

УДК 528.11

СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ

С. Могильный, А. Шоломицкий

Доступность для рядового геодезиста использования спутниковых определений местоположения на земной поверхности позволяет говорить о возникновении так называемого геодезического навигационного пространства, постепенно вытесняющего и заменяющего пространство геодезических опорных пунктов. Поскольку полный переход на спутниковые методы не может произойти в одночасье, поэтому в настоящее время при выполнении инженерно-геодезических изысканий, строительстве, топографических съемках, кадастровых работах и т.п. во многих случаях имеет место использование как наземных геодезических измерений, так и спутниковых приемников [1, 2].

Электронные тахеометры нарушили классические схемы построения сетей сгущения и привели практически разные виды сетей к одному виду – линейно-угловым сетям сгущения, т.е. сделали ненужным деление сетей по топологии на теодолитные хода, засечки, аналитические сети и т. п. Спутниковые измерения в современных геодезических сетях используются в основном для таких целей [1, 2, 5]:

- повышение точности и надежности сети;
- передачи системы координат с опорных пунктов, удаленных от места развития локальной сети;
- соединения нескольких локальных сетей в единую систему.

Построение сетей сгущения только на основе спутниковых измерений встречается сравнительно редко, поскольку для спутниковых наблюдений необходима достаточная открытость местности вокруг точки стояния приемника, поэтому применяются комбинированные сети. В стесненных условиях застроенной территории или в закрытой местности приходится устанавливать приемник в некотором удалении от опорных или определяемых пунктов, выполняя его привязку с помощью дополнительных звеньев линейно-угловой сети. В результате получаются достаточно сложные и разнообразные геометрические конструкции сетей, требующие гибких и универсальных алгоритмов их вычисления и уравнивания.

При обработке таких сетей зачастую используется отдельная обработка спутниковых и наземных измерений, т.е. уравниваются спутниковые измерения и полученные координаты точек используются для наземных линейно-угловых звеньев сети как жесткие. В этом случае теряется определенная часть точности сети и, главное, имеет место некоторая неоднозначность результатов при оценке качества измерений по невязкам в отдельных звеньях сети. Поэтому объясним интерес в научных публикациях к методам совместного уравнивания наземных и спутниковых геодезических измерений [3, 4].

Чаще всего предлагается выполнять уравнивание таких сетей в пространственной геоцентрической системе координат, в которой выполняются спутниковые определения координат и в которую необходимо редуцировать наземные измерения и координаты наземных опорных точек. Теоретически это несомненно правильно, но в современных условиях геодезической практики в Украине строго выполнить вычисления не всегда возможно. Прежде всего необходимо, чтобы исходные наземные пункты имели координаты привязанные к некоторому референц-эллипсоиду и должны быть известны точные параметры перехода к референц-эллипсоиду, относительно которого определены координаты спутниковых наблюдений. Обеспечение этих требований в условиях построения инженерных локальных сетей трудно выполнимо: имеются некоторые ограничения в доступе к полным координатам, кроме того, используемые системы координат СК-42 и СК-63 не имеют точных параметров перехода в систему WGS-84, в которой выполняются спутниковые определения координат системой GPS.

Таким образом имеется актуальная для практики и теории задача обоснования универсального алгоритма вычисления и уравнивания сложных и разнообразных локальных сетей, содержащих как наземные геодезические, так и спутниковые навигационные измерения. Целью настоящей статьи является представление одного из вариантов решения данной задачи.

Рассмотрим обоснование универсального алгоритма вычисления и уравнивания локальной геодезической сети любой сложности. В предлагаемом алгоритме нет необходимости делить сеть на высотную и плановую, ход вычислений определяется имеющимися данными измерений, данные определяют какой из модулей будет задействован в процессе вычислений. При измерении электронным тахеометром результаты естественным образом структурируются так, что минимальной порцией данных являются совокупность результатов измерений на станции. Структуру данных любой сети можно упрощенно описать следующей простой грамматикой:

1. <сеть> ::= <параметры> <исходные данные> { <станция> }₁ⁿ;
2. <станция> ::= <имя точки стояния> { <имя точки визирования> [<направление>]
[<длина>] [<превышение> <вес превышения>] }₁^k;

Смысл использованных в формуле (1) метабольных состоит в следующем: <параметры> – параметры точности полевых измерений; <исходные данные> – координаты исходных пунктов, азимутов и базисов; <станция> – совокупность произвольного числа сторон, для каждой из которых могут указываться измеренные направление, длина и превышение. Если какая либо из величин не измерялась, то задается неопределенное значение типа **null**. Такой совокупности данных достаточно, чтобы программно определить топологию сети и ее вид.

Обработка измерений геодезической сети включает два этапа: вычисление и уравнивание. Вычисление геодезической сети есть задача вычисления координат определяемых пунктов. Поскольку измерения содержат погрешности, то вычисленные на этом этапе координаты следует рассматривать как приближенные.

Любую геодезическую сеть можно представить как совокупность следующих элементарных фигур: треугольники, лучи полярного определения точек, прямые и обратные засечки. Последовательно выделяя элементарные фигуры и вычисляя на каждом этапе координаты их вершин, можно вычислить приближенные координаты всех определяемых точек и таким образом обеспечить переход к строгому уравниванию всей сети.

Для первых двух типов элементарных фигур можно составить уравнения линейные относительно неизвестных координат определяемых точек. Так для треугольника с измеренными или вычисленными углами имеет место известные формулы Юнга прямой угловой засечки [6]:

$$\left. \begin{aligned} x_{i_3} &= \frac{x_{i_1} \operatorname{ctg} \beta_2 + x_{i_2} \operatorname{ctg} \beta_1 - y_{i_1} + y_{i_2}}{\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2}; \\ y_{i_3} &= \frac{y_{i_1} \operatorname{ctg} \beta_2 + y_{i_2} \operatorname{ctg} \beta_1 + x_{i_1} - x_{i_2}}{\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $x_{i_1}, y_{i_1}, \dots, x_{i_3}, y_{i_3}$ – координаты вершин i_1, i_2, i_3 треугольника при его обходе по часовой стрелке; β_1, β_2 – внутренние углы треугольника, соответственно на точках i_1, i_2 . Из уравнений (2) можно записать два параметрических уравнения треугольника следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} \beta_1 \cdot x_{i_1} - y_{i_1} + \operatorname{ctg} \beta_2 \cdot x_{i_2} + y_{i_2} - (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2) x_{i_3} &= v_j^x; \\ x_{i_1} + \operatorname{ctg} \beta_1 \cdot y_{i_1} - x_{i_2} + \operatorname{ctg} \beta_2 \cdot y_{i_2} - (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2) y_{i_3} &= v_j^y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где v_j^x, v_j^y – невязки из-за погрешностей измерений; j – номер треугольника.

Если на станции измерены по сторонам направления и длины, то для каждого луча имеют место следующие два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} x_{k_1} + d_g \cos u_g \cdot a_{k_1} - d_g \sin u_g \cdot b_{k_1} - x_{k_2} &= v_g^x; \\ y_{k_1} + d_g \sin u_g \cdot a_{k_1} + d_g \cos u_g \cdot b_{k_1} - y_{k_2} &= v_g^y, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где x_{k_1}, y_{k_1} и x_{k_2}, y_{k_2} – координаты, соответственно, k_1 начальной точки (станции) и k_2 конечной точки стороны сети; a_{k_1}, b_{k_1} – параметры ориентирования направлений станции k_1 ; d_g, u_g –

горизонтальное проложение длины и измеренное направление стороны g ; V_g^x, V_g^y – невязки из-за погрешностей измерений.

Объединяя уравнения типа (3) и (4) в единую систему, получим систему линейных параметрических уравнений относительно определяемых координат точек и параметров ориентирования станций:

$$\mathbf{AX} + \mathbf{L} = \mathbf{V}, \quad (5)$$

где \mathbf{A} – матрица коэффициентов при неизвестных; \mathbf{X} – вектор неизвестных координат и параметров ориентирования станций; \mathbf{V} – вектор невязок уравнений типа (3) и (4); \mathbf{L} – вектор свободных членов, величины компонент которого определяются подстановкой в уравнения (3) и (4) известных координат точек, а для неизвестных координат принимаются нулевые значения, начальные значения параметров ориентирования принимаются такими $a_{k_1} = 1$, а $b_{k_1} = 0$.

Решая уравнения (5) методом наименьших квадратов при условии

$$[\mathbf{V}^T \mathbf{V}] = \min, \quad (6)$$

получим систему нормальных уравнений

$$\mathbf{A}^T \mathbf{AX} + \mathbf{A}^T \mathbf{L} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Прямое решение системы (7) может оказаться невозможным, так как матрица коэффициентов может быть сингулярной, поэтому эффективно применить итерационный способ решения методом сопряженных градиентов [7].

Решение системы (7) находится в результате применения следующей последовательности рекуррентных формул:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_0 &= -\mathbf{A}^m \mathbf{L}; \\ \mathbf{s}_1 &= \mathbf{r}_0; \\ \mathbf{r}_i &= \mathbf{r}_{i-1} - a_i \mathbf{A}^m \mathbf{A} \mathbf{s}_i; \\ a_i &= \frac{(\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_{i-1})}{(\mathbf{s}_i, \mathbf{A}^m \mathbf{A} \mathbf{s}_i)} = \frac{(\mathbf{s}_i, \mathbf{r}_{i-1})}{(\mathbf{s}_i, \mathbf{A}^m \mathbf{A} \mathbf{s}_i)}; \\ \mathbf{s}_{i+1} &= \mathbf{r}_i + b_i \mathbf{s}_i; \\ b_i &= \frac{(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i)}{(\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_{i-1})} = -\frac{(\mathbf{r}_i, \mathbf{A}^m \mathbf{A} \mathbf{s}_i)}{(\mathbf{s}_i, \mathbf{A}^m \mathbf{A} \mathbf{s}_i)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а \mathbf{X} – вектор неизвестных уточняется на каждом шаге итерации по формуле

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^m a_i \mathbf{s}_i. \quad (9)$$

Теоретически точное значение вектора \mathbf{X} должно получиться после числа итераций равно t числу неизвестных, однако на практике процесс итераций прерывается раньше, после того, как $|\mathbf{r}_i|$ модуль вектора станет меньше заданного допуска на точность вычислений.

Использование разреженной структуры матрицы \mathbf{A} и метода сопряженных градиентов дает по сравнению с прямыми методом решения системы нормальных уравнений (7) следующие преимущества:

- нет необходимости вычисления и хранения в памяти ЭВМ объемной матрицы нормальных уравнений;
- вычислительные операции выполняются только с величинами отличными от нуля, что дает значительную экономию процессорного времени ЭВМ;
- метод градиентов обеспечивает устойчивость вычислительного процесса даже в том случае, когда система (7) сингулярная.

Если для некоторой части сети не окажется исходных пунктов, то она при использовании метода градиентов будет вычислена как свободная сеть, вектор координат которой будет иметь минимальный модуль.

По найденным координатам вычисляются длины тех сторон, которые не были измерены. Таким образом сеть становится более определенной и можно программно проверить, координаты каких пунктов могут быть вычислены методом засечек. Найденные координаты также используются для дополнения измеренных длин и углов.

Выполняя несколько циклов составления и решения уравнений (7), находят координаты всех определяемых пунктов сети, либо сообщается, что для вычисления координат некоторого пункта недостаточно данных. Данный алгоритм позволяет найти приближенные координаты точек, так как измерения содержат погрешности, а система (5) решается с нарушением строгости уравнивания. Если сеть состоит из нескольких фрагментов, то таким образом будет вычислен каждый фрагмент независимо друг от друга.

Для включения в совместное уравнивание с наземными измерениями спутниковых определений в сети эффективно использовать метод, который успешно применяется при уравнивании сетей аналитической фототриангуляции с использованием навигационных измерений координат центров фотографирования [8, 9].

Результатом спутниковых определений являются точные проекции векторов в геоцентрической системе координат между базовой станцией и текущими пунктами установки приемников, а также приближенные геодезические координаты конечных точек векторов. Проекции векторов можно рассматривать как независимо измеренные величины, подлежащие уравниванию. Непосредственное точное перевычисление проекций векторов из геоцентрической системы координат в систему координат наземных пунктов практически невозможен по следующим причинам:

- системы координат используют разные референц-эллипсоиды, взаимное положение между которыми в теле Земли известно с недостаточной точностью;
- система координат наземных пунктов может быть локальной и не связанной с референц-эллипсоидом;
- конечные точки векторов имеют весьма приближенные координаты, так что переход к геодезическим координатам на эллипсоиде будет сопровождаться заметными систематическими ошибками проекций векторов.

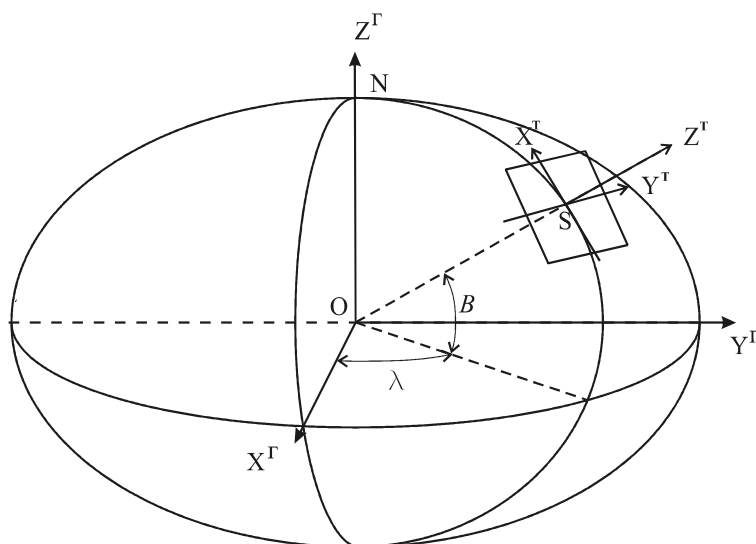


Рис. 1. Геоцентрическая и топоцентрическая системы координат

Для локальных геодезических сетей, имеющих размеры в диаметре до 50 км, эффективно использовать следующее двух этапное решение. На первом этапе по геодезическим координатам концов векторов выбирается S – средняя точка сети на эллипсоиде, в которой устанавливается

топоцентрическая система координат $SX^T Y^T Z^T$: ось Z^T направлена по нормали к эллипсоиду в выбранной средней точке S ; оси X^T и Y^T ортогональны и расположены в плоскости касательной к эллипсоиду (рис. 1). Если ось X^T расположить в плоскости меридиана, проходящего через точку S , то проекции векторов из $OX^G Y^G Z^G$ – геоцентрической системы в $SX^T Y^T Z^T$ топоцентрическую систему переычисляются по следующим формулам

$$\begin{pmatrix} \Delta X^T \\ \Delta Y^T \\ \Delta Z^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin B \cos \lambda & -\sin B \sin \lambda & \cos B \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos B \cos \lambda & \cos B \sin \lambda & \sin B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta X^G \\ \Delta Y^G \\ \Delta Z^G \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где λ, B – соответственно, долгота и широта точки S ; $\Delta X^G, \Delta Y^G, \Delta Z^G$ и $\Delta X^T, \Delta Y^T, \Delta Z^T$ – проекции вектора, соответственно, в геоцентрической и топоцентрической системах координат.

Проекции векторов на плоскость плановых координат топоцентрической системы координат с достаточной точностью могут быть пересчитаны в проекции на плоскость плановых координат местной системы с помощью ортогонального преобразования, поскольку плоскости плановых координат топоцентрической и местной систем как правило образуют малый двугранный угол. Поэтому для каждого вектора из спутниковых наблюдений имеют место следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} x_{k_1} + \Delta X_t^T \cdot \omega_1 - \Delta Y_t^T \cdot \omega_2 - x_{k_2} &= v_t^x; \\ y_{k_1} + \Delta Y_t^T \cdot \omega_1 + \Delta X_t^T \cdot \omega_2 - y_{k_2} &= v_t^y, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где ω_1, ω_2 – параметры ортогонального преобразования векторов спутниковых наблюдений; $\Delta X_t^T, \Delta Y_t^T$ – проекции вектора между пунктами k_1 и k_2 ; v_t^x, v_t^y – невязки из-за погрешностей измерений в параметрическом уравнении t -го вектора.

Уравнения вида (11), составленные для всех измеренных векторов, образуют следующую систему параметрических уравнений

$$\mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{D}\delta\Omega + \mathbf{L}_\omega = \mathbf{V}_\omega, \quad (12)$$

где \mathbf{B} – матрица коэффициентов при неизвестных координатах точек сети; \mathbf{X} – вектор неизвестных координат и параметров ориентирования станций; $\delta\Omega$ – вектор поправок в параметры ортогонального преобразования проекций векторов; \mathbf{D} – матрица коэффициентов при неизвестных поправках вектора $\delta\Omega$; \mathbf{L}_ω – вектор свободных членов, вычисляемый по координатам опорных точек и приближенным значениям параметров: $\omega_1 = 1$ и $\omega_2 = 0$; \mathbf{V}_ω – вектор невязок уравнений (11).

Уравнения (5) и (12) решаются совместно методом наименьших квадратов при условии

$$\left[\mathbf{V}^T \mathbf{V} \right] + \left[\mathbf{V}_\omega^T \mathbf{V}_\omega \right] = \min. \quad (13)$$

Нормальные уравнения в этом случае будут иметь вид

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{B} & \mathbf{B}^T \mathbf{D} \\ \mathbf{D}^T \mathbf{B} & \mathbf{D}^T \mathbf{D} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \delta\Omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{L} + \mathbf{B}^T \mathbf{L}_\omega \\ \mathbf{D}^T \mathbf{L}_\omega \end{pmatrix} = 0. \quad (14)$$

Исключая в системе вектор \mathbf{X} , получим для неизвестных $\delta\Omega$ следующее уравнение:

$$\left[\mathbf{D}^T \mathbf{D} - \mathbf{D}^T \mathbf{B} (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \right] \delta\Omega + \mathbf{D}^T \mathbf{L}_\omega - \mathbf{D}^T \mathbf{B} (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{L} + \mathbf{B}^T \mathbf{L}_\omega) = 0. \quad (15)$$

Разрешимость уравнения (15) легко проверяется, поскольку оно всего второго порядка. Если уравнение (15) не имеет решения, то для определения приближенных координат пунктов сети допустимо использовать измеренные проекции векторов.

Рассмотренный алгоритм обеспечивает вычисление приближенных координат пунктов локальной геодезической сети без ввода в исходных данных дополнительных сведений о топологии сети и позволяет программно перейти к строгому уравниванию всех измерений. Алгоритмически более простым является параметрический метод уравнивания, поэтому рассмотрим его применение в данных условиях.

Параметрические уравнения делятся на две группы. В первую группу относятся параметрические уравнения наземных геодезических измерений, а именно: направлений, длин, базисов, азимутов(дирекционных углов). Формулы этих уравнений в линейном виде хорошо известны [6], поэтому запишем их в обобщенном матричном виде

$$\mathbf{A}_G \delta \mathbf{X}_G + \mathbf{L}_G = \mathbf{V}_G, \quad (16)$$

где \mathbf{A}_G – матрица коэффициентов параметрических уравнений наземных геодезических измерений; $\delta \mathbf{X}_G$ – вектор поправок в приближенные координаты пунктов и ориентирные углы; \mathbf{L}_G – вектор свободных членов; \mathbf{V}_G – вектор поправок в измеренные величины.

Во вторую группу относятся уравнения вида (11)

$$\mathbf{B} \delta \mathbf{X}_G + \mathbf{D} \delta \Omega + \mathbf{L}_\omega = \mathbf{V}_\omega. \quad (17)$$

Уравнения (16) и (17) решаются методом наименьших квадратов при выполнении условия

$$\left[\mathbf{V}_G^T \mathbf{P}_G \mathbf{V}_G \right] + \left[\mathbf{V}_\omega^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{V}_\omega \right] = \min, \quad (18)$$

где \mathbf{P}_G и \mathbf{P}_ω – матрицы весов, соответственно, наземных геодезических и спутниковых измерений.

Нормальные уравнения для решения уравнений (16) и (17) будут иметь вид

$$\begin{vmatrix} \mathbf{A}_G^T \mathbf{P}_G \mathbf{A}_G + \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{B} & \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{D} \\ \mathbf{D}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{B} & \mathbf{D}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{D} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta \mathbf{X}_G \\ \delta \Omega \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{A}_G^T \mathbf{P}_G \mathbf{L}_G + \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{L}_\omega \\ \mathbf{D}^T \mathbf{P}_\omega \mathbf{L}_\omega \end{vmatrix} = 0. \quad (19)$$

Система нормальных уравнений (19) решается по формулам аналогичным (15), причем эффективно использование метода сопряженных градиентов, формулы (8) и (9), поскольку матрицы коэффициентов параметрических уравнений сильно разрежены, так как в каждой строке независимо от размера сети отличны от нуля не более пяти коэффициентов. Кроме того, метод сопряженных градиентов обеспечивает устойчивость вычислительного процесса, при котором даже при неблагоприятной форме сети или же грубых ошибках в данных получается результат, позволяющий определить и устранить причину неудовлетворительного решения. Уравнивание сети выполняется итерационным методом до тех пор, пока норма вектора поправок $\delta \mathbf{X}_G$ не станет меньше установленного допуска.

На рис. 2 приведена схема модели локальной плановой геодезической сети, вычисленной и уравненной с помощью описанного алгоритма. Сеть состоит из двух локальных фрагментов наземных измерений, один из которых имеет два опорных пункта, а другой один опорный пункт.

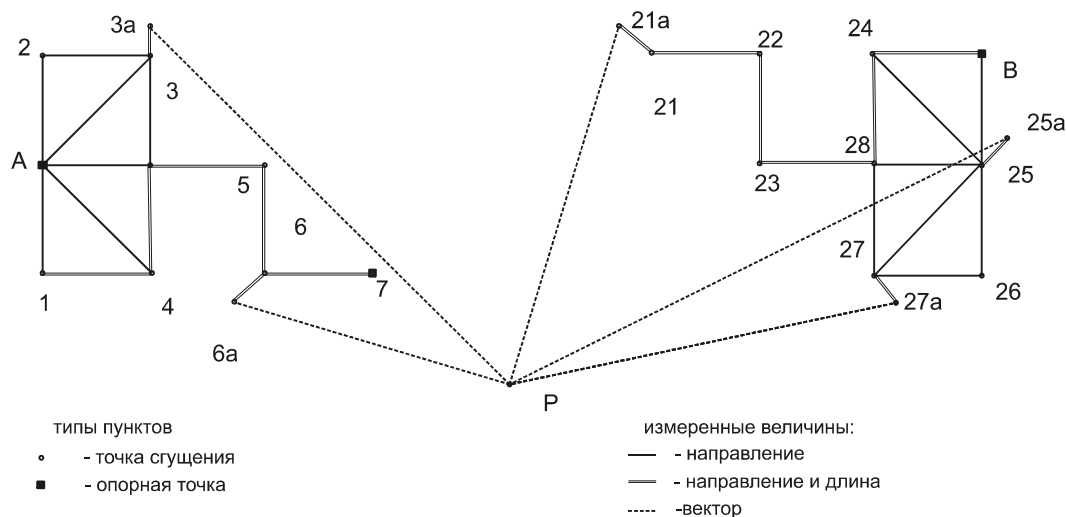


Рис. 2. Схема модели комбинированной геодезической сети

Представленную модель сети (рис. 2) можно рассматривать, как сеть сгущения в условиях городской застроенной территории, когда установка спутникового приемника невозможна непосредственно на пунктах сети, поэтому векторы измерялись между вспомогательными точками, положение которых определялось полярным методом. Наземные геодезические измерения объединены

в єдину сеть с помощью пространственных векторов спутниковых измерений. Даже такой небольшой пример наглядно демонстрирует гибкость и универсальность предлагаемого алгоритма.

Реализация изложенных теоретических предложений выполнена авторами в программном комплексе “МГСети” (Программный комплекс построения и уравнивания плановых и высотных Маркшейдерских-Геодезических Сетей) (рис. 3). Универсальность комплекса состоит в том, что сети любой конструкции не разделяются на плановые, высотные, либо триангуляцию или полигонометрию, а вычисляются по единому алгоритму.

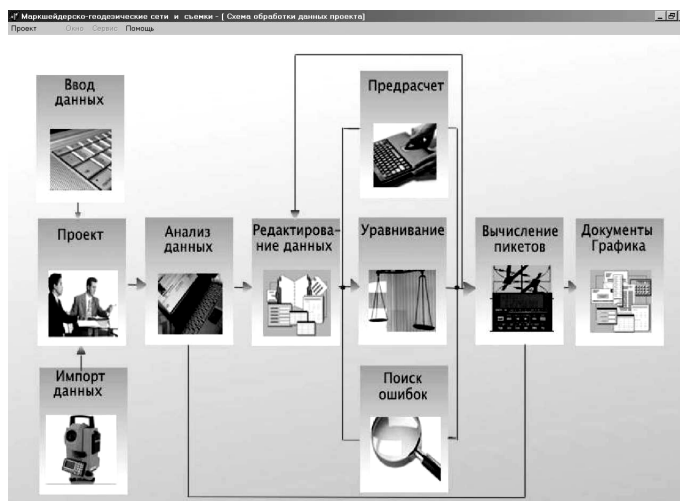


Рис. 3. Главное окно программного комплекса “МГСети”

Каждая сеть обрабатывается как отдельный проект, для которого открывается главное окно проекта (рис. 4). Программа имеет много возможностей эффективного вычисления сетей, которые детально описаны в документации к ней [10], здесь дадим сокращенное описание принципов функционирования комплекса.

Главное окно проекта разделено на три основные части:

- закладки с данными;
- поле графического отображения сети;
- кнопки операций и процессов.

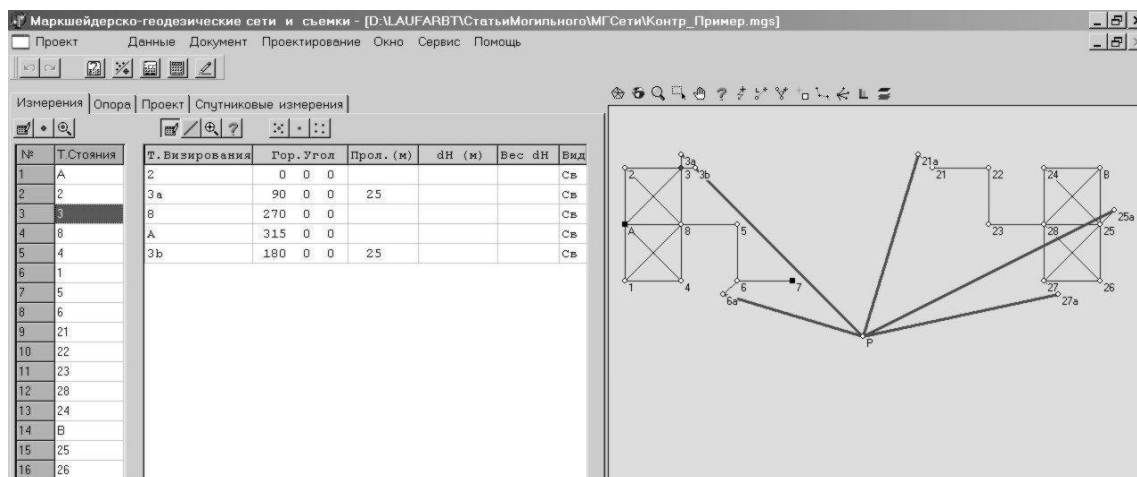


Рис. 4. Главное окно проекта

На первой закладке (“Измерения”) помещаются результаты полевых измерений в сети (рис. 4). В левой половине закладки помещены “точки стояния”, это имя начальной точки стороны сети, а в правой половине приведены имена конечных точек (“точки визирования”) сторон, которые

исходят из “точки стояния”. Против каждой “точки визирования” помещены результаты измерений по стороне: угловое направление, то есть отсчет по лимбу при визировании на точку, горизонтальное проложение линии, превышение и его вес. Если какое-либо измерение не выполнялось, то соответствующая клетка остается пустой. Допустимы и другие комбинации измерений по стороне сети. Таким образом информация разделяется на независимые части, каждая из которых содержит результаты измерений на отдельной точке стояния или станции.

Принятая концепция структурирования данных не требует от исполнителя общего представления о геометрической схеме сети, разделению ее на хода, засечки или треугольники, что значительно упрощает подготовку данных и позволяет избежать грубых ошибок. В этом состоит один из признаков универсальности комплекса “МГСети”.

Закладка “Опора” (рис. 5) содержит исходные опорные данные сети, то есть координаты исходных пунктов, азимутов и базисов. В ячейках “Признак” определяется, какие из координат следует использовать как безошибочные, т.е. “жесткие”.

Каталог опорных точек

Имя точк	X, (м)	Y, (м)	Z, (м)	Признак
Г	200	400	100	3
В	400	950	100	3
А	300	100	100	3

Рис. 5. Закладка с исходными координатами сети

Закладка “Проект” (рис. 6) содержит общую информацию по проекту: название проекта, фамилию главного исполнителя, тип прибора и точностные параметры технологии измерений. Эти данные используются при уравнивании измерений и анализе качества работ в сети.

Объект: Дата съемки:

Исполнитель: Инструмент:

$m_{\alpha} = 5$ С.К.О. измерения горизонтального угла (°)

$m_{\beta} = 5$ С.К.О. измерения вертикального угла (°)

$m_d = 10$ С.К.О. измерения длины (мм) + ppm (мм/км)

$m_i = 4$ С.К.О. измерения высоты инструмента (мм)

$m_v = 5$ С.К.О. измерения высоты визирования (мм)

$\mu_{\beta} = 6.8$ ошибка единицы веса превышения

Файл проекта:


Рис. 6. Общие данные о параметрах технологии исполнения проекта

Закладка “Спутниковые измерения” (рис. 7) содержит результаты измерений векторов между точками сети в виде их проекций в топоцентрической системе координат. Данные вносятся автоматически на основе программной расшифровки файла результатов предварительной обработки спутни-

кових наблюдений. Читается файл, который формируется программным обеспечением конкретного типа спутниковых приемников. Для каждого приращения указывается средняя квадратическая ошибка, которая учитывается при вычислении весов приращений в матрице P_{ω} в формуле (18).

Нач. точка	Кон. точка	dX (м)	dY (м)	dZ (м)
P	6a	75	-250	10
P	3a	325	-325	10
P	21a	325	100	10
P	25a	225	450	10
P	27a	75	350	10

Рис. 7. Закладка с данными спутниковых измерений

Если нажать на одну из функциональных кнопок, например, на , то будет выполнено вычисление и уравнивание сети, а в поле графического отображения появится схема сети (рис. 4). Результаты помещаются в главное окно (рис. 8), где показана только одна из семи закладок.

№ п/п	Имя точки	Координаты точки			Сред. квадрат. ошибки			Примечание
		X	Y	Z	Mx	My	Mz	
1	7	200.0000	400.0000	100.0000				план./высот.
2	В	400.0000	950.0000	100.0000				план./высот.
3	А	300.0000	100.0000	100.0000				план./высот.
4	2	400.0001	100.0000					
5	3	400.0001	200.0001					
6	8	300.0000	200.0001					
7	4	199.9999	200.0001					
8	1	199.9999	100.0000					
9	5	300.0000	300.0000					
10	6	200.0000	300.0000					
11	21	400.0002	649.9999					
12	22	400.0002	750.0000					
13	23	300.0001	750.0000					
14	28	300.0001	850.0001					
15	24	400.0000	850.0001					
16	25	300.0001	950.0000					

Рис. 8. Главное окно результатов вычисления сети

При обработке геодезической сети автоматически учитываются все измерения и вычисляются как плановые координаты точек, так и их высоты, если на станциях введены превышения. В этом заключается еще один признак универсальности комплекса “МГСети”.

Выходные таблицы содержат полную и всестороннюю информацию о уравненной сети, в том числе и все условные уравнения с анализом допустимости фактических невязок. Графические документы результатов вычисления сети выводятся в файл в стандартном формате *.dxf и могут использоваться в программных комплексах САПР.

Высотная комбинированная сеть уравнивается в комплексе “МГСети” также с использованием перевычисления спутниковых измерений в топоцентрическую систему координат, однако для изложения соответствующего алгоритма необходима отдельная публикация.

Литература

1. Виноградов А.В., Войтенко А.В., Куприянов М.С. Совместное применение спутниковых приемников и электронных тахеометров при создании планового обоснования на застроенных территориях // Геодезия и картография. –2007. – № 7. – С.33–35.

2. Войтенко А.В., Куприянов М.С., Виноградов А.В. О точности передачи координат пунктов ГГС на вспомогательные пункты с помощью спутниковых приемников // Геодезия и картография.– 2005. – № 5. – С.11–14.
3. Бойко Е.Г., Зимин В.М., Годжаманов М.Г. Методы совместной обработки локальных наземных и спутниковых геодезических сетей // Геодезия и картография. – 2000. – № 11. – С.11–18.
4. Бойко Е.Г., Ванин С.А. Особенности уравнивания сетей, построенных относительно методом спутниковой геодезии // Геодезия и картография. – 2001. – № 9. – С.9–14.
5. Исследование точности Государственной геодезической сети на территории Московской области с использованием Спутниковой системы (проект “Москва”). Логинов С.А., Бойков В.В., Rogozin В.П., Монахова М.А. // Геодезия и картография. – 2007. – № 3. – С.23–28.
5. Вшивкова О.В., Калугин И.В. О некоторых объективных точностных ограничениях спутниковых измерений // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С.27–31.
6. Высшая геодезия. Зданович В.Г., Белоликов А.Н., Гусев Н.А., Звонарев К.А. – М.: Недра, 1970. – 512 с.
7. Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. – М.: Физматгиз, 1963. – 734 с.
8. Grenzdoerffer G. Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems fuer Precision Forming(PFIFF). DGK, Muenchen, 2002. Reihe C, Heft Nr. 552. – 141 s.
9. Могильний С.Г. Навігаційні виміри у вирівнюванні аналітичної фототріангуляції // Вісник геодезії та картографії. – 2004. – № 1. – С.27–33.
10. Программный комплекс построения и уравнивания плановых и высотных Маркшейдерских и Геодезических Сетей (“МГСети”). – <http://gis.dgtu.donetsk.ua/newsiteversion/ru/mgseti.html>.

Сумісна обробка супутникових та наземних геодезичних вимірів в локальних мережах

С. Могильный, А. Шоломицкий

Пропонується універсальний алгоритм обчислення й зрівнювання комбінованих геодезичних мереж згущення, не вимагає введення інформації про топологію мережі. Супутникові навігаційні виміри редукуються в близьку до місця розташування мережі топоцентричну систему координат, яка при зрівнюванні зв'язується із системою координат опорних пунктів. Рішення параметричних рівнянь поправок методом сполучених градієнтів забезпечує стійкість обчислень і скорочує термін розв'язання задачі. Алгоритм випробувано у програмному комплексі "МГСети".

Совместная обработка наземных и спутниковых геодезических измерений в локальных сетях

С. Могильный, А. Шоломицкий

Предлагается универсальный алгоритм вычисления и уравнивания комбинированных геодезических сетей сгущения, не требует ввода информации о топологии сети. Спутниковые навигационные измерения редуцируются в близкую к месту расположения сети топоцентрическую систему координат, которая при уравнивании связывается с системой координат опорных пунктов. Решение параметрических уравнений поправок методом сопряженных градиентов обеспечивает устойчивость вычислений и сокращает время решения задачи. Алгоритм испытан в программном комплексе “МГСети”.

Joint processing of land and satellite geodetic measurements in local networks

S. Mogilnyj, A. Sholomitskij

The universal algorithm of calculation and equalising of the combined geodetic networks of a condensation is offered, does not demand input of the information on network topology. Satellite navigating measurements are reduced in close to the network location topocentrik system of co-ordinates which at equalising contacts system of co-ordinates of strong points. The decision of the parametrical equations of amendments provides with a method of the interfaced gradients stability of calculations and reduces time of the decision of a problem. The algorithm is tested in a program complex “MGSnetworks”.