



Мусбах Асаад Али

**Разработка технологии дифференциальных
фазовых GPS – измерений применительно
к территории Сирии**

Специальность 25.00.32. – Геодезия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2011

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии
и картографии (МИИГАиК) на кафедре высшей геодезии

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Анатолий Николаевич Голубев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Станислав Николаевич Яшкин

кандидат технических наук, профессор
Владимир Кондратьевич Писаренко

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский
институт геодезии, аэросъемки и картографии
(ЦНИИГАиК)

Защита состоится 2 июня 2011г. в 12 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и
картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок,
дом 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государ-
ственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан 29 апреля 2011г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Ю.М.Климков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существующая на территории Сирии геодезическая сеть, созданная в результате работ, проведенных в разные годы французскими, советскими и сирийскими специалистами, не отвечает современным требованиям, поскольку при ее построении были допущены существенные ошибки, приведшие к ее деформации. Поэтому возникает необходимость обновления сети, которое должно выполняться с применением современных методов спутникового позиционирования. Это весьма масштабная и актуальная задача, при решении которой следует не только использовать известные методы, открываемые применением глобальных спутниковых систем, но и исследовать новые возможности усовершенствования этих методов.

Цель работы. Выполнение теоретических и экспериментальных исследований для разработки новой технологии получения дифференциальных поправок при фазовых GPS-измерениях, обеспечивающей повышение точности определения вектора базы (GPS-дальнометрии) для построения векторных геодезических сетей в Сирийской Арабской Республике и работ метрологического назначения. Целью диссертационной работы было также исследование особенностей спутниковых наблюдений на территории Сирии.

Научная новизна. Впервые предложен метод определения дифференциальных поправок, которые могут вводиться непосредственно в конечный результат фазовых измерений – разности одноименных координат двух пунктов, на которых установлены спутниковые приемники. Новизной отличаются также исследования геометрического фактора на территории Сирии, в результате которых выработаны рекомендации по обеспечению оптимальной геометрии наблюдений.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Анализ и систематизация сведений о современном состоянии государственной геодезической сети Сирии.
2. Метод дифференциальных фазовых GPS-измерений с введением разностно-координатных поправок.
3. Аналитические выражения для разностно-координатных поправок при фазовых измерениях.
4. Результаты экспериментальной проверки метода на геодезических сетях.
5. Особенности геометрического фактора при спутниковых наблюдениях в Сирии.
6. Исследование связи существующей национальной системы координат Сирии с результатами спутниковых измерений.

Практическая ценность работы. Повышение точности определения координат и вектора базы для построения векторных геодезических сетей на территории Сирии.

Апробация работы. По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликованы четыре статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, а также тезисы доклада на научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК (Москва, апрель 2011).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с подразделами, заключения, списка литературы из 38 наименований и приложения. Работа изложена на 96 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 25 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, указываются цель и задачи, раскрываются научная новизна работы, практическая значимость полученных результатов.

В первой главе – «Современное состояние геодезической сети на

территории Сирии» – рассмотрены этапы построения сети, требования к геодезическим сетям и особенности их создания в Сирийской Арабской Республике, (рис. 1).

Приводятся сведения о геодезических работах, проведенных французскими геодезистами и затем советскими специалистами на территории Сирии. Отмечено, что в результате выполненных измерений Сирийская государственная сеть оказалась состоящей из нескольких частей, построенных независимо друг от друга и в разное время, что ставит актуальную задачу связать эти сети и на их основе построить единую государственную геодезическую сеть для всей страны. Перечислены условия, которым должна удовлетворять государственная сеть Сирии, и даны некоторые рекомендации по ее созданию с применением современных спутниковых технологий.

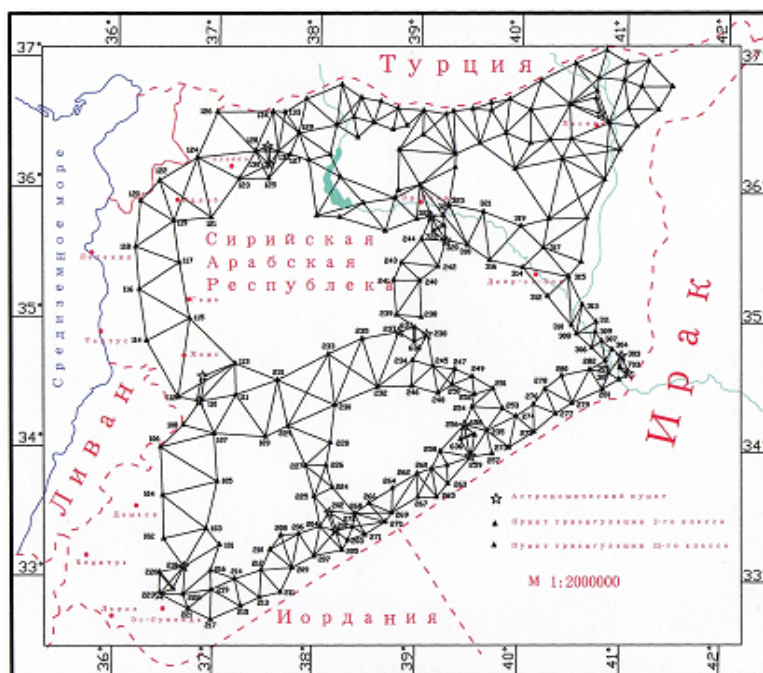


Рис.1. Геодезическая сеть в Сирийской Арабской Республике

Кроме того, содержатся общие сведения о наиболее распространенных проекциях, применяющихся для математической обработки результатов геодезических измерений в настоящее время в Сирийской Арабской Республике:

- Универсальная поперечно-цилиндрическая проекция Меркатора (*UTM*) как общегосударственная для целей обороны, где в качестве поверх-

ности относимости используется эллипсоид вращения с параметрами Хейфорда 1924 г.;

- Коническая проекция Ламберта с параметрами эллипсоида вращения Кларка 1880 г. для создания общегосударственных топографических карт гражданского назначения;
- Стереографическая проекция Руссиля на секущей плоскости с параметрами эллипсоида Кларка 1880 г. для целей кадастра и для геодезических работ местного значения в Сирийской Арабской Республике.

Во второй главе – «Режимы работы глобальных спутниковых систем» – даны основные характеристики существующих в настоящее время космических навигационных систем, включая краткое описание абсолютных и относительных определений, кодовых и фазовых измерений, дифференциального метода при кодовых измерениях. Приводятся сведения о точности определения положения пунктов спутниковыми методами и использовании спутниковых систем при геодезических работах.

В третьей главе – «Получение дифференциальных поправок из фазовых измерений» – излагается предлагаемый в работе метод определения разностно-координатных поправок, выводятся аналитические выражения для этих поправок, описывается экспериментальная проверка метода на геодезических сетях и приводятся соображения об уточненной GPS-дальнометрии.

Основная идея предлагаемого в работе метода заключается во введении дифференциальных поправок непосредственно в разности координат, получаемые из фазовых измерений. В какой-то степени это распространение на фазовые измерения способа, используемого при кодовых измерениях.

Как известно, при дифференциальном методе кодовых измерений на референцной станции, установленной в точке с известными координатами, вычисляются по координатам станции и спутника «эталонные» расстояния и сравниваются с измеренными псевдодальностями, в результате чего получают дифференциальные поправки, передаваемые на роверный приемник. На референцной станции могут также вычисляться не расстояния, а разности

между известными координатами этой станции и координатами, определенными по измерениям в автономном режиме, и этими разностями исправляются координаты роверного приемника. Такой дифференциальный метод, как уже было сказано, применяется при кодовых измерениях.

Если использовать фазовые измерения, то открывается новая возможность получения дифференциальных поправок. Опуская некоторые детали, суть метода, с принципиальной точки зрения, можно пояснить следующим образом.

Два приемника А и В устанавливаются в пунктах с известными координатами. По этим координатам вычисляются три «эталонных» разности одноименных координат пунктов: $(X_A - X_B)$, $(Y_A - Y_B)$, $(Z_A - Z_B)$. В результате фазовых измерений получают три те же разности, которые будут отличаться от вычисленных. Расхождения между вычисленными (эталонными) и измеренными разностями будут представлять собой поправки, которые вводятся в измеренные разности *на других трассах*, когда приемники устанавливаются в точках *с неизвестными координатами*. Поскольку по разностям координат можно вычислить длину трассы:

$$D = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (1)$$

то введение поправок в измеренные разности координат на других трассах позволяет получить исправленные значения их длин (а если на этих трассах один из приемников находится в точке с известными координатами, то можно, как обычно, получить и исправленные значения координат второго приемника).

Отличие метода от существующих состоит в том, что в начале работ оба приемника устанавливаются в пунктах с известными координатами (точнее, на концах известного базового вектора), в то время как при фазовых измерениях во всех кинематических режимах, в том числе и RTK, на твердом пункте устанавливается только один из двух приемников (базовая станция). В режиме статики иногда устанавливаются и оба приемника в твердых пунктах, но это осуществляется только для инициализации (разрешения неодно-

значности) и при этом не определяются дифференциальные поправки. Другое отличие метода заключается в том, что поправки вводятся сразу в конечный продукт фазовых измерений – в разности координат, в то время как в известном способе получения дифференциальных поправок при фазовых измерениях они вводятся в фазовые дальности, содержащие числа неоднозначности, В настоящей работе подробно исследован предлагаемый метод и выполнена его экспериментальная проверка на геодезических сетях.

Преимуществом предлагаемого метода является возможность создания уточненной GPS-дальнометрии, которая может использоваться для построения пространственной векторной геодезической сети и в работах метрологического назначения.

Как известно, вторая фазовая разность, выраженная в линейной мере (вторая разность фазовых псевдодальностей P^{li} , где индексы 1 и i обозначают номера двух спутников) связана с координатами двух спутников (X_1, Y_1, Z_1) , (X_i, Y_i, Z_i) и приемников (X_A, Y_A, Z_A) , (X_B, Y_B, Z_B) соотношением:

$$P^{li} = \sqrt{(X_1 - X_A)^2 + (Y_1 - Y_A)^2 + (Z_1 - Z_A)^2} - \sqrt{(X_1 - X_B)^2 + (Y_1 - Y_B)^2 + (Z_1 - Z_B)^2} - \sqrt{(X_i - X_A)^2 + (Y_i - Y_A)^2 + (Z_i - Z_A)^2} + \sqrt{(X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2} + \delta\Delta_a^{li}, \quad (2)$$

где $\delta\Delta_a^{li}$ - двойная разность атмосферных задержек, отражающая остаточное влияние атмосферы на трассах распространения сигналов от спутников 1 и i к пунктам A и B .

Вторые разности P^{li} содержат в себе вторые разности геометрических расстояний от приемников A и B до спутников 1 и i вида $(\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^i - \rho_B^i)$. Любая разность $\rho_A^j - \rho_B^j$, где j равно 1 или i , зависит от составляющих базисного вектора $D = AB$:

$$\rho_A^j - \rho_B^j = a_j D_X + b_j D_Y + c_j D_Z, \quad (3)$$

где $a_j = \frac{X_j - X_{cp.}}{\rho_{cp.j}}, b_j = \frac{Y_j - Y_{cp.}}{\rho_{cp.j}}, c_j = \frac{Z_j - Z_{cp.}}{\rho_{cp.j}};$

$$X_{CP} = \frac{1}{2}(X_A + X_B), Y_{CP} = \frac{1}{2}(Y_A + Y_B), Z_{CP} = \frac{1}{2}(Z_A + Z_B);$$

$$\rho_{CP.j} = \frac{1}{2}(\rho_A^j + \rho_B^j).$$

Опорные значения $(X_A - X_B)$, $(Y_A - Y_B)$, $(Z_A - Z_B)$, вычисленные по твердым координатам, обозначим ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 .

На основе формулы (3) при наблюдении четырех спутников с номерами 1,2,3,4 можно получить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_{12}D_X + b_{12}D_Y + c_{12}D_Z &= \Delta\rho_{AB}^{12} \\ a_{13}D_X + b_{13}D_Y + c_{13}D_Z &= \Delta\rho_{AB}^{13} \\ a_{14}D_X + b_{14}D_Y + c_{14}D_Z &= \Delta\rho_{AB}^{14} \end{aligned} \right\} . \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_{12} &= a_1 - a_2, b_{12} = b_1 - b_2, c_{12} = c_1 - c_2, \\ a_{13} &= a_1 - a_3, b_{13} = b_1 - b_3, c_{13} = c_1 - c_3, \\ a_{14} &= a_1 - a_4, b_{14} = b_1 - b_4, c_{14} = c_1 - c_4, \end{aligned} \right\} , \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\rho_{AB}^{12} &= (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^2 - \rho_B^2) \\ \Delta\rho_{AB}^{13} &= (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^3 - \rho_B^3) \\ \Delta\rho_{AB}^{14} &= (\rho_A^1 - \rho_B^1) - (\rho_A^4 - \rho_B^4) \end{aligned} \right\} . \quad (6)$$

Определитель системы (4) будет

$$Q = \begin{bmatrix} a_{12} & b_{12} & c_{12} \\ a_{13} & b_{13} & c_{13} \\ a_{14} & b_{14} & c_{14} \end{bmatrix} , \quad (7)$$

а определители для неизвестных

$$\left. \begin{aligned}
Q_{D_X} &= \begin{bmatrix} \Delta\rho_{AB}^{12} & b_{12} & c_{12} \\ \Delta\rho_{AB}^{13} & b_{13} & b_{13} \\ \Delta\rho_{AB}^{14} & b_{14} & b_{14} \end{bmatrix} \\
Q_{D_Y} &= \begin{bmatrix} a_{12} & \Delta\rho_{AB}^{12} & c_{12} \\ a_{13} & \Delta\rho_{AB}^{13} & c_{13} \\ a_{14} & \Delta\rho_{AB}^{14} & c_{14} \end{bmatrix} \\
Q_{D_Z} &= \begin{bmatrix} a_{12} & b_{12} & \Delta\rho_{AB}^{12} \\ a_{13} & b_{13} & \Delta\rho_{AB}^{13} \\ a_{14} & b_{14} & \Delta\rho_{AB}^{14} \end{bmatrix}
\end{aligned} \right\} . \quad (8)$$

Решением системы (4) будет:

$$D_X = \frac{Q_{D_X}}{Q}, D_Y = \frac{Q_{D_Y}}{Q}, D_Z = \frac{Q_{D_Z}}{Q}, \quad (9)$$

а выражения для дифференциальных поправок будут иметь вид:

$$\delta_X = D_X - \Delta X_0 = \frac{Q_{D_X}}{Q} - \Delta X_0, \quad (10)$$

$$\delta_Y = D_Y - \Delta Y_0 = \frac{Q_{D_Y}}{Q} - \Delta Y_0, \quad (11)$$

$$\delta_Z = D_Z - \Delta Z_0 = \frac{Q_{D_Z}}{Q} - \Delta Z_0. \quad (12)$$

Вычислив определители (7) и (8) (по правилу Саррюса) и подставив результаты в формулы (10) – (12), получим окончательные аналитические выражения для дифференциальных поправок:

$$\left. \begin{aligned}
\delta_X &= \frac{\Delta\rho_{AB}^{12} K_1 + \Delta\rho_{AB}^{13} K_2 + \Delta\rho_{AB}^{14} K_3}{a_{12} K_1 + a_{13} K_2 + a_{14} K_3} - \Delta X_0 \\
\delta_Y &= \frac{\Delta\rho_{AB}^{12} K_4 + \Delta\rho_{AB}^{13} K_5 + \Delta\rho_{AB}^{14} K_6}{b_{12} K_4 + b_{13} K_5 + b_{14} K_6} - \Delta Y_0 \\
\delta_Z &= \frac{\Delta\rho_{AB}^{12} K_7 + \Delta\rho_{AB}^{13} K_8 + \Delta\rho_{AB}^{14} K_9}{c_{12} K_7 + c_{13} K_8 + c_{14} K_9} - \Delta Z_0
\end{aligned} \right\} , \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} K_1 &= b_{13}c_{14} - c_{13}b_{14} , \quad K_2 = c_{12}b_{14} - b_{12}c_{14} , \quad K_3 = b_{12}c_{13} - c_{12}b_{13} , \\ K_4 &= c_{13}a_{14} - a_{13}c_{14} , \quad K_5 = a_{12}c_{14} - c_{12}a_{14} , \quad K_6 = c_{12}a_{13} - a_{12}c_{13} , \end{aligned} \quad (14)$$

$$K_7 = a_{13}b_{14} - b_{13}a_{14} , \quad K_8 = b_{12}a_{14} - a_{12}b_{14} , \quad K_9 = a_{12}b_{13} - b_{12}a_{13} .$$

Здесь необходимо отметить следующее. Величины ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 есть «эталонные» значения разностей координат, которые должны быть известны точнее, чем получаемые из измерений (определяемые первыми членами в (13)). Следовательно, ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 должны быть вычислены по «эталонным» координатам пунктов А и В, т.е. таким, точность которых выше, чем получаемая из «обычных» GPS-наблюдений с использованием фазовых измерений. Классические геодезические (не спутниковые) методы не могут обеспечить такую точность, так как они дают бóльшую ошибку, чем спутниковые измерения. На первый взгляд, получается замкнутый круг: в качестве «эталонных» должны фигурировать координаты более точные, чем получаемые из спутниковых измерений, в то время как максимальную точность определения координат в настоящее время обеспечивают именно спутниковые методы (в частности, метод PPP – Precise Point Positioning). Выход из этого положения может быть в том, чтобы для нахождения эталонных значений использовать результаты многосуточных наблюдений, которые будут точнее, чем результаты, полученные из кратковременных рабочих сеансов. Непрерывные наблюдения с использованием точных эфемерид, поправок часов и информации о задержках сигнала в ионосфере и тропосфере производятся, например, на пунктах сети IGS. Однако на эти пункты (которые к тому же расположены на слишком больших расстояниях друг от друга) нельзя поставить приемники, так как на них уже находится постоянно работающая аппаратура. Поэтому целесообразно использовать другой способ получения эталонных значений разностей координат, основанный на измерении трех сторон треугольника, т.е. трех векторов, образующих замкнутую фигуру. В этом случае возникает теоретическое условие, что суммы приращений (раз-

ностей) координат (т.е. составляющих D_X , D_Y , D_Z) по каждой координатной оси равны нулю; подстановка же в это условие измеренных значений D_X , D_Y , D_Z приводит к появлению соответствующих невязок и к задаче нахождения поправок к измеренным значениям, решаемой коррелятным способом уравнивания по методу наименьших квадратов. Исправленные значения и будут являться эталонными разностями координат ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 .

В этой же главе выполнена проверка метода разностно-координатных поправок на точках некоторых геодезических построений. Использовались два варианта:

- Сырые данные брались из измерений ряда точек, находящихся на территории Сирии. Измерения выполнялись двухчастотными спутниковыми приёмниками Leica GPS 1200, и обработка данных производилась с помощью программы Leica Geo Office (пример 1).
- Скачивались готовые данные наблюдений с постоянно действующих базовых станций (ПДБС), выложенные в Интернете, в частности, данные с постоянно действующих базовых станций сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu/>), и обработка данных производилась с помощью программы Leica Geo Office (пример 2).

Пример 1. Из измерений, проведенных на территории Сирии, была выбрана следующая сеть (рис. 2):

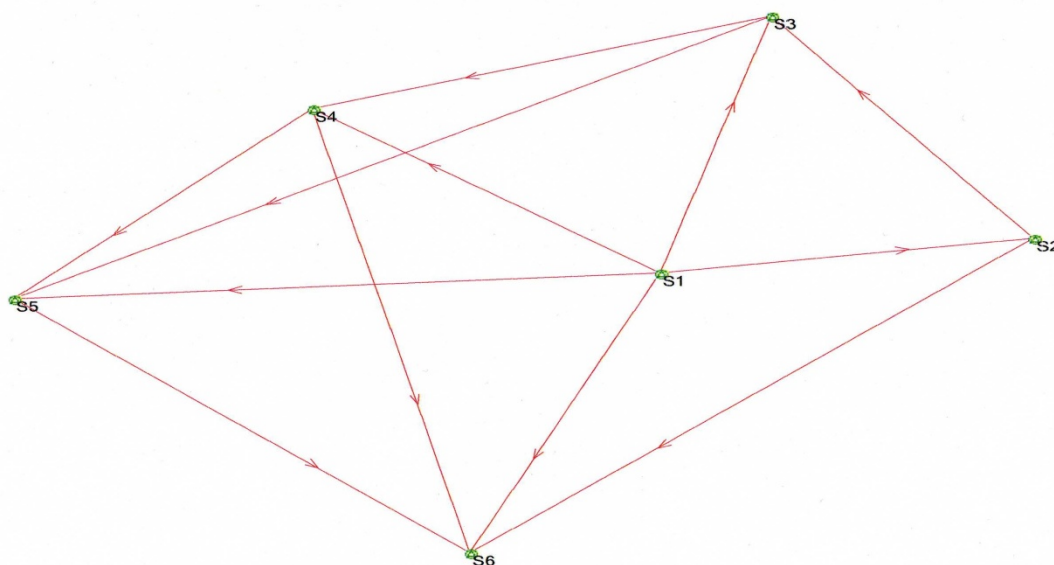


Рис. 2. Схема сети на территории Сирии

Приемники Leica GPS 1200 стояли на каждой точке по 40 минут. Сырые данные из приемников были введены в программу для обработки Leica Geo Office 5.0, где уравнивали сеть (методом наименьших квадратов) и получили сырые (измеренные) разности координат по сторонам и уравненные разности координат. Для определения дифференциальной поправки δ выбираем одну из этих сторон. Предпочтительно выбрать короткую сторону, поскольку точность измерения ее компонентов по осям может быть лучше, чем у длинных сторон. Мы выбрали линию S1 – S2. Дифференциальные поправки получают как разности абсолютных величин измеренных и уравненных значений разностей координат:

$$\begin{aligned}\delta_X &= |\Delta_{X_{изм}}| - |\Delta_{X_{урав}}|, \\ \delta_Y &= |\Delta_{Y_{изм}}| - |\Delta_{Y_{урав}}|, \\ \delta_Z &= |\Delta_{Z_{изм}}| - |\Delta_{Z_{урав}}|.\end{aligned}\tag{15}$$

Этими поправками исправляем измеренные значения разностей координат на других линиях (вводя получаемые по (15) поправки с обратным знаком). Результаты коррекции представлены в таблице 1, где ошибки в разностях координат указаны в миллиметрах. Там же приведены средние квадратические ошибки m_D в длинах линий до и после коррекции.

Таблица 1. Сравнение погрешностей в разностях координат

	До исправления (измер. – урavn.), мм	После исправления (исправ. – урavn.), мм
Сторона S1 – S4		
$\Delta_{X\ S1-S4}$	-11	-10
$\Delta_{Y\ S1-S4}$	-2	-1
$\Delta_{Z\ S1-S4}$	-3	0
$m_D\ S1-S4$	11,6	10,1
Сторона S1 – S6		
$\Delta_{X\ S1-S6}$	-14	-13
$\Delta_{Y\ S1-S6}$	-5	-4
$\Delta_{Z\ S1-S6}$	-24	-21
$m_D\ S1-S6$	28,2	25,0

	Сторона S1 – S3	
--	-----------------	--

Продолжение таблицы 1

$\Delta_{X S1-S3}$	-1	0
$\Delta_{Y S3-S3}$	-6	-5
$\Delta_{Z S1-S3}$	-42	-39
$m_D S1-S3$	42,4	39,3
Сторона S1 – S5		
$\Delta_{X S1-S5}$	-13	-12
$\Delta_{Y S1-S5}$	-3	-2
$\Delta_{Z S1-S5}$	-18	-15
$m_D S1-S5$	22,4	19,3
Сторона S2 – S6		
$\Delta_{X S2-S6}$	-2	-1
$\Delta_{Y S2-S6}$	-2	-1
$\Delta_{Z S2-S6}$	-2	1
$m_D S2-S6$	3,5	1,0
Сторона S3 – S4		
$\Delta_{X S3-S4}$	-2	-1
$\Delta_{Y S3-S4}$	-34	-33
$\Delta_{Z S3-S4}$	-2	1
$m_D S3-S4$	34,1	33,0
Сторона S3 – S5		
$\Delta_{X S3-S5}$	-20	-19
$\Delta_{Y S3-S5}$	-36	-35
$\Delta_{Z S3-S5}$	-25	-22
$m_D S3-S5$	48,2	45,5
Сторона S4 – S5		
$\Delta_{X S4-S5}$	-18	-17
$\Delta_{Y S4-S5}$	-3	-2
$\Delta_{Z S4-S5}$	-21	-18
$m_D S4-S5$	27,8	24,8
Сторона S4 – S6		
$\Delta_{X S4-S6}$	-17	-16
$\Delta_{Y S4-S6}$	-26	-25
$\Delta_{Z S4-S6}$	-50	-47
$m_D S4-S6$	58,9	55,6
Сторона S5 – S6		
$\Delta_{X S5-S6}$	-1	0
$\Delta_{Y S5-S6}$	-28	-27
$\Delta_{Z S5-S6}$	-28	-25
$m_D S5-S6$	39,6	36,8

Мы видим, что расхождения между измеренными и уравненными разностями координат стали меньше, т.е. точность стала больше. Но чтобы иметь бóльшую уверенность в работоспособности метода, надо сравнить ис-

правленные разности координат с разностями твердых координат, как в примере 2.

Пример 2. Скачивались готовые данные наблюдений с постоянно действующих базовых станций, выложенные в Интернете. Была выбрана следующая сеть (рис.3):

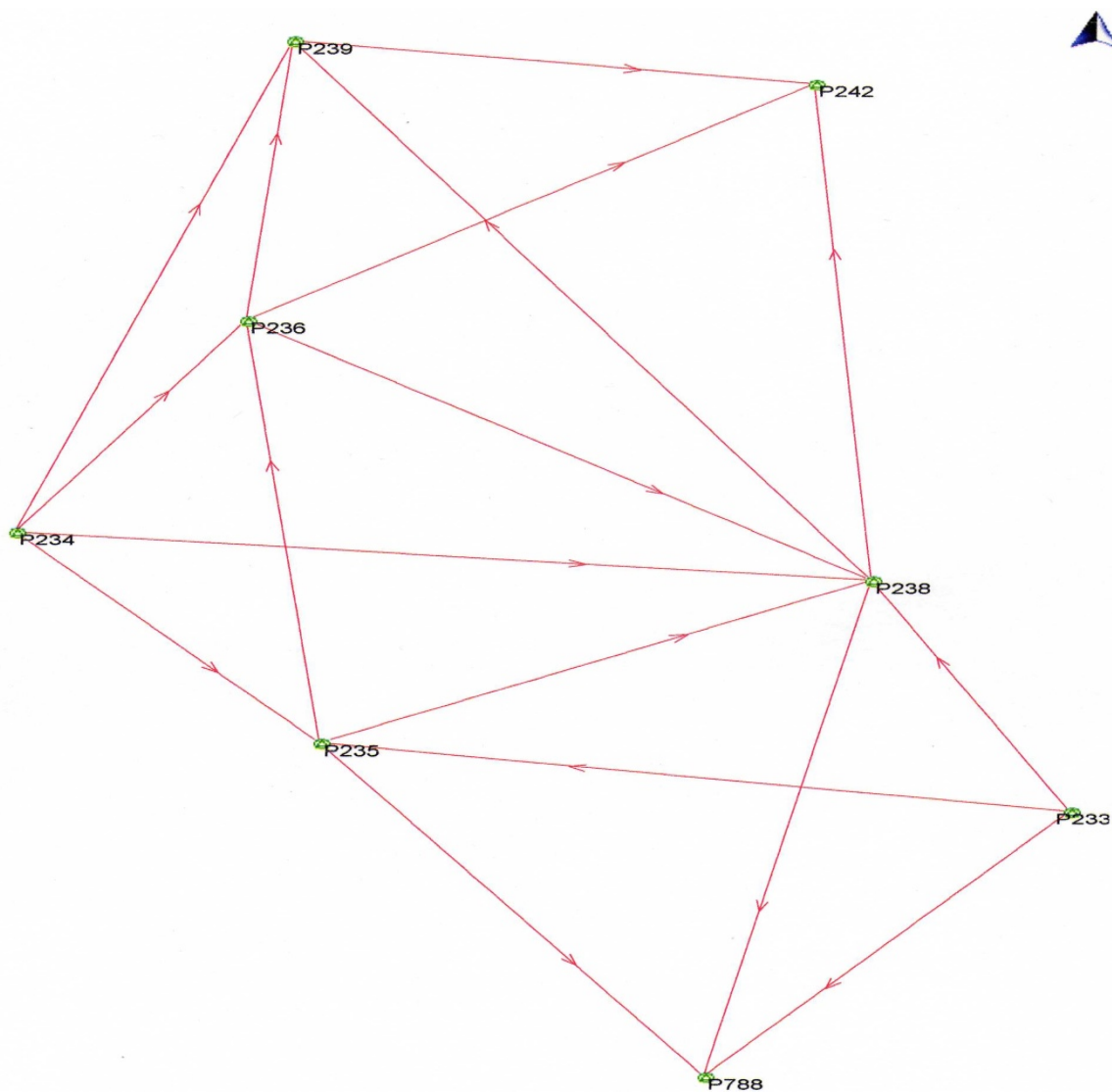


Рис. 3. Схема сети, взятой из интернета

Для определения дифференциальных поправок δ выбираем линию P233 – P238. Имеем:

$$\begin{aligned}\delta_X &= |\Delta_{X_{изм}}| - |\Delta_{X_{твер}}| = -0,005 \text{ м}, \\ \delta_Y &= |\Delta_{Y_{изм}}| - |\Delta_{Y_{твер}}| = 0,009 \text{ м}, \\ \delta_Z &= |\Delta_{Z_{изм}}| - |\Delta_{Z_{твер}}| = -0,012 \text{ м}.\end{aligned}\tag{16}$$

Исправляем этими поправками (с обратным знаком) разности координат на других линиях и получим (таблица 2):

Таблица 2. Сравнение погрешностей в разностях координат

	До исправления (измер. – твер.), мм	После исправления (исправ. – твер.), мм
Сторона P234 – P235		
$\Delta_X P234-P235$	-17	-12
$\Delta_Y P234-P235$	10	1
$\Delta_Z P234-P235$	-16	-4
$m_D P234-P235$	25	13
Сторона P234 – P236		
$\Delta_X P234-P236$	-25	-20
$\Delta_Y P234-P236$	8	-1
$\Delta_Z P234-P236$	-10	2
$m_D P234-P236$	28	20
Сторона P234 – P238		
$\Delta_X P234-P238$	-36	-31
$\Delta_Y P234-P238$	33	24
$\Delta_Z P234-P238$	-10	2
$m_D P234-P238$	50	39
Сторона P235 – P236		
$\Delta_X P235-P236$	-8	-3
$\Delta_Y P235-P236$	18	9
$\Delta_Z P235-P236$	-26	-14
$m_D P235-P236$	33	17
Сторона P235 – P788		
$\Delta_X P235-P788$	-13	-8
$\Delta_Y P235-P788$	43	34
$\Delta_Z P235-P788$	-66	-54
$m_D P235-P788$	80	64
Сторона P235 – P238		
$\Delta_X P235-P238$	-17	-11
$\Delta_Y P235-P238$	21	11
$\Delta_Z P235-P238$	-3	10
$m_D P235-P238$	27	18
Сторона P233 – P788		
$\Delta_X P233-P788$	-12	-6
$\Delta_Y P233-P788$	11	1
$\Delta_Z P233-P788$	-57	-44
$m_D P233-P788$	59	44
Сторона P236 – P238		
$\Delta_X P236-P238$	-11	-5
$\Delta_Y P236-P238$	42	32
$\Delta_Z P236-P238$	-20	-7
$m_D P236-P238$	48	33
Сторона P233 – P235		
$\Delta_X P233-P235$	-24	-18
$\Delta_Y P233-P235$	31	21

$\Delta_Z P233-P235$	-9	4
$m_D P233-P235$	40	28

Продолжение таблицы 2

	Сторона P238 – P788	
$\Delta_X P238-P788$	-3	3
$\Delta_Y P238-P788$	22	12
$\Delta_Z P238-P788$	-71	-58
$m_D P238-P788$	74	59
	Сторона P234 – P239	
$\Delta_X P234-P239$	-31	-25
$\Delta_Y P234-P239$	17	7
$\Delta_Z P234-P239$	-34	-21
$m_D P234-P239$	49	33
	Сторона P236 – P239	
$\Delta_X P236-P239$	-7	-1
$\Delta_Y P236-P239$	8	-2
$\Delta_Z P236-P239$	-23	-10
$m_D P236-P239$	25	10
	Сторона P238 – P239	
$\Delta_X P238-P239$	-3	3
$\Delta_Y P238-P239$	48	38
$\Delta_Z P238-P239$	-36	-23
$m_D P238-P239$	60	45
	Сторона P238 – P242	
$\Delta_X P238-P242$	-5	1
$\Delta_Y P238-P242$	12	2
$\Delta_Z P238-P242$	-35	-22
$m_D P238-P242$	37	22
	Сторона P239 – P242	
$\Delta_X P239-P242$	-9	-3
$\Delta_Y P239-P242$	36	26
$\Delta_Z P239-P242$	-8	5
$m_D P239-P242$	38	27
	Сторона P236 – P242	
$\Delta_X P236-P242$	-16	-10
$\Delta_Y P236-P242$	28	18
$\Delta_Z P236-P242$	-15	-2
$m_D P236-P242$	33	21

Из таблицы 2 видно, что после коррекции точность определения разностей координат ощутимо повышается.

Таким образом, проверка на двух вышеприведенных примерах геодезических сетей наглядно демонстрирует эффективность использования разработанного в диссертации метода.

Получив таким образом уточненные значения ΔX , ΔY , ΔZ , можно вычислить уточненное значение длины вектора базы, т.е. геометрическое расстояние между приемниками:

$$D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} . \quad (17)$$

При этом ошибка m_D будет примерно равна ошибкам в разностях координат. Действительно, обозначив эти ошибки через $m_{\Delta X}$, $m_{\Delta Y}$, $m_{\Delta Z}$, можно записать:

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \Delta X}\right)^2 m_{\Delta X}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta Y}\right)^2 m_{\Delta Y}^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial \Delta Z}\right)^2 m_{\Delta Z}^2} . \quad (18)$$

Полагая для простоты $m_{\Delta X} = m_{\Delta Y} = m_{\Delta Z} = m_{\Delta}$ (пренебрежем здесь тем, что высотная составляющая определяется хуже плановых) и подставив значения производных, найдем:

$$m_D = m_{\Delta} . \quad (19)$$

Таким образом, уточненная GPS-дальнометрия, позволяя более точно вычислить длину пространственного вектора, является подходящим средством для построения векторной геодезической сети и может быть использована при спутниковых измерениях на территории Сирии.

Четвертая глава – «Особенности спутниковых измерений на территории Сирии» – содержит две части.

Первая часть – «Геометрический фактор при спутниковых наблюдениях в Сирии». В принципе известно, каковы наивыгоднейшие геометрические условия выполнения спутниковых наблюдений. Желательно, чтобы спутники более или менее равномерно были бы расположены по небосклону. Из чисто геометрических соображений ясно, что желательно наблюдать спутники в направлении на юг, в направлениях на восток и на запад, а также в направлении на север. Но над северным полюсом нет спутников. Орбиты спутников наклонены к плоскости экватора под углом примерно в 60 градусов. Над северным полюсом и над южным полюсом спутники GPS и ГЛОНАСС не летают. Поэтому рассмотрим сначала вариант, когда в направлении

севера спутника нет. При такой геометрии наблюдений матрица A коэффициентов системы параметрических уравнений, матрица N коэффициентов системы нормальных уравнений и ковариационная матрица Q имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \dots & 2 & 0 \\ \dots & \dots & 3 \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} 3/2 & 0 & -3/4 \\ \dots & 1/4 & 0 \\ \dots & \dots & 1/2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Как видно, геометрия наблюдений далека от идеальной. Элементы, расположенные на главной диагонали матрицы Q , то есть обратные веса неизвестных плановых координат вектора базы и высотной координаты этого вектора, неодинаковы. Существует сильная отрицательная корреляция между ошибками в компонентах X и Z . Вместе с тем геометрия для определения компоненты Y благоприятна. Обратный вес этого неизвестного наименьший, и отсутствует корреляция ошибок этого неизвестного с ошибками остальных неизвестных. Скорее всего, причиной этого является то, что вдоль оси Y расположены два спутника: в направлении востока и в направлении запада. Чтобы улучшить геометрию наблюдений, дополним созвездие наблюдаемых спутников. Пусть пятый спутник расположен в горизонте пункта и в направлении севера. Для такой геометрии по аналогии с (20):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ \dots & 2 & 0 \\ \dots & \dots & 2 \end{bmatrix}; \quad Q = \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ \dots & 1/2 & 0 \\ \dots & \dots & 1/2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Как видно, в этом случае геометрия наблюдений является идеальной. Все компоненты вектора базы определяются с одинаковыми весами и независимо. Полную уверенность в доступности требуемого количества спутников и конкретное значение геометрических факторов потери точности могут дать специальные компьютерные программы. Была использована программа *Web Mission Planning*, которая является не Windows-программой, а взятой из Интернета на сайте <http://asp.ashtech.com/wmp/>. Полученные результаты сведены в таблице 3.

Таблица 3. Азимуты и зенитные расстояния спутников

№ спутника	Тип спутника	Время	Азимут	Зенитное расстояние
G08	GPS	07:55	0 ⁰	52 ⁰
G12	GPS	14:55	0 ⁰	60 ⁰
G21	GPS	18:40	0 ⁰	62 ⁰
R03	ГЛОНАСС	12:56	0 ⁰	47 ⁰
R04	ГЛОНАСС	14:30	0 ⁰	58 ⁰
R09	ГЛОНАСС	20:37	0 ⁰	46 ⁰

Это позволяет сделать следующие выводы:

- На территории Сирии можно наблюдать спутники в направлении точки севера или близком к направлению на точку севера, т.е. на основе (21) можно сказать, что при спутниковых наблюдениях на территории Сирии геометрические условия наблюдений близки к оптимальным, и ошибка единицы веса наименьшая.

- Наилучшие результаты получим, когда наблюдаем спутники GPS вместе со спутниками ГЛОНАСС.

- При наблюдении спутников ГЛОНАСС вместе со спутниками GPS увеличится количество спутников, и можно получить хорошие значения геометрического фактора – *PDOP* в значительно большем интервале времени.

- Как уже было сказано, геодезическая сеть на территории Сирии получилась деформированной. Поэтому при спутниковых наблюдениях на территории Сирии мы получим координаты с большей точностью, чем твердые координаты пунктов опорной сети, однако вопрос о трансформировании требует отдельного исследования.

Вторая часть – «О связи существующей национальной системы координат Сирии с результатами спутниковых измерений». Существуют два типа трансформирования координат из одной системы координат в другую:

- Трансформирование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную

систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода,

- Трансформирование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах.

В качестве эксперимента было выбрано 16 пунктов, которые имеют координаты и в системе WGS-84, и в локальной системе координат, и была использована программа 3D-Transformation (автор данной программы – Nabib Moeen, профессор, преподаватель в Университете Дамаска).

Статистика различия между фактическими и вычисленными координатами с использованием двух моделей преобразований приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Статистика различия между полученными и известными координатами пунктов с использованием общего метода трансформирования

Значения	φ	λ	h	Вектор
минимальные	-0,027"	-0,038"	-0,163м	0,773м
максимальные	0,083"	0,087"	0,519м	3,194м
средние	0,032"	0,039"	-0,184м	1,837
δr	0,030"	0,044"	0,392м	0,645м

Таблица 5. Статистика различия между полученными и известными координатами пунктов с использованием полиномиального метода трансформирования

Значения	φ	λ	h	Вектор
минимальные	-0,017"	-0,023"	-0,119м	0,541м
максимальные	0,050"	0,061"	0,399м	2,835м
средние	0,019"	0,025"	0,135м	1,397
δr	0,013"	0,029"	0,231м	0,495м

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

- Полиномиальный метод дает лучшие результаты, чем общий метод.
- Учитывая, что координаты пунктов сети в Сирии не очень точны, использование данного метода даст нам координаты, близкие к известным (при переходе от WGS-84 к локальной системе координат).

- Для большей верности при применении этого метода надо использовать большое количество точек с известными координатами в обеих системах координат (WGS-84 и локальной).

Заключение.

Полученные в данной работе результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Освещена геодезическая изученность территории Сирии, систематизированы сведения о построении государственной геодезической сети и описана история ее создания в результате работ французских, советских и сирийских геодезистов. Указано на ошибки, допущенные при построении сети, которые привели к ее деформации, и сделан вывод о необходимости обновления ГГС Сирии с использованием глобального спутникового позиционирования.
2. При измерениях глобальными спутниковыми системами наиболее точными являются фазовые измерения, а дифференциальный метод еще более повышает их точность. В работе предложен вариант дифференциального метода, при котором дифференциальные поправки вводятся сразу в конечный результат фазовых измерений – в разности одноименных координат двух пунктов, в которых установлены спутниковые приемники. Преимуществом предлагаемого метода является возможность создания уточненной GPS-дальнометрии, которая может использоваться для построения пространственной векторной геодезической сети и в работах метрологического назначения.
3. Получены аналитические выражения для дифференциальных поправок, вводимых в составляющие D_x , D_y , D_z вектора линии, соединяющей два приемника, т.е. в измеренные приращения (разности) координат.
4. Исследован вопрос об «эталонных» значениях разностей координат, с которыми должны сравниваться измеренные значения для получения дифференциальных поправок. Показано, что «эталонные» значения мо-

гут быть взяты из многосуточных GPS-наблюдений на двух пунктах, но при отсутствии такой возможности допустимо считать «эталонными» значения разностей координат, полученные из уравнивания векторного треугольника как замкнутой фигуры.

5. Выполнена экспериментальная проверка метода разностно-координатных поправок на реальных геодезических построениях. Проверка выполнялась для двух случаев: 1) на участке сети, построенной на территории Сирии; 2) на участке сети, данные о которой взяты из Интернета. В первом случае эталонные значения разностей координат брались из уравнивания, во втором – как разности твердых координат, полученных по результатам измерений в сети постоянно действующих базовых станций. В обоих случаях использование метода разностно-координатных дифференциальных поправок увеличило точность результатов фазовых измерений в среднем в 1,5-2 раза.
6. Показано, что на основе разработанной технологии дифференциальных фазовых GPS-измерений возможна реализация уточненной GPS-дальнометрии, позволяющей более точно вычислить длину пространственного вектора. Она является подходящим средством для построения векторной геодезической сети и может быть использована при спутниковых измерениях на территории Сирии, а также может найти применение при создании метрологических полигонов и может быть включена в поверочную схему средств линейных измерений.
7. Рассмотрены особенности геометрического фактора на территории Сирии. С использованием программы Web Mission Planning выяснено, что на территории Сирии возможно наблюдать спутники в направлении точки севера или в близком к ней направлении, что позволяет реализовать геометрию наблюдений, близкую к оптимальной. Показано, что применение двухсистемных приемников, позволяющих наблюдать как спутники GPS, так и спутники ГЛОНАСС, дает возможность получать хорошие значения PDOP в значительно большем интервале времени.

8. Приведены соображения о связи существующей национальной системы координат Сирии с результатами спутниковых наблюдений. На основе общих принципов трансформирования систем координат выполнено сравнительное исследование двух методов трансформирования из системы WGS-84 в локальную систему координат на территории Сирии и показано, что наиболее подходящим является полиномиальный метод трансформирования.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

1. Голубев А.Н., Мусбах Асаад Али. Аналитические выражения для дифференциальных поправок при фазовых измерениях спутниковыми системами// Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011 №1. С. 6 – 10.
2. Мусбах Асаад Али. Современное состояние геодезической сети на территории Сирийской Арабской Республики// Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011 №3.
3. Мусбах Асаад Али. О связи существующей национальной системы координат Сирии с результатами спутниковых измерений// Геодезия и картография, 2011 №5.
4. Мусбах Асаад Али. Геометрический фактор при спутниковых наблюдениях в Сирии// Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011 №4.