + 20^0 10') = 89^0 10'$ .

### Вопрос 6.3.5. Вычисление и увязка приращений координат замкнутого теодолитного хода (полигона)

После увязки углов замкнутого теодолитного хода и определения дирекционных углов и румбов сторон, приступают к вычислению приращений координат. Приращения координат линий определяют по известным формулам и записывают в соответствующие графы ведомости:

$$\begin{aligned}
 \Delta X &= S * \cos \alpha \\
 \Delta Y &= S * \sin \alpha
 \end{aligned}
 \tag{6.18}$$

Из геометрии известно, что сумма проекций сторон сомкнутого многоугольника на любую ось равна нулю. Спроектируем все линии полигона (рис.6.9) на оси координат и отметим на них положительные приращения координат и по одну сторону, а отрицательные – по другую.

Из рис.6.9 видно, что по каждой оси сумма положительных приращений координат равна сумме отрицательных приращений координат. Следовательно, теоретически должно быть:

$$\begin{aligned} \sum \Delta x_T &= 0; \\ \sum \Delta y_T &= 0 \end{aligned} \quad (6.19)$$

*т.е. алгебраическая сумма приращений координат в полигоне по каждой оси теоретически должна быть равна нулю.*

Вследствие ошибок измерения сторон и упрощенного способа распределения угловой невязки суммы вычисленных приращений координат в общем случае не будут равны теоретическим суммам.

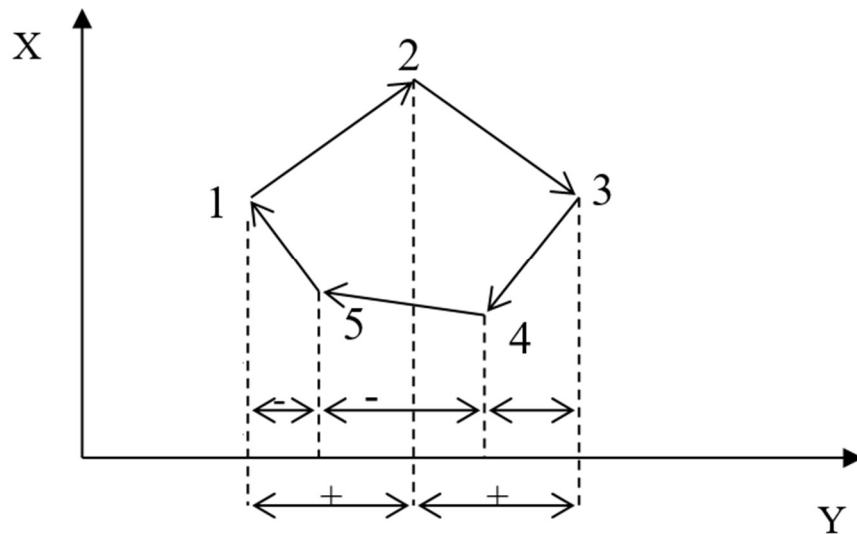


Рис. 6.9.

То есть практическая сумма приращений координат получается не равной теоретической:

$$\sum \Delta x_{\Pi} \neq \sum \Delta x_T \neq 0 \quad (6.20)$$

$$\sum \Delta y_{\Pi} \neq \sum \Delta y_T \neq 0$$

Возникают *невязки в приращениях координат*, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} f_x &= \sum \Delta x_{\Pi} - \sum \Delta x_T; \\ f_y &= \sum \Delta y_{\Pi} - \sum \Delta y_T \end{aligned} \quad (6.21)$$

или согласно формуле 6.20 для полигона невязки в приращениях координат равны практической сумме приращений координат:

$$\begin{aligned} f_x &= \sum \Delta x_{\Pi} \\ f_y &= \sum \Delta y_{\Pi} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Прежде, чем распределять невязки нужно убедиться в их допустимости. Для этого вычисляют *абсолютную невязку*:

$$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (6.23)$$

Абсолютная невязка главным образом зависит от периметра полигона. Чем больше периметр, тем большую невязку следует ожидать. Поэтому и допустимость невязки определяют в зависимости от периметра полигона. Для этого определяют относительную невязку в полигоне по формуле:

$$\frac{1}{N} = \frac{f_s}{\sum S_i} \quad (6.24)$$

$\frac{1}{N} \leq \frac{1}{2000}$  - при благоприятных условиях съемки;

$\frac{1}{N} \leq \frac{1}{1500}$  - при средних условиях;

$\frac{1}{N} \leq \frac{1}{1000}$  - при неблагоприятных.

*Недопустимая невязка* в периметре полигона чаще всего является результатом грубых погрешностей в измерениях линий, если не учтена длина целой ленты, либо во время измерения линии не учтена передача шпилек задним мерщиком переднему, вследствие чего получается просчет в 10 лент, либо отсчет остатка произведен не от того конца ленты.

По величине абсолютной невязки  $f_s$  *иногда* можно предположить, почему именно невязка получилась недопустимой. Если грубая погрешность вкралась в измерение одной линии, то можно определить в какую именно линию она вошла. Для этого вычисляем дирекционный угол невязки:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f_y}{f_x} \quad (6.25)$$

по знакам невязок  $f_x$  и  $f_y$  определяют название румба и смотрят в ведомости координат, какая линия имеет близкий к вычисленному румб. Результат измерения этой линии нужно проверить на местности.

Если румбы нескольких линий примерно равны румбу невязки, то надо проверить на местности измерения всех этих линий.

Если грубая погрешность вкралась в измерения нескольких линий с различными румбами, то указанным методом нельзя пользоваться, а надо проверить все измерения линий на местности.

Если *невязка в периметре оказалась допустимой*, то невязки в приращениях координат распределяют с обратным знаком на все приращения координат пропорционально горизонтальным проложениям линий:

$$v_{x_i} = -f_x * S_i / \sum S; \quad v_{y_i} = -f_y * S_i / \sum S \quad (6.26)$$

Контролем правильности вычисления поправок в приращения координат служит равенство: *сумма поправок в приращения координат по каждой оси должна быть равна невязке с обратным знаком*

$$\begin{aligned} \sum v_{\Delta x} &= -f_x \\ \sum v_{\Delta y} &= -f_y \end{aligned} \quad (6.27)$$

Полученные поправки алгебраически прибавляются к соответствующим приращениям координат, получают увязанные приращения:

$$\sum \Delta X_{испр} = \sum (\Delta X_{выч} + v_x) \quad (6.28)$$

$$\sum \Delta Y_{испр} = \sum (\Delta Y_{выч} + v_y) \quad (6.29)$$

*Сумма увязанных приращений координат по каждой оси должна равняться теоретической сумме.* Для полигона:

$$\sum \Delta X_{испр} = 0 \quad (6.30)$$

$$\sum \Delta Y_{испр} = 0$$

После увязки приращений вычисляют координаты всех точек полигона по формулам:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_i \quad (6.31)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \Delta Y_i$$

*Контролем* правильности вычисления координат служит то, что, последовательно вычисляя координаты точек полигона, должны получить координаты исходной точки, т.к. сумма увязанных приращений равна нулю.

### **Вопрос 6.3.6. Особенности увязки приращений координат разомкнутого теодолитного хода**

При вычислительной обработке разомкнутого теодолитного хода, решая последовательно прямую геодезическую задачу, вычислим приращения координат по каждой стороне хода  $\Delta X_i$  и  $\Delta Y_i$  (рис.6.10).

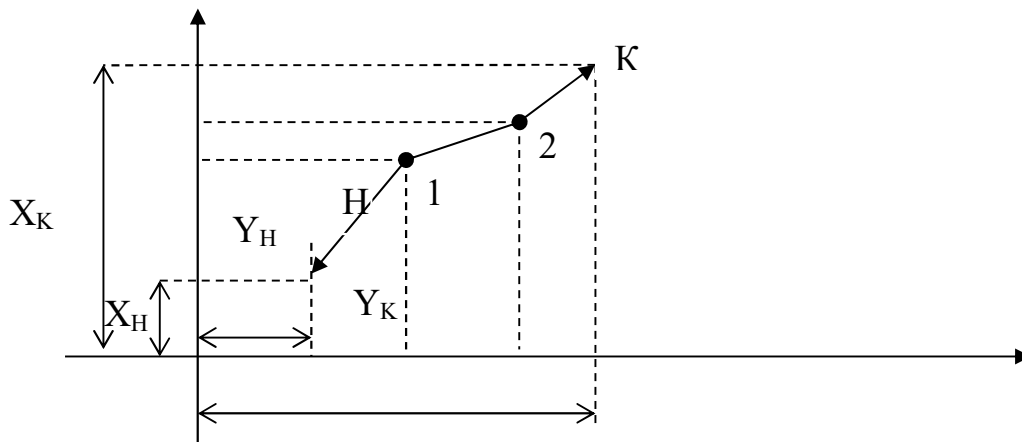


Рис. 6.10

Координаты пунктов хода получим по формулам:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{нач}; & Y_1 &= Y_{нач}; \\ X_2 &= X_1 + \Delta X_1; & Y_2 &= Y_1 + \Delta Y_1; \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{aligned} \quad (6.32)$$

$$\begin{aligned} X_{n-1} &= X_{n-2} + \Delta X_{n-2}; & Y_{n-1} &= Y_{n-2} + \Delta Y_{n-2}; \\ X_{нач} &= X_{n-1} + \Delta X_{n-1}; & Y_{нач} &= Y_{n-1} + \Delta Y_{n-1}. \end{aligned}$$

Сложим эти равенства и получим для приращений  $\Delta X_i$ :

$$(X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1}) + X_{нач} = X_{нач} + (X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1}) + \sum \Delta X_i$$

После приведения подобных членов имеем:

$$X_{кон} = X_{нач} + \sum \Delta X_i$$

или

$$\sum \Delta X_i = X_{кон} - X_{нач} \quad (6.33)$$

Аналогичная формула для суммы приращений  $\Delta Y$  имеет вид:

$$\sum \Delta Y_i = Y_{кон} - Y_{нач} \quad (6.34)$$

Получились еще два условия (6.33) и (6.34), которые называются *координатными*. Суммы приращений координат, подсчитанные по этим формулам, называются теоретическими суммами приращений. Вследствие ошибок измерения сторон и упрощенного способа распределения угловой невязки суммы вычисленных приращений координат в общем случае не будут равны теоретическим суммам; возникают невязки в приращениях координат:

$$f_x = \sum \Delta X_{выч} - \sum \Delta X_i \quad (6.35)$$

$$f_y = \sum \Delta Y_{\text{выч}} - \sum \Delta Y_i$$

по которым вычисляют абсолютную невязку хода:

$$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (6.36)$$

и затем относительную невязку хода:

$$\frac{1}{N} = \frac{f_s}{\sum S_i} \quad (6.37)$$

Относительная невязка разомкнутого теодолитного хода не должна превышать 1/1000, а при коротком ходе и при плохих условиях измерений относительную невязку допускают до 1/700.

Если относительная невязка в разомкнутом ходе допустима, то ее распределяют пропорционально длинам сторон.

$$v_{x_i} = -f_x * S_i / \sum S \quad (6.38)$$

$$v_{y_i} = -f_y * S_i / \sum S$$

После вычисления поправок в приращения вычисляют увязанные приращения и контролируют их сумму:

$$\sum \Delta X_{\text{испр}} = \sum \Delta X_T \quad (6.39)$$

$$\sum \Delta Y_{\text{испр}} = \sum \Delta Y_T$$

Затем последовательно вычисляют координаты точек хода. Должны получить исходные координаты конечной точки хода, что служит контролем правильности вычисления координат.