

На правах рукописи

Нубукпо Гумену Коджо

**Разработка методов и программного обеспечения для
повышения точности опорных сетей Буркина-Фасо и Того на
основе GPS измерений**

Специальность 25.00.32 - “Геодезия”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре Астрономии и Космической геодезии
Московского государственного университета геодезии и картографии

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Яшкин Станислав Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Маркузе Юрий Исидорович
доктор технических наук, профессор
Баранов Владимир Николаевич

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

Защита состоится «___»_____2009г в ___ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном
университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64,
Гороховский пер. д.4, МИИГАиК, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Автореферат разослан «___»_____2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Ю.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последние годы произошли революционные изменения в измерительных средствах и методах геодезии. Такие средства, как GPS-измерения, DORIS-измерения, интерферометрия, повлекли за собой революционные изменения в методах геодезии. В этой связи становится весьма актуальной проблема усиления старых опорных каркасных сетей более высокоточными наблюдениями, например, GPS-наблюдениями или другими. При этом возникает ряд проблем; а именно: априорной оценки точности геометрической конфигурации каркасных сетей, совместного уравнивания неравноточных измерений и т.д. Перечисленные проблемы являются актуальными и для государственных сетей Республик Того и Буркина-Фасо. Государственные сети обеих республик были созданы доплеровскими установками, которые морально устарели в 21 веке. Ставится задача модернизировать старые сети обеих стран высокоточными каркасными GPS-наблюдениями, что подтверждается официальными разрешениями компетентных органов обеих республик для проведения данной работы. Этой проблеме и посвящена диссертационная работа.

Целью данной работы является

- разработка метода по повышению точности опорных геодезических сетей республик Того и Буркина-Фасо при помощи GPS-измерений;
- создание алгоритмов и программ, позволяющих применять параметрический способ уравнивания метода наименьших квадратов при выполнении уравнивания 2-х неравноточных сетей.

Основные задачи исследования

На основе параметрического способа метода наименьших квадратов разработать методики, составить алгоритмы и программы для различных вариантов уравнивания. При этом в ходе модернизации старых доплеровских

геодезических сетей, на основе GPS-наблюдений, использовались весовые коэффициенты.

Научная новизна

Новыми научными результатами можно считать:

- разработку методов модернизации старых доплеровских опорных сетей с помощью новых опорных GPS-сетей, при их совместном уравнивании, когда и GPS-пункты являются опорными;
- разработка методов алгоритмов и программ по определению оптимального количества необходимых GPS-пунктов для обновления старой сети;
- создание методик, алгоритмов и программ для выполнения комбинированного уравнивания двух неравноточных сетей;
- реализацию различных методов к выбору весов в зависимости от использования способа улучшения старой доплеровской сети с помощью высокоточных GPS-наблюдений.

Практическая ценность работы:

заключается в модернизации устаревших геодезических сетей Республик Того и Буркина-Фасо. На основе разработанных алгоритмов программ была выполнена модернизация этих сетей. Было дано официальное разрешение компетентных геодезических органов обеих республик на выполнение данной работы. Кроме сетей вышеназванных республик, методики, алгоритмы и программы вполне пригодны и для сетей других западно-африканских стран, сети которых построены доплеровскими установками и они имеют примерно такие же конфигурации и параметры, что и сети республик Того и Буркина-Фасо.

Результаты, выносимые на защиту:

- методики, алгоритмы и программы комбинированного уравнивания при модернизации сетей Республик Того и Буркина-Фасо;
- методики, алгоритмы и программы поэтапного уравнивания путём постепенного увеличения количества GPS-пунктов, совпадающих с доплеровскими опорными пунктами;

- определение оптимального количества опорных GPS-пунктов для достижения максимальной точности модернизируемых сетей.

Публикации и апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК (2008г). По теме диссертации опубликованы 2 научные статьи, в том числе 2 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы – 102 страниц, включая 22 страницы приложений. Диссертация содержит 12 рисунков, 33 таблицы. Список литературы составил 25 наименований, из них 2 на французском языке и одна Интернет-ссылка.

Основное содержание работы

Во введении сформулирована проблема, обоснована её актуальность, поставлена цель, определены задачи диссертационной работы и коротко изложено основное содержание каждой главы диссертации.

Первая глава **«Теории уравнивания и оценка точности геодезических сетей при спутниковых наблюдениях»** посвящена обзору литературы. Из анализа литературы следует, что задачи уравнивания и оценки точности геодезических сетей, основанных на спутниковых наблюдениях, являются весьма актуальными задачами. Как мы уже знаем, все существующие сети, особенно в развивающихся странах, были построены традиционными методами и к настоящему времени не отвечают возросшим требованиям. То есть большинство существующих сетей морально устарело и нуждается в срочной модернизации. Поскольку спутниковые наблюдения являются более точными и более быстрыми в реализации, нежели традиционные методы, то возникает необходимость в их применении для модернизации старых сетей. В связи с этим весьма важной задачей является разработка конкретных

методик, алгоритмов и программ при выполнении уравниваний и оценок точности модернизированных сетей с помощью спутниковых наблюдений.

Геодезические сети, созданные спутниковыми методами, имеют свои особенности, так как методы, применяемые при их создании, были разными. Спутниковые геодезические сети создавались фотографическими, лазерными, доплеровскими и другими способами. В последнее десятилетие построение геодезических сетей выполняется, в основном, с использованием глобальных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS,). При анализе различных геодезических спутниковых методов необходимо учитывать особенности различных методов построения сетей:

- глобальная триангуляция, основанная на использовании угловых измерений;
- глобальная трилатерация, базирующаяся на измерении расстояний до спутников с применением излучений различных участков спектра электромагнитных волн в том числе оптического диапазона (лазерные дальномеры). В последние годы метод спутниковой триангуляции был вытеснён глобальной спутниковой трилатерацией. Последний метод, основанный на использовании спутниковых дальномерных систем, широко применяется в настоящее время для построения глобальных, региональных и локальных геодезических сетей.

Методы построения геодезических спутниковых сетей, весьма различные. К настоящему времени существуют и вполне отчетливо выделяются два направления применения ИСЗ для решения геодезических задач. Первое направление -это динамические методы космической геодезии. Второе направление заключается в построении пространственных геодезических сетей с помощью синхронных наблюдений ИСЗ. За этим направлением утвердилось название геометрического метода космической геодезии. Полезно отметить, что в спутниковой триангуляции, геодезические сети построены с помощью синхронных наблюдений ИСЗ. В спутниковой трилатерации общие принципы построения практически такие же, как и в спутниковой триангуляции, но в отличие от триангуляции в трилатерации

измеряется только модуль векторов «пункт спутник». При измерении длин линий наземными свето- и радиодальномерами широкое распространение получили импульсные и фазовые методы, а также их сочетания. Эти же методы составляют основу спутниковых дальномерных измерений.

При выполнении спутниковых координатных измерений основным определяемым параметром является расстояние между спутником и приемником. Одновременное определение значений расстояний до нескольких спутников позволяет при условии знания координат спутников методом пространственной линейной засечки вычислить координаты пункта наблюдений. В свою очередь, координаты пункта наблюдения могут быть использованы для определения разности координат между пунктами, длин базисных линий, азимутальных направлений, а также целого ряда других вспомогательных параметров. В зависимости от цели решаемых задач различают абсолютные и относительные (дифференциальные) методы координатных определений. Основная отличительная особенность этих двух методов состоит в получении существенно отличающихся по точности координат, что объясняется трудностью учета ошибок систематического характера, свойственных абсолютным методам. Отметим одну важную деталь: относительный и дифференциальный методы в принципе выполняются одинаково. Расстояние между работающими приёмниками в относительном методе равно примерно тысяче километров, а в дифференциальном до десяти километров в зависимости от мощности приёмника. В современной геодезии используют комбинирование результаты, получаемые при использовании различных видов измерений (например, измерений, выполняемых на основе кодовых методов и определений фазы несущих колебаний), и так же используют разности результатов, получаемых на двух различных несущих частотах L1 и L2. Созданию сетей предшествуют априорные оценки точности создаваемых спутниковых геодезических сетей.

Во второй главе **«Уравнивания и оценка точности при улучшении старых геодезических опорных сетей»** описаны геодезические сети как

старые доплеровские, так и новые GPS-сети, пункты которых совмещены с некоторыми пунктами старой доплеровской сети. Старая доплеровская сеть Республики Буркина-Фасо состоит из 54 пунктов, а новая каркасная GPS-сеть состоит из 18 пунктов, которые совмещены с пунктами старой сети и распределены равномерно по всей площади старой сети (см таблицу 1). В Республике Того доплеровская сеть состоит из 11 пунктов, а GPS-сеть из 4 станций (см таблицу 2). Номера в скобках обозначены совместные пункты старой и новой GPS-сети.

Таблица 1. *Список пунктов старой доплеровской сети Республики Буркина-Фасо с совместными GPS пунктами.*

№ пункта	Название пункта	№ пункта	Название пункта
1	TIN-AKOF	27	NADIAGOU
2	ARIBINDA	28	BITOU
3	BARABOULE	29	PO
(4) 1	THLOU	(30) 10	LEO
(5) 2	BOURZANGA	31	DISSIN
6	BOUROUM	32	BONDIGUI
(7) 3	DORI	33	BOBO
(8) 4	SEBBA	34	BAGUERA
9	HANTOUKOUTA	35	YENDERE
10	GAYERI	(36) 11	BANFORA
(11) 5	BOGANDE	37	KASSANDE
12	KAYA	38	MANGODARA
13	SABLE	39	DJIGOUE
14	YAKO	(40) 12	GAOUA
15	TOUGAN	41	BATIE
16	DJIBASSO	42	ARLI
(17) 6	NDOROLA	43	BOULSA
(18) 7	BEKUY	(44) 13	GOUNTOURENIENI
19	OUAHABOU	(45) 14	KANTCHARI
20	GAO	46	MATIAKOALI
21	LADIGA	(47) 15	LOUARGOU
(22) 8	BEGUEDO	48	KABEGA

23	SANANBAORE	49	MOKTEDO
24	KALBOULI	(50) 16	GAMPELA
25	TAPOADJERMA	51	RAMONGO
(26) 9	KONDIO	(52) 17	BISSANDEROU
27	NADIAGOU	53	DEDOUGOU
		(54) 18	TANSILA

Таблица 2. Список пунктов старой доплеровской сети Республики Того с совместными GPS пунктами.

№ пункта	Место расположения
(1) 1	Lome
2	Aneho
3	Kpalime
4	Tohoun
(5) 2	Atakpame
6	Dikpeleau
7	Sokode
(8) 3	Kara
9	Guerinkouka
(10) 4	Mango
11	Dapaong

В этой главе рассмотрены различные способы уравнивания. Были рассмотрены в основном два способа уравнивания метода наименьших квадратов, это параметрический и коррелятный способ уравнивания. На основе параметрического способа разработан алгоритм выполнения неравноточного уравнивания с применением весовых коэффициентов. Параметрический способ был выбран исходя из того, что он более быстр и более экономичен, чем коррелятный, а по точности не уступает коррелятному. Подтверждением нашего выбора является то, что в современной спутниковой геодезии в основном программы составлены параметрическим способом.

Между значениями измеряемых величин Y_i , образующих вектор Y^{n-1} , и точными значениями искомым неизвестных X_j можно составить исходную

систему связи $\bar{Y} = \bar{\Phi}(\bar{X})$:

$$Y_i = \Phi^{(0)}_i(X_1^o, X_2^o, \dots, X_K^o) + \sum_{j=1}^k [a_{ij}(X_j - X_j^o)] + R_i. \quad (1)$$

Выражение (1) является разложением в ряд Тейлора, где $\Phi^{(0)}(X^o_j)$ является функцией от приближённых значений неизвестных, а a_{ij} - является частным производным, учитывающим линейные члены разложения

$$a_{ij} = \left(\frac{\partial}{\partial X_j} Y_i \right)_{X_j^o}. \quad (2)$$

В матричной форме выражение (1) выглядит следующим образом:

$$\bar{Y} = A\Delta\bar{X} + \bar{\Phi}^0(\bar{X}^o), \quad (3)$$

где $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_i)^T$ есть матрица-столбец измеренных величин,

A – прямоугольная матрица, элементами этой матрицы являются a_{ij} ;

$\Delta\bar{X} = \bar{X} - \bar{X}^o$ есть вектор поправок; $\bar{\Phi}^{(0)}(\bar{X}^o)$ - вектор приближенных значений.

Вектор свободных членов будет равным

$$\bar{L} = \bar{\Phi}^0(\bar{X}^o) - \bar{Y}. \quad (4)$$

В нашем случае в ходе комбинированного уравнивания доплеровских и GPS-сетей для определения $\bar{\Phi}^{(0)}(\bar{X}^o)$ были использованы приращения приближённых координат, которые были применены соответственно при уравнивании как доплеровской сети, так и GPS-сети.

Для определения измеренных величин \bar{Y} мы использовали моделированные нами раннее измерения вектора «пункт-пункт» для доплеровских связей. А для GPS связей использовали известные нам измеренные величины вектора «пункт-пункт». Напоминаем, что в процессе выполнения комбинированного уравнивания использовалась совокупность всех GPS и доплеровских связей. Для поэтапного уравнивания применялись те же самые связи векторов «пункт-пункт», что и в случае уравнивания доплеровской сети. Но здесь, в отличие от доплеровской сети, при уравнивании опорными пунктами считались GPS-пункты. Уравнение связи (3) примет следующий вид

$$A\Delta\bar{X} + \bar{L} = V. \quad (5)$$

Исходя из условия $V^2 = \min$, после дифференцирования и приравнивания к нулю, получаем систему нормальных уравнений

$$R\Delta\bar{X} + \bar{b} = 0, \quad (6)$$

где $R = A^T S A,$

$$\bar{b} = A^T S \bar{L},$$

$$\Delta\bar{X} = -R^{-1}\bar{b},$$

а S -весовая матрица.

Для поэтапного уравнивания весовая матрица бралась в виде

$$S = S_D \cdot 100, \quad (7)$$

где $S_D = \frac{c^2}{m_D^2},$

а $m_D = \sqrt{m_i^2 + m_j^2}$, здесь m_i, m_j -каталожные СКО доплеровских пунктов.

Для комбинированного уравнивания применяются одновременно как веса, полученные при уравнивания доплеровской сети, так и веса, полученные при уравнивании GPS-сети.

В дальнейшем вычисляем поправки V_i , которые равны $V = A\Delta X + L$.

Вычисляем среднюю квадратическую ошибку единицы веса по формуле:

$$\mu = \sqrt{\frac{\bar{V}^T S \bar{V}}{r-k}}, \quad (8)$$

где $r-k$ -число избыточных измерений.

Обратную весовую матрицу вычисляем в виде матрицы:

$$Q = R^{-1} = (A^T S A)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{XX} & \delta q_{XY} & \delta q_{XZ} \\ \delta q_{YX} & q_{YY} & \delta q_{YZ} \\ \delta q_{ZX} & \delta q_{ZY} & q_{ZZ} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Средние квадратические ошибки вычисляем по известным формулам:

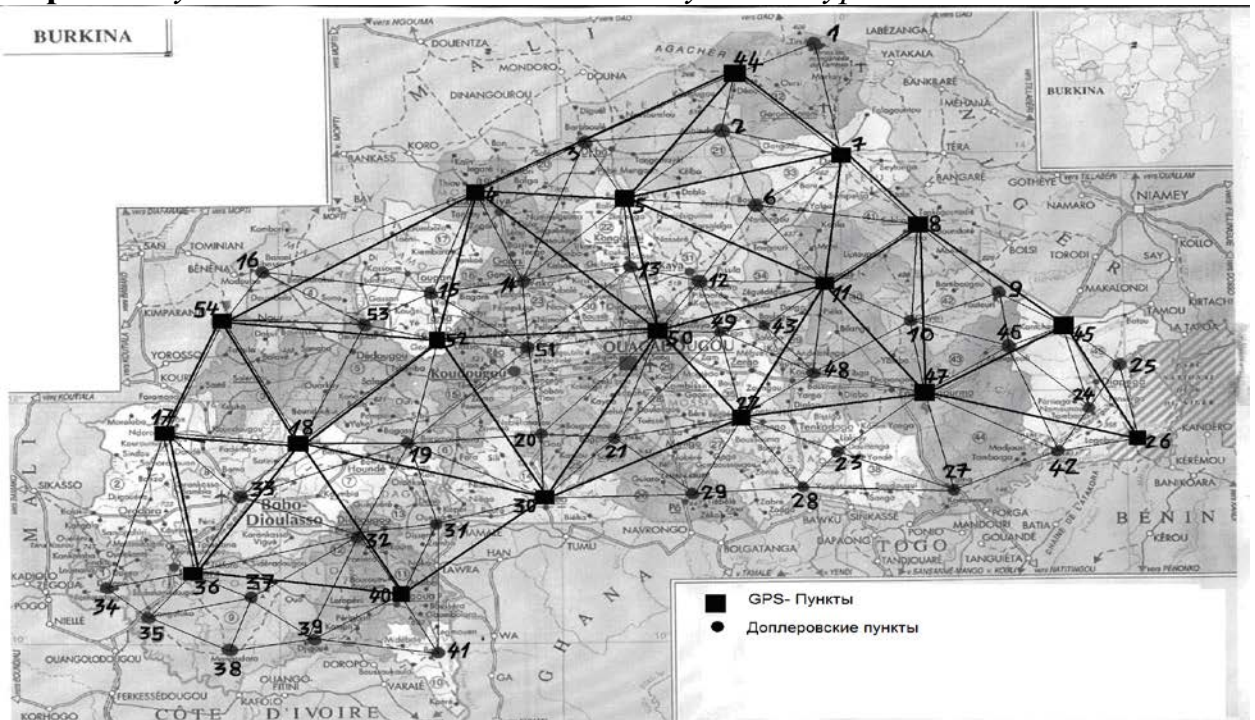
$$\begin{aligned} m_x &= \mu x \sqrt{q_{XX}}, \\ m_y &= \mu y \sqrt{q_{YY}}, \\ m_z &= \mu z \sqrt{q_{ZZ}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где μ - ошибка единицы веса, а q_{xx}, q_{yy}, q_{zz} -диагональные элементы обратной весовой матрицы Q .

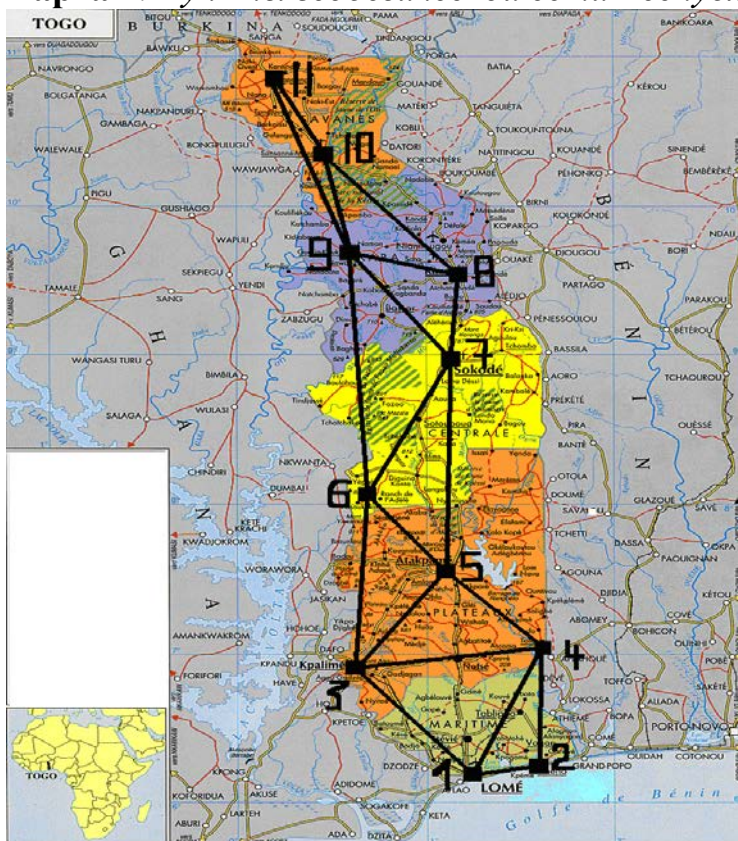
На основе данного алгоритма было выполнено уравнивание старых доплеровских сетей Республик Того и Буркина-Фасо и новой каркасной GPS-сети Республики Буркина-Фасо. Кроме этого, выше упомянутый алгоритм использовался в ходе уравнивания неравноточных сетей. Напоминаем, что в процессе модернизации старых доплеровских сетей применялись 2 метода: поэтапный и комбинированный. После сравнения точностей старых доплеровских и новых GPS-сетей, в работе сделан вывод, что GPS-сети вполне пригодны для их использования в модернизации старых доплеровских сетей обеих республик.

В первом методе при обновлении старых сетей использовался комбинированный метод. При этом совместно использовалась старая доплеровская сеть и новая GPS-сеть. При этом пункты GPS-сети, которые принимались как жёсткие в процессе уравнивания самой GPS-сети, будут считаться жёсткими в нашей новой сети. В процессе комбинированного уравнивания применялись связи доплеровской сети, и связи GPS-сети.

Карта 1. Пункты геодезической сети Республики Буркина-Фасо.



Карта 2. Пункты геодезической сети Республики Того.



Результаты комбинированного уравнивания представлены в таблице 3.

Таблица 3. Средние квадратические ошибки пунктов комбинированной сети

№ пункта	m(m)	№ пункта	m(m)
1	0,13	28	0,14
2	0,15	29	0,14
3	0,15	31	0,11
4	0,09	32	0,10
5	0,08	33	0,08
6	0,09	34	0,17
7	0,08	35	0,18
8	0,10	36	0,09
9	0,08	37	0,14
10	0,07	38	0,15
11	0,06	39	0,16
12	0,07	40	0,10
13	0,09	41	0,17

14	0,09	42	0,12
15	0,11	43	0,09
16	0,14	45	0,10
18	0,05	46	0,07
19	0,07	47	0,06
20	0,10	48	0,08
21	0,09	49	0,08
22	0,05	50	0,05
23	0,10	51	0,05
24	0,09	52	0,11
25	0,10	53	0,12
27	0,15	54	0,10

Кроме того, было решено выполнить обновление старых сетей другим способом, путём поэтапного уравнивания с постепенным увеличением количества опорных пунктов. Здесь в процессе уравнивания применялись исключительно доплеровские связи векторов пункт-пункт, а совместные GPS-пункты являлись опорными для данного совместного уравнивания. В целях определения оптимального количества опорных пунктов, которые могли бы быть использованы для улучшения старой сети, предполагалось постепенно увеличивать количество используемых совместных каркасных пунктов. Для опорной сети Республики Буркина-Фасо первоначально были взяты 4 каркасных пункта. Эти пункты являлись опорными и в процессе уравнивания самой GPS-сети, они были распределены по краям старой сети. С этими пунктами было выполнено совместное уравнивание. Уравнивание выполнялось поэтапно с постепенным увеличением количества совместных опорных пунктов на два. Продолжая процесс, получаем в итоге 8 различных комбинаций уравнивания (см таблицу 4). Результаты поэтапного уравнивания для Республики Буркина-Фасо представлены в таблице 6.

Для геодезической сети Республики Того берём первоначально 2 каркасных пункта и далее увеличиваем количество совместных каркасных пунктов на 1

и так пока не достигнем всех 4 каркасных GPS-пунктов. Получаем 3 варианта уравнивания (см таблицу 5). Результаты поэтапного уравнивание для Республики Того представлены в таблице 7.

Таблица 4. *Список пунктов различных комбинаций сети Республики Буркина-Фасо*

Номер комбинации	Номера пунктов, участвующих в уравнивании
№1	(44,17,30,26)
№2	(44,4,17,30,26,7)
№3	(44,4,54,17,30,22,26,7)
№4	(44,4,5,54,17,40,30,22,26,7)
№5	(44,4,5,54,17,36,40,30,22,26,45,7)
№6	(44,4,5,54,17,18,36,40,30,22,26,45,8,7)
№7	(44,4,5,52,54,17,18,36,40,30,22,47,26,45,8,7)
№8	(44,4,5,52,54,17,18,36,40,30,50,11,22,47,26,45,8,7)

Таблица 5. *Список пунктов различных комбинаций сети Республики Того.*

Номер комбинации	Номера пунктов, участвующих в уравнивании
№1	(1,11)
№2	(1,5,11)
№3	1,5,8,11)

Таблица 6. *Значение СКО (в м) для пунктов сети Буркина-Фасо, которые не являлись совместными в каждой из 8 комбинаций уравнивания.*

№ пункт	ско№1 (м)	ско№2 (м)	ско№3 (м)	ско№4 (м)	ско№5 (м)	ско№6 (м)	ско№7 (м)	ско№8 (м)
1	0,30	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,18	0,16
2	0,36	0,34	0,30	0,29	0,27	0,25	0,22	0,22
3	0,33	0,32	0,30	0,27	0,25	0,23	0,21	0,20
6	0,26	0,24	0,22	0,17	0,16	0,12	0,09	0,05
9	0,26	0,25	0,22	0,20	0,19	0,13	0,10	0,11
10	0,25	0,21	0,19	0,15	0,13	0,11	0,10	0,10

12	0,29	0,24	0,22	0,17	0,16	0,13	0,09	0,08
13	0,24	0,21	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12	0,12
14	0,25	0,22	0,21	0,18	0,15	0,13	0,11	0,11
15	0,26	0,23	0,21	0,22	0,20	0,17	0,14	0,14
16	0,28	0,25	0,22	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18
19	0,26	0,22	0,20	0,18	0,17	0,14	0,10	0,09
20	0,27	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,16	0,15
21	0,27	0,25	0,22	0,22	0,18	0,14	0,12	0,12
23	0,33	0,32	0,28	0,27	0,26	0,24	0,20	0,19
24	0,27	0,22	0,15	0,13	0,12	0,10	0,08	0,09
25	0,28	0,23	0,19	0,15	0,14	0,13	0,12	0,09
27	0,37	0,32	0,31	0,29	0,28	0,25	0,23	0,22
28	0,37	0,34	0,31	0,29	0,24	0,21	0,19	0,19
29	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,19
31	0,28	0,23	0,22	0,22	0,21	0,14	0,11	0,11
32	0,31	0,30	0,25	0,21	0,18	0,15	0,11	0,10
33	0,26	0,21	0,18	0,17	0,16	0,14	0,12	0,09
34	0,36	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,25	0,23
35	0,37	0,36	0,35	0,33	0,31	0,27	0,25	0,24
37	0,32	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,18
38	0,33	0,31	0,27	0,24	0,23	0,21	0,19	0,19
39	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,22	0,20	0,21
41	0,30	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23
42	0,31	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17
43	0,32	0,29	0,27	0,25	0,19	0,15	0,12	0,07
46	0,31	0,29	0,27	0,25	0,21	0,16	0,11	0,08
48	0,27	0,21	0,17	0,15	0,12	0,08	0,06	0,07
49	0,27	0,21	0,18	0,15	0,13	0,09	0,08	0,06
51	0,26	0,22	0,19	0,16	0,15	0,12	0,11	0,10
53	0,28	0,23	0,19	0,15	0,13	0,12	0,11	0,13

Таблица 7. Значение СКО (в м) пунктов сети Республики Того, которые не являлись совместными в каждой из 3 комбинаций уравнивания.

№ пункта	ско.№1	ско.№2	ско.№3
2	0,41	0,34	0,16
3	0,40	0,34	0,11
4	0,42	0,35	0,12
6	0,41	0,35	0,15
7	0,39	0,33	0,09
9	0,41	0,33	0,14
10	0,40	0,34	0,17

Предварительный анализ говорит о том, что метод работает и позволяет обновлять сеть Республик Того и Буркина-Фасо.

В третьей главе «Исследования точности при улучшении старых доплеровских сетей с использованием GPS-наблюдений» анализировались полученные результаты уравнивание. Основным условием реализации метода наименьших квадратов является отыскание минимума функции, стоящей в левой части уравнений поправок. А это приводит к условию $[pvv]=\min$. В этом условии важную роль играет удачный выбор весовых коэффициентов p , при неравноточных измерениях, так как весовые коэффициенты в отличие от поправок не являются детерминированными. Весовые коэффициенты обратно пропорциональны квадратам ошибок измерений. В данной работе определялись весовые коэффициенты старой доплеровской сети и весовые коэффициенты новой наблюденной GPS-сети. Заметим, что точность старой доплеровской сети на порядок ниже, чем точность новой наблюденной GPS сети. Это соотношение точностей старой и

новой сети составляет примерно $\frac{m_D}{m_{GPS}} \approx \frac{1}{10}$. Практически, для большинства

пунктов сети это соотношение наблюдается и в весовых коэффициентах. Первоначально было выполнено поэтапное уравнивание, которое состоит из неравноточных измерений. Поэтому нам необходимо установить веса для новой проектируемой нами сети. Из выше приведённых рассуждений среднее соотношение весов новой проектируемой сети и каркасной GPS-сети

составляет $\frac{S_D}{S_H} \approx \frac{1}{100}$. Здесь S_H является заданным весом для новой совместной

уравниваемой сети, а S_d являются весами доплеровской сети. Данный подбор весов пригоден только для поэтапного уравнивания, где не учитывались модули векторов пункт-пункт GPS-сети. Напоминаем, что GPS-сеть уравнивалась отдельно. Сеть состоит из 18 пунктов с 4 опорными пунктами и 36 связями. В случае, когда мы выполняли комбинированные уравнивания и учитывали связи, как доплеровской сети, так и связи GPS-сети, вес выбирался по формуле:
$$S = \frac{c^2}{m^2},$$

где $m_{ij} = \sqrt{m_i^2 + m_j^2}$, для доплеровских связей комбинированной сети и $m = 0,005 + D \cdot 10^{-6}$ для GPS-связей комбинированной сети. Напомним, что m_i, m_j -это ранее известные средние квадратические ошибки пунктов доплеровской сети.

Далее в работе исследована зависимость точности доплеровской опорной сети от количества GPS-станций. Первоначально автор исходил из того, что точность старой доплеровской сети составляет примерно 40-50см, а точность GPS-сети составляет примерно 3-5см. Отсюда следует, что точность GPS-сети такова, что её вполне можно использовать в качестве жёсткого каркаса. Поэтому целью работы является уравнивание двух неравноточных сетей и определение оптимального количества совместных пунктов, и их структуры в GPS-сети. В главе 2 выполнено уравнивание сети Республики Буркина-Фасо, которая состоит из 54 пунктов, комбинированным методом. В этом методе использовались все существующие связи как доплеровские, так и GPS связи. Опорными пунктами в этом методе являлись те пункты, которые считались жёсткими в процессе уравнивание самой GPS-сети. Напоминаем что из 18 пунктов GPS-сети, 4 считались жёсткими. В комбинированном уравнивании имеем 50 определяемых пунктов, из них 14 являются GPS-пунктами, и 4 GPS-пункта принимались за жёсткие. Полученная точность модернизированной сети после комбинированного уравнивания составляет примерно 5-17см. Это говорит о том, что в работе удалось значительно

улучшить старую доплеровскую сеть, используя каркас GPS-станций из совместных пунктов.

Кроме этого, было выполнено постепенное уравнивание с увеличением количества опорных пунктов. Это было сделано с целью определить оптимальное количество опорных пунктов, которые можно применить для обновления сети. В итоге для Республики Буркина-Фасо было выполнено 8 различных этапов уравнивания, а для Республики Того получилось 3 этапа. На основе этих двух таблиц для наглядности были построены 2 графика.

Таблица 8. Средние квадратические ошибки для всех 8 этапов уравнивания

№ комбинации	мср в м
№1	0.31
№2	0.28
№3	0.26
№4	0.23
№5	0.20
№6	0.17
№7	0.15
№8	0.14

Таблица 8 демонстрирует, что уже на 6-ом этапе точность сети значительно улучшилась. Замечена тенденция стабилизации полученной точности. Это означает, что дальнейшее увеличение количества опорных пунктов уже не влияет на точность. В связи с этим отметим, что необходимости в наблюдении 18-ти или более пунктов для улучшения старой доплеровской сети результаты исследований не подтверждают. Вполне достаточно 14-16 пунктов, чтобы улучшить старую доплеровскую сеть. При этом нет необходимости в переизмерении старой доплеровской сети. Подтверждением сказанного может служить рисунок 1, из которого наглядно видно, что сделанные нами выводы вполне обоснованны. Как мы видим, после сравнение полученных результатов уравнивания двумя независимыми методами, методом поэтапного уравнивания (таблица 6) и методом комбинированного уравнивания (таблицу 3), полученные результаты

практически не отличаются друг от друга. Можно констатировать, что эти 2 метода взаимно дополняют друг друга и доказывают правильность выбранного нами подхода. Для Республики Того было выполнено только совместное уравнивание с увеличением количества опорных пунктов (см таблицу 10). Комбинированное уравнивание не выполнялось. Это объясняется тем, что сеть Республики Того небольшая, и количество опорных GPS-пунктов всего четыре, поэтому не выполнялось уравнивания самой GPS-сети, из-за отсутствия избыточных величин. Но даже и для Республики Того из рисунка 2 видно, что уже на третьем этапе намечается тенденция к стабилизации точности уравниваемой сети. Исходя из исследований, выполненных как для Республики Буркина-Фасо, так и для Республики Того, можно сделать следующие выводы:

- исследования и расчёты показывают, что при среднем расстоянии между пунктами около 100км, для улучшения старой доплеровской сети, необходимо иметь ~30-35% опорных GPS-пунктов от общего количества;
- пункты, находящиеся внутри контура очерченного GPS-пунктами, имеют точность выше примерно на 10 см чем те пункты, которые находятся за пределами контура очерченного GPS-пунктами

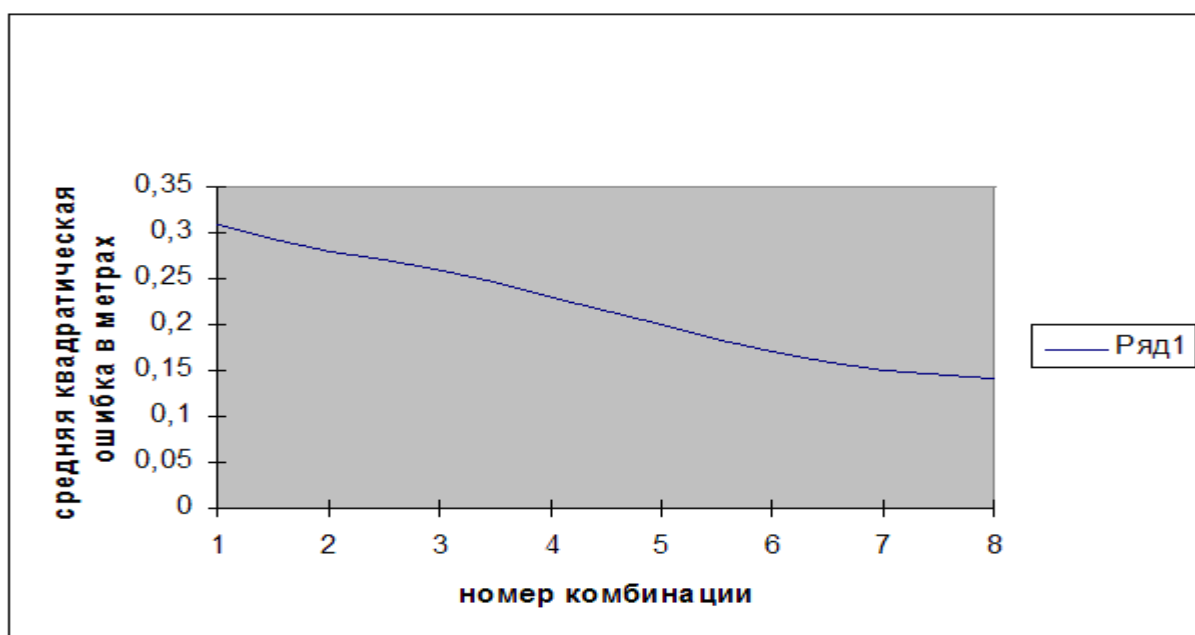


Рис1. Соотношение точности уравнивания относительно номера комбинации.

Таблица 10. Полученная точность для сети Республики Того относительно номера комбинации.

№ комбинации	СКО в метрах
№1	0,40
№2	0,34
№3	0,12

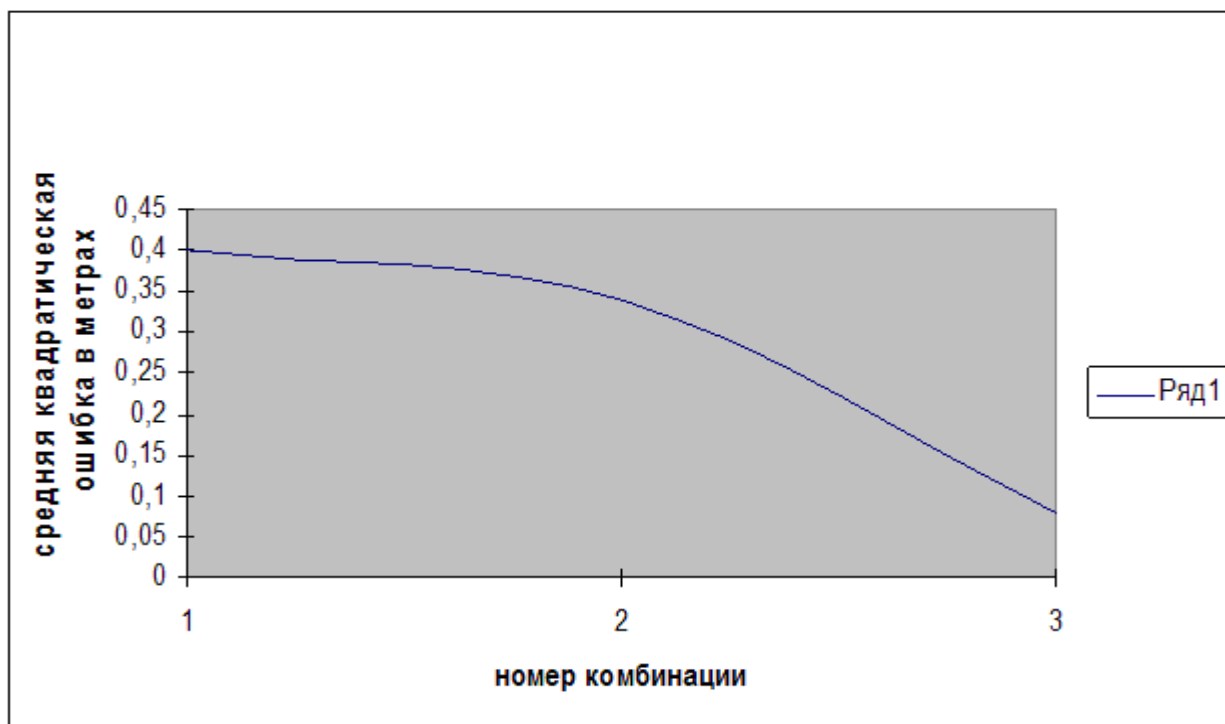


Рис2. Соотношение точности уравнивания относительно номера комбинации.

-опорные каркасные пункты должны быть отнаблюдены при условии, что пункты равномерно распределены по всей площади старой уравниваемой сети.

Таким образом, точность доплеровской сети до уравнивания составляла около 50см, а после уравнивания составила приблизительно 14 см (см. таблицу 11). Кроме этого, метод комбинированного и совместного уравнивания даёт примерно ту же самую точность (14см и 11см в среднем). Можно сказать, что геодезическая сеть после модернизации существенно улучшилась.

Таблица 11. Сравнение точности сети Республики Буркина-Фасо до и после уравнивания.

№ пункт	СКО(м) до уравнивания	СКО(м) после уравнивания	№ пункт	СКО(м) до уравнивания	СКО(м) после уравнивания
1	0,56	0,15	28	0,43	0,09
2	0,46	0,07	29	0,49	0,17
3	0,49	0,18	31	0,47	0,15
6	0,51	0,13	32	0,48	0,23
9	0,47	0,14	33	0,58	0,13
10	0,45	0,08	34	0,53	0,16
12	0,46	0,13	35	0,49	0,19
13	0,54	0,06	37	0,49	0,05
14	0,49	0,11	38	0,51	0,25
15	0,47	0,15	39	0,56	0,18
16	0,48	0,16	41	0,47	0,05
19	0,46	0,12	42	0,49	0,17
20	0,48	0,06	43	0,48	0,22
21	0,48	0,15	46	0,55	0,16
23	0,51	0,11	48	0,46	0,06
24	0,48	0,08	49	0,48	0,04
25	0,48	0,11	51	0,50	0,10
27	0,46	0,08	53	0,49	0,05

На основе выполненной нами работы, были разработаны методы которые дают методика, алгоритмы и программы для модернизации старых доплеровских сетей с определением оптимального количества опорных GPS-пунктов. Метод вполне применим для улучшения сетей других стран Западной Африки, территории и сети которых идентичны сети Республики Буркина-Фасо и Того. Это даст значительный экономический эффект при выполнении вышеуказанных работ.

Заключение

1. При отсутствии возможности перенаблюдать всю государственную сеть (на примере республик Буркина-Фасо и Того), можно значительно повысить точность старых доплеровских сетей с помощью GPS-измерений на пунктах этой сети. Было дано официальное разрешение компетентных геодезических органов обеих республик на выполнение данной работы.

В работе показано, что, используя разработанные методы и алгоритмы при установленных условиях размещения пунктов, можно значительно повысить точность всей старой сети (примерно на полпорядка, то есть от 50см до 13см). В дальнейшем эти сети можно использовать как опорные для сетей более низкой точности.

2. В работе предложены два подхода при переуровнении старых сетей. Первый метод является поэтапным уравниванием с определением оптимального количества опорных пунктов, необходимых для достижения максимальной точности. А второй метод -комбинированный способ уравнивания с применением одновременно всех связей типа «пункт-пункт» GPS-определений и доплеровских сетей республик Буркина-Фасо и Того. Комбинированный метод был использован в качестве контроля.

3. На основании исследований, выполненных в данной работе, показано, что для успешной модернизации опорных геодезических сетей достаточно иметь каркасную сеть GPS-пунктов, которые составляют 30-35% от общего количества всех пунктов модернизируемых сетей, и они должны быть расположены по краям этих сетей.

4. На основании выполненных в работе исследований установлено, что метод совместного уравнивания с поэтапным увеличением количества опорных GPS-пунктов и метод комбинированного уравнивания дают точность одинакового порядка (10-15см).

5. Разработанные в диссертации методы и алгоритмы вполне могут быть использованы в других странах западной Африки, где в качестве опорных геодезических сетей применяются доплеровские сети, выполненные

французками геодезистами, теми же методами что и в рассмотренных в работе странах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нубукпо Гумену Коджо. «Обновление геодезической государственной сети республики Буркина Фасо с помощью каркаса GPS измерений», Геодезия и аэрофотосъёмка, №1, 2009г. М..
2. Нубукпо Гумену Коджо. «Методы уравнивания геодезических GPS сетей на примере Республик Буркина Фасо и Того». Геодезия и аэрофотосъёмка, №4, 2009г. М..