

УДК 528.335.2
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-38-48

Оценка смещений пунктов свободной геодезической сети при повторных наблюдениях с незакрепленных точек

М. Г. Мустафин, Г. Е. Васильев^{1*}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

* e-mail: s225016@stud.spmi.ru

Аннотация. Статья посвящена развитию методов мониторинга деформаций. Проведен краткий обзор существующих методов наблюдения за смещениями наблюдаемых объектов, выделены точки развития классических методов мониторинга. Показана перспективность применения компьютерных технологий. Учтен сложившийся принцип измерений со свободных станций. Предлагается использовать так называемый прямой метод отыскания деформаций сети при повторных измерениях, состоящий в сравнении координат точек при преобразовании и наложении двух сетей. Применение формул преобразования Гельмерта осуществляется путем итерационного расчета параметров перехода. Приводится общая математика предлагаемого метода, результаты обработки тестовых измерений. Разработанный алгоритм для обработки результатов измерений по предлагаемой методике показал свою эффективность. Показаны перспективы развития предлагаемого метода.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, деформации, деформационная сеть, измерения, преобразование координат, итерационные и поисковые методы

Введение

В условиях интенсивного строительства и освоения территорий важным аспектом является обеспечение эффективности и безопасности ведения различных видов работ. Кроме того, вследствие особенностей техногенных, природных и геологических условий определенные территории могут быть подвержены аномальным деформационным процессам, например, из-за наличия на территории подземных сооружений [1]. Вкупе эти факторы определяют важную задачу – совершенствование деформационного мониторинга окружающей среды.

Под деформационным мониторингом понимается проектирование и создание специальной сети, проведение систематических наблюдений за ее пунктами, обработка результатов наблюдений и их интерпретация с целью проверки соответствия нормативным значениям и прогноза развития процесса. При этом деформационные сети разделяют на 2 типа: сети, опирающиеся на исходные пункты, и свободные. Первые содержат исходные пункты за пределами зоны деформаций, свободные сети не имеют исходных пунктов [2].

Классические методы оценки деформаций объектов относятся в основном к оценке высотных смещений [3] по результатам, как правило, геометрического нивелирования, хотя существует множество задач, требующих оценки плановых (пространственных) деформаций [4, 5]. При реализации классических методов используются оптические и цифровые [6] нивелиры различной точности. На данный момент существует более 10 способов оценки стабильности высотных сетей, но они так или иначе классифицируются по основным положениям. Так, часто выделяют 2 основные группы:

1) методы, основанные на принципе неизменности отметки одного из наиболее стабильных реперов сети;

2) основанные на принципе неизменности средней отметки всех реперов или группы наиболее стабильных из них.

Для обеих групп актуален вопрос выбора наиболее устойчивых реперов в сети, так как от качества их выбора зависит заключение о стабильности сети в целом, что подробно рассмотрено в статье Б. Н. Дьякова [7]. Определение наиболее стабильных пунктов является отдельной задачей. При определенных условиях бывает затруднительно или невоз-

можно достоверно оценить устойчивость опорных реперов. Так как ошибки в определении опорных реперов или их физическая неустойчивость приводят к ошибкам в обработке измерений, разрабатываются методы, позволяющие оценивать устойчивость объектов без привязки к опорным реперам.

Методы и материалы

На данный момент существует множество технических средств и методов, позволяющих определять деформации земной поверхности и различных техногенных объектов [8]. Одним из наиболее перспективных методов наблюдения за деформациями, позволяющих снизить влияние опорных пунктов, является метод измерений с заранее незакрепленных (свободных) станций. В первую очередь данный метод измерений связан с использованием электронных тахеометров и лазерных трекеров, однако использование технологий лазерного сканирования или цифровой фотограмметрии для определения деформаций [9] подразумевает схожую методику. При реализации способа свободных станций прибор устанавливается в любом удобном месте и определяют его положение, а затем координаты определяемых точек [10], при этом положение закрепляемых деформационных пунктов может быть заранее оптимизировано [11]. Применение метода свободных станций для определения вертикальных смещений, основанного на свойстве инвариантности геодезических сетей, обосновано в работе Нгуена Хыу Вьета [12]. Схожие исследования по обнаружению вертикальных перемещений без привязки к опорным станциям рассмотрены в контексте обработки относительных геодезических сетей [13]. Способ оценки деформаций объектов со свободных станций путем решения трехмерной задачи методом наименьших квадратов с использованием инвариантных величин, например, углов и расстояний между закрепленными марками, подробно рассмотрен в рамках диссертационного исследования О. С. Царевой [14]. В качестве инвариантов могут выступать также расстояния от опорных точек до границ объекта или его характерных элементов [15, 16]. Путем получе-

ния пространственных данных можно наблюдать и локальные деформации, например, трещины [17].

При обработке измерений со свободных станций необходимо привести измерения в единую систему координат и по совмещению измерений различных стоянок определить смещения. На каждой точке стояния прибора результаты измерений образуют свободную геодезическую сеть. Возможность уравнивания свободных и нуль-свободных пространственных сетей параметрическим методом рассмотрена в статье С. В. Тюрина [18]. В ходе обработки измерений необходимо связать все свободные сети в единую сеть, представляющую собой массив уравненных точек. В статье А. В. Зубова и Н. С. Павлова [19] описывается способ оценки стабильности опорных и деформационных сетей на основе определения параметров Гельмерта для разных циклов измерений, а отбраковка нестабильных пунктов ведется на основе критерия Граббса – Смирнова. При использовании такого метода возникает 2 основные задачи: поиск параметров перехода между системами координат и отбраковка точек.

Вне зависимости от подхода к поиску параметров наложения сетей задача требует решения неоднозначности и решается каким-либо методом оптимизации. В качестве целевой функции оптимизации чаще всего применяются функции, основанные на методе наименьших квадратов. В качестве оптимизационной стратегии может использоваться метод Ньютона 2-го порядка [20], градиентный метод [21], различные поисковые методы [22, 23]. Оптимизационные стратегии получили большое распространение в геодезии и хорошо изучены, так как применяются не только для апостериорной оценки точности и стабильности пунктов, но и для априорного моделирования [24].

В широком смысле существуют две основные стратегии анализа деформаций по результатам измерений: общий тест соответствия (ОТС) и робастные оценки. Разрабатываются и иные математические методы, например, комбинаторные, но они еще недостаточно изучены [25]. ОТС представляет собой итеративный поиск выбросов, при этом

смещенные точки по очереди изымаются из обработки на каждой итерации. Для выявления и отбраковки деформируемых пунктов из общего массива измерений необходимо применить некий критерий устойчивости [26–28]. Критерии могут относиться ко всему контролируемому объекту либо относиться локально к отдельным точкам объекта, позволяя выявить наиболее нестабильные из них. Оценки могут основываться на внутренней надежности и сходимости сети [29, 30] или представлять собой критерии допустимости относительно внешних требований. ОТС широко применяется, однако он обладает значительным недостатком: так как на каждой итерации из обработки изымается последовательно по одной точке, любая ошибка отбраковки ведет к отягощению ошибкой последующей обработки. Данный недостаток ставит под вопрос целесообразность применения метода ОТС при обработке объектов с множественными смещениями. Существуют более современные вариации метода, учитывающие все возможные вариации смещений на каждой итерации, однако они также не лишены недостатков [31], в частности, они значительно требовательнее к вычислительной мощности.

Классические робастные оценки, в свою очередь, осуществляются на основе «модели инфляции дисперсии» и устойчивой оценке. В данном случае влияние смещенных точек на результаты анализа уменьшается на каждой итерации [32]. На сегодняшний день при анализе деформаций методом свободных станций робастные методы применяются чаще. Помимо существующих, создаются и новые оценки на основе внесения большего числа оценочных критериев [33–35]. Наиболее распространенными методами являются метод итеративно взвешенного преобразования и метод наименьшей абсолютной суммы [36, 37]. Существуют и более совершенные робастные методы, как, например, метод, основанный на использовании Msplit-оценок, в предположении, что сети могут одновременно принадлежать нескольким моделям соответствия [38]. Недостатком данных методов является то, что устойчивость (робастность) сети подразумевает свободу от выбро-

сов уравненных сетей на момент поиска смещений. То есть, необходимо учитывать ошибки измерений, так как «выбросы» в ходе робастной оценки относятся не к измерениям, а к смещениям какой-либо рассматриваемой точки, что ведет к меньшей достоверности робастных методов в случаях, когда все точки устойчивы. В качестве решения разрабатываются методы, позволяющие оценивать смещения непосредственно по результатам наблюдений [39].

Таким образом, ни одну из существующих стратегий нельзя назвать универсальной. Каждый из существующих методов может быть более или менее эффективен применительно к различным объектам и условиям.

Отдельно встает вопрос о выборе метода поиска параметров Гельмерта. Если Н. Х. Вьет и О. С. Царева придерживаются метода, основанного на принципе инвариантности, т. е. совпадения в положении точек устанавливаются на основе постоянства геометрических элементов (длин, углов, векторов и т. д.), то, например, Каспари [40] оценивает степень совмещенности сетей по набору уравненных координат пунктов. Новел и Каминский, в свою очередь, предлагают метод, позволяющий оценивать смещения пунктов по результатам измерений, что позволяет исключить влияние постоянных ошибок измерений на обнаружение смещений. Однако при использовании в разных циклах измерений различных типов приборов (например, электронного тахеометра и ГНСС-приемника), данный метод подразумевает дополнительные геометрические построения ввиду различного характера наблюдений.

В целях совершенствования методов контроля геодезических сетей необходимо совершенствование существующих методик наблюдения, в частности, метода измерений со свободных станций как одного из наиболее перспективных методов определения деформаций. При использовании метода свободного стационарирования абсолютно универсального подхода к обработке полученных данных на сегодняшний день не существует, а наиболее изученными остаются общий тест соответствия и робастные оценки, следовательно, целесообразно применять обе стратегии в рамках обработки одной выборки.

В рамках данного исследования на базе программного обеспечения Microsoft Excel проведены вычисления, позволяющие получить параметры трансформирования систем координат методом прямого поиска параметров перехода с переменным шагом. Для упрощения локализации ошибок и визуализации результатов вычисления выполнены для оценки двумерных смещений. Принципиально описываемые методы не отличаются в приложении к плановым и пространственным сетям.

В общем виде алгоритм вычисления в обоих случаях выглядит следующим образом: в рабочую среду загружаются два файла координат точек – по одному файлу на каждый цикл измерений. Затем по последовательно перебираемым парам точек вычисляются предварительные параметры перехода между сетями коор-

динат двух циклов измерений на основе формул преобразования Гельмерта. Данные параметры уточняются в итерационном цикле на основе заданной целевой функции путем последовательного перебора значений параметров с переменным шагом. Сначала значение первого из параметров изменяется с переменным шагом до тех пор, пока значение целевой функции не перестанет изменяться в пределах заданного допуска, затем аналогично перебираются значения прочих параметров независимо друг от друга. В результате выполнения итерационных вычислений алгоритм выделяет наиболее сместившиеся точки. В обоих случаях целевой функцией служит сумма разностей между положением точки, полученным в результате измерений, и ее положением, вычисленным по параметрам связи между системами координат:

$$v = \sum p \left[\left(a_{\text{измер}} - a_{\text{теор}} \right)^2 + \left(b_{\text{измер}} - b_{\text{теор}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где $a_{\text{измер}}$ и $b_{\text{измер}}$ – плоские прямоугольные координаты точки, полученные в результате измерений; $a_{\text{теор}}$ и $b_{\text{теор}}$ – координаты точки, полученные по параметрам связи; p – вес точки.

Формулы поиска величины сдвига начала координат имеют вид

$$\begin{aligned} x0_i &= x_{i-1} - m_i \cdot a_{i-1} \cdot \cos(\alpha_i) + m_i \cdot b_{i-1} \cdot \sin(\alpha_i); \\ y0_i &= y_{i-1} - m_i \cdot a_{i-1} \cdot \sin(\alpha_i) - m_i \cdot b_{i-1} \cdot \cos(\alpha_i), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x0_i$, $y0_i$ – координаты начала второй системы координат в первой системе по измерениям данной пары точек; α_i – угол поворота между системами координат, полученный как разность дирекционных углов направления $(i-1) - (i)$ в обеих системах; m_i – масштабный коэффициент между системами; a_{i-1}, b_{i-1} – координаты первой точки вектора во второй системе координат; x_{i-1}, y_{i-1} – координаты первой точки вектора в первой системе координат.

На первом этапе вычислений находятся предварительные значения параметров перехода, которые будут впоследствии уточнены в итерационном цикле. В качестве предварительных параметров принимаются средние значения параметров перехода, полученные последовательным перебором пар соседних точек массива (первой и второй, второй и третьей, ...,

последней и первой). Масштабный коэффициент между системами вычисляется как отношение длины вектора в одной системе к его же длине в другой. В предположении, что единицы измерения в обеих системах остаются неизменными и отсутствуют факторы, искажающие плоскость систем, в рассматриваемых алгоритмах масштабный коэффициент принят равным 1 и не участвует в процессе уравнивания.

После вычисления предварительных значений параметров по всем последовательным векторам их значения усредняются и начинается итерационный цикл. Суть цикла заключена в следующем:

1) по формулам связи находятся теоретические значения координат каждой точки с использованием предварительных параметров, вычисляемых по формулам:

$$\begin{aligned} a_{\text{теор}} &= (x - x_0) \cdot \cos(\alpha) + (y - y_0) \cdot \sin(\alpha); \\ b_{\text{теор}} &= (y - y_0) \cdot \cos(\alpha) - (x - x_0) \cdot \sin(\alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_{\text{теор}}$, $b_{\text{теор}}$ – вычисленные по параметрам связи координаты точки во второй системе; x , y – координаты этой же точки в первой системе; x_0 , y_0 – координаты сдвига начала координат, α – угол поворота между системами;

2) по полученным значениям координат всех точек находится сумма квадратов отклонений по формуле (1);

3) последовательно на величину шага, определяемого требованиями к точности, изменяются параметры перехода таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений стала меньше, чем на предыдущей итерации. При этом величина шага подбирается отдельно для координат начала второй системы координат в первой и отдельно для угла поворота между системами координат;

4) с учетом измененных параметров заново вычисляются отклонения для каждой

точки. В алгоритме, работающем на основе ОТС, точка с наибольшим радиус-вектором отклонения исключается из массива данных, если величина отклонения превышает заранее выбранную величину критического смещения. В таком случае данная точка считается нестабильной и не участвует в дальнейшей обработке.

В алгоритме, основанном на робастной оценке, вес точки уменьшается пропорционально абсолютной величине ее смещения;

5) уточненные значения параметров принимаются в качестве исходных, и цикл повторяется до тех пор, пока все величины смещений не окажутся в пределах допуска.

В качестве критерия для отбраковки точек алгоритмом, основанном на ОТС, используется неравенство

$$v_{\text{max}} \leq \eta_0, \quad (4)$$

где v_{max} – максимальный радиус-вектор смещения точки из общего числа смещений; η_0 – заданный пользователем стандарт предельного смещения. Для алгоритма, основанного на робастной оценке, условие аналогично, но выражено через вес точки и представляет собой неравенство

$$P_i \geq 1, \quad (5)$$

где $P(i) = \frac{\eta_0}{\sqrt{v_i^2}}$ – вес точки.

Результаты

С помощью вычислений обоими алгоритмами были оценены смещения точек экспериментальной выборки. Для этого под управлением ПО Spatial Analyzer был произведен ряд тестовых измерений, смоделирована сеть пунктов с известными координатами, оценена стабильность пунктов средствами Spatial Analyzer и с помощью проведенных вычислений.

Так как рассматриваемые вычислительные алгоритмы предназначены для оценки плановых смещений пунктов, а Spatial Analyzer работает в пространственной сети, она закреплена на эталонной плоскости, чтобы исключить вли-

яние высоты и рассматривать смоделированные сети как квазиплановые. Схема расположения пунктов представлена на рис. 1.

На данной схеме пункты 2, 4, 5 являются стабильными, и их положение между циклами измерений не изменяется, а пункты 1, 3, 6 являются деформируемыми.

После обмера исходной сети магнитные держатели, закрепляющие пункты 1, 3 и 6, были вручную смещены, а также был проведен обмер сети с измененным положением пунктов.

Панель оценки смещений по результатам обмера деформированной сети при установленном допуске на смещение в 5 мм представлена на рис. 2.

Из Spatial Analyzer в формате текстового файла были получены координаты пунктов сети до и после внесения смещений. Результаты вычислений для смоделированной сети представлены на рис. 3, 4.

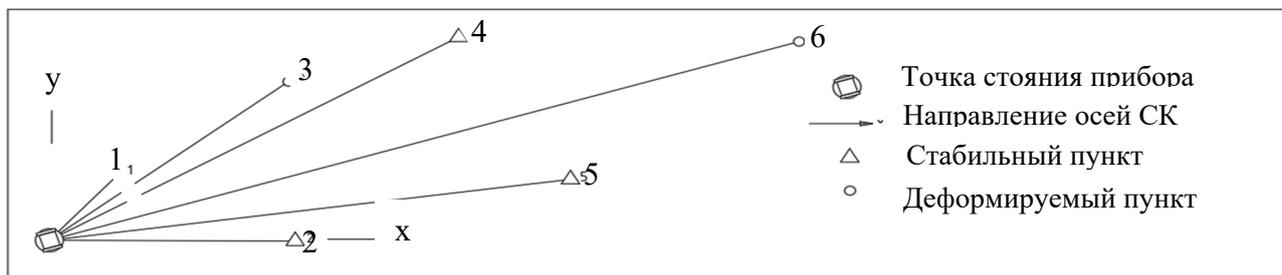


Рис. 1. Схема расположения закрепленных точек сети

Проверка стабильности

Прибор: Leica AT960/930
Статич.

Имя группы для замеренных точек
Оценка стабильности 1 Применити

Референция, заданная группой: 1 цикл

Point	dX	dY	dZ	dMag
✓ 1	-0	8	-0	8
✓ 2	0	-0	-0	0
✓ 3	1	-6	-0	6
✓ 4	-0	0	-0	0
✓ 5	-0	-0	-0	0
✓ 6	24	2	-0	24

Измерить вручную

Точка y

Удалить

Автоматическое измерение

1 точка

Multiple Points

Допуск: 5,0 Примени

Результаты смещения SKO 10, MAX 24 ВНЕ ДОПУСКА!

If you Relocate the instrument:

Best-fit RMS 9, MAX 19 Добавить новый прибор: Преобразование

Best-fit Scaled RMS 7, MAX 9 новый прибор: Преобразование и Масштаб

Закончено – смещение приемлемое Отмена

Рис. 2. Панель оценки стабильности при деформации сети

s	x0	y0	g	t	m	Начать	Очистить
24,857311	-2,746	-4,684	0,20001	0,993787	7,261335		
Точки, исключенные из обработки		6	3	1	4		
Данные в обработке							
№	1	2					
X	432,000	919,000					
Y	-4,000	127,000					
A	432,000	919,000					
B	-4,000	127,000					
Атеор	434,743	727,259					
Втеор	-1,848	429,456					
Данные исходного файла							
№	1	2	3	4	5	6	
X	119	432	420	722	919	1325	
Y	138	-4	335	429	127	418	
A	119	432	422	722	919	1348	
B	147	-4	329	429	127	420	

Рис. 3. Результат обработки сети на основе ОТС

s	x0	y0	g	t	m		
105,5179	-0,503	-1,824	0,17489	0,993787	5,136096	Начать	
						Очистить	
Данные в обработке							
№	1	2	3	4	5	6	
X	119,000	432,000	420,000	722,000	919,000	1325,000	
Y	138,000	-4,000	335,000	429,000	127,000	418,000	
A	119,000	432,000	422,000	722,000	919,000	1348,000	
B	147,000	-4,000	329,000	429,000	127,000	420,000	
Атеор	120,226	432,486	422,243	724,726	920,159	1327,661	
Втеор	139,203	-4,418	334,640	427,074	124,057	412,949	
	7,893	0,641	5,645	3,338	3,163	21,526	
Данные исходного файла							
№	1	2	3	4	5	6	
X	119	432	420	722	919	1325	
Y	138	-4	335	429	127	418	
A	119	432	422	722	919	1348	
B	147	-4	329	429	127	420	
	7,893311	0,641019	5,645259	3,338233	3,163039	21,52632	

Рис. 4. Результат обработки сети на основе робастной оценки

Заключение

На примере обработки экспериментальной сети можно заключить, что при количестве значимых смещений, составляющем половину общего количества пунктов, алгоритм, основанный на ОТС, не позволяет получить корректных результатов. Это связано с тем, что при пошаговой отбраковке пунктов влияние отдельных смещений «размазывается» по сети, приводя при высоком проценте смещенных пунктов к потере при вычислении взаимной геометрии набора точек. Когда количе-

ство смещений в процентном соотношении от общего числа точек сети велико, следует опираться на данные робастной оценки. Несмотря на наличие вычислительной ошибки в ходе вычислений на основе ОТС, факт наличия смещений в сети был установлен, что говорит о перспективности применения описываемого метода при анализе пространственных деформаций объектов. Установление зависимостей влияния количества и величин смещений на результаты обработки измерений повысит достоверность оценки деформаций предложенным методом при его развитии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bryn M. J., Afonin D. A., Bogomolova N. N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – P. 386–392. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
2. Nowel K. Specification of deformation congruence models using combinatorial iterative DIA testing procedure // Journal of Geodesy – 2020 – Vol. 94(12). – P. 1–23. – DOI 10.1007/s00190-020-01446-9.
3. Мустафин М. Г., Наумов А. С. Контроль допустимых деформаций земной поверхности при строительстве вертикальных выработок в условиях застроенных территорий // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 194–197.
4. Маркузе Ю. И., Лэ Ань Куонг. Исследование алгоритма для анализа деформаций геодезических пунктов при наблюдении за горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений // Геодезия и картография. – 2017. – № 7. – С. 23–30. – DOI 10.22389/0016-7126-2017-925-7-23-30.
5. Кузин А. А., Петров В. В., Пештиев А. А. Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 22–32. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.

6. Илюхин Д. А. Применение цифровых нивелиров для наблюдения за осадками сооружений // Записки Горного института. – 2012. – Т. 196. – С. 65–67.
7. Дьяков Б. Н. Сравнительный анализ способов Костехеля и Марчака // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 6 (74). – С. 43–46.
8. Owczarz K. A review of geodetic and remote sensing methods used for detecting surface displacements caused by mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 609, No. 1. – P. 012076. – DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012076.
9. Корнилов Ю. Н., Артемьев П. А., Зверева О. В. Определение деформации объектов фотограмметрическим методом с использованием ЦФС «Photomod» // Записки Горного института. – 2013. – Т. 206. – С. 53–59.
10. Брынь М. Я., Лобанова Ю. В., Афонин Д. А., Шевченко Г. Г. Оценка точности определения положения точек способом свободного стационарирования // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 5. – С. 2–9. – DOI 10.22389/0016-7126-2021-971-5-2-9.
11. Корнилов Ю. Н., Царёва О. С., Шевченко А. С. Оптимизация расположения деформационных марок при построении сети в виде линейной пространственной засечки // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 12. – С. 2–11. – DOI 10.22389/0016-7126-2021-978-12-2-11.
12. Нгуен Хыу Вьет. Разработка методики оценки вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов модели деформационной сети : автореф. ... дисс. канд. техн. наук. – СПб., 2018. – 19 с.
13. Filipiak-kowszyk D., Kamiński W. Determination of vertical displacements in relative monitoring networks // Archives of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 66, No. 1. – P. 309–326.
14. Царёва О. С. Метод оценки пространственных деформаций при геодезическом мониторинге памятников культурного наследия : автореф. ... дисс. канд. техн. наук. – СПб., 2020. – 20 с.
15. AbdAllah A. A. G., Wang Z. Optimizing the geodetic networks based on the distances between the net points and the project border // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 647. – DOI 10.1038/s41598-021-04566-0.
16. Кольцов П. В. Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 65–69.
17. Kuzin A. A., Palkin P. O. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks // Journal of Physics Conference Series. – 2021. – Vol. 1728(1). – P. 012010. – DOI 10.1088/1742-6596/1728/1/012010/.
18. Тюрин С. В. Уравнивание свободных пространственных сетей [Электронный ресурс] // Записки Горного института. – 2004. – Т. 156. – С. 193. – Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8963>.
19. Зубов А. В., Павлов Н. С. Оценка стабильности опорных и деформационных маркшейдерско-геодезических сетей // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 2 (94). – С. 21–23.
20. Зубов А. В., Быкасов Д. А. Получение параметров связи между плоскими системами координат методом Ньютона второго порядка // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития. – 2020. – № 1. – С. 58–62.
21. Коугия В. А., Канашин Н. В. Определение градиентным методом элементов связи между трехмерными системами координат // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 2. – С. 22–28.
22. Eliseeva N. N., Zubov A. V. The application of search methods for solving optimization problems in geodesy // Topical issues of rational use of natural resources. – 2019. – P. 346–352. – DOI 10.1201/9781003014577-43.
23. Rajaganapathy S., Melbourne J., Salapaka M. V. Change detection using an iterative algorithm with guarantees // Automatica. – 2022. – Vol. 136 (1). – P. 110075. – DOI 10.1016/j.automatica.2021.110075.
24. Брынь М. Я., Шевченко Г. Г. Проектирование геодезической сети поисковым методом на основе использования неискаженной модели // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, № 12. – С. 2–10. – DOI 10.22389/0016-7126-2020-966-12-2-10.
25. Teunissen P. J. G. Distributional theory for the DIA method // Journal of Geodesy. – 2017. – Vol. 92(2). – DOI 10.1007/s00190-017-1045-7/.
26. Zaminpardaz, S., Teunissen, P. J. G. & Tiberius, C. C. J. M. A risk evaluation method for deformation monitoring systems // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94(3). – DOI 10.1007/s00190-020-01356-w.
27. Duchnowski R. Hodges–Lehmann estimates in deformation analyses // Journal of Geodesy. – 2013. – Vol. 87(10-12). – DOI 10.1007/s00190-013-0651-2.
28. Langbein J. Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker–random-walk models // Journal of Geodesy. – 2012. – Vol. 86 (9). – DOI 10.1007/s00190-012-0556-5.

29. Prószyński W. Another approach to reliability measures for systems with correlated observations [Electronic resource] // Journal of Geodesy. – 2010. – Vol. 84. – P. 547–556. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0394-2>.
30. Зубов А. В., Беляев В. В., Евтеева Т. А. Оценка качества моделей, построенных по методу наименьших квадратов // Маркшейдерский вестник. – 2011. – № 1 (81). – С. 39–42.
31. Rüdiger L., Lösler M. Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria // Journal of Applied Geodesy. – 2017. – Vol. 11. – P. 271–283.
32. Nowel K. Specification of deformation congruence models using combinatorial iterative DIA testing procedure // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94 (12). – P. 1–23. – DOI 10.1007/s00190-020-01446-9.
33. Ismael Érique Koch, Ivandro Klein, Luiz Gonzaga Jr., Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, Maurício Roberto Veronez. Robust Estimators in Geodetic Networks Based on a New Metaheuristic: Independent Vortices Search // Sensors. – 2019. – Vol. 19 (20). – DOI 10.3390/s19204535.
34. Wiśniewski Z. Total Msplit estimation // Journal of Geodesy. – 2022. – Vol. 96 (10). – P. 82. – DOI 10.1007/s00190-022-01668-z.
35. Yang L., Shen Y. Robust M estimation for 3D correlated vector observations based on modified bifactor weight reduction model // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94 (3). – DOI 10.1007/s00190-020-01351-1.
36. Корнилов Ю. Н., Царёва О. С. Совершенствование методики наблюдений за деформациями зданий и сооружений // Геодезия и картография. – 2020. – № 4. – С. 9–18. – DOI 10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18.
37. Chang G., Xu T., Wang Q. M-estimator for the 3D symmetric Helmert coordinate transformation [Electronic resource] // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 92. – P. 47–58. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1043-9>.
38. Nowel K. Squared Msplit(q) S-transformation of control network deformations // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 93 (1). – DOI 10.1007/s00190-018-1221-4.
39. Nowel K., Kamiński W. Robust estimation of deformation from observation differences for free control networks // Journal of Geodesy. – 2014. – Vol. 88 (8). – DOI 10.1007/s00190-014-0719-7.
40. Hamza V., Ambrožič T., Stopar B. (2020). Deformation analysis: the Caspary approach // Geodetski Vestnik. – 2020. – Vol. 64 (01). – P. 68–88. – DOI 10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.68-88.

Об авторах

Мурат Газизович Мустафин – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной геодезии.
Глеб Евгеньевич Васильев – аспирант кафедры инженерной геодезии.

Получено 13.04.2023

© М. Г. Мустафин, Г. Е. Васильев, 2023

Estimation of deformations of free geodetic networks by repeating measurements from unfixed stations

M. G. Mustafin¹, G. E. Vasiljev^{1}*

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

* e-mail: s225016@stud.spmi.ru

Abstract. This article is dedicated to improving of modern deformations monitoring methods. Short review of actual deformation analysis methods is presented. Some points of improving of classic methods of geodetic monitoring are high-lighted. Some perspectivity of using computer technologies is shown. Actual method of free control network measurements is considered. It is proposed to use the so-called direct method of finding network deformations during repeated measurements, which consists in comparing the points' coordinates during the transformation and superposition of two networks. Helmert transformation formulae application is performed by computer iterations processing of transformation parameters. The general mathematics of the proposed method and the processing results of test measurements are given. The developed algorithm for processing the measurement results according to the proposed method has shown its effectiveness. Some perspectives of method's development are shown.

Keywords: geodetic monitoring, deformation analysis, deformation network, measurements, Helmert transformation, iterative methods

REFERENCES

1. Bryn, M. J., Afonin, D. A., & Bogomolova, N. N. (2017). Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*, 189, 386–392. DOI 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
2. Nowel, K. (2020). Specification of deformation congruence models using combinatorial iterative DIA testing procedure. *Journal of Geodesy*, 94(12), 1–23. DOI 10.1007/s00190-020-01446-9.
3. Mustafin, M. G., & Naumov, A. S. (2012). Controls allowed earth deformation construction vertical openings in built-up area. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 198, 194–197 [in Russian].
4. Markuze, Yu. I., & Le Anh, Cuong. (2017). Investigation of an algorithm for analyzing deformations of geodetic points when observing horizontal displacements of hydraulic structures. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 7, 23–30. DOI 10.22389/0016-7126-2017-925-7-23-30 [in Russian].
5. Kuzin, A. A., Petrov, V. V., & Peftiev, A. A. (2023). Geodetic supply of alignment the reflecting surface's shape of the main mirror of a radio telescope using laser trackers. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(1), 22–32. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32 [in Russian].
6. Ilyukhin, D. A. (2012). Application of digital levels for rainall structures monitoring. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 196, 65–67 [in Russian].
7. Djacov, B. N. (2009). Comparative analysis of Kostechel and Marchac methods. *Marksheyderskiy vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 6(74), 43–46 [in Russian].
8. Owczarz, K. (2020). A review of geodetic and remote sensing methods used for detecting surface displacements caused by mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 609(1), P. 012076. DOI 10.1088/1755-1315/609/1/012076.
9. Kornilov, Y. N., Artem'ev, P. A., & Zvereva, O. V. (2013). The use of photogrammetric method for object deformation detection with «Photomod» digital photogrammetric station. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 206, 53–59 [in Russian].
10. Bryn, M. Ya., Lobanova, Yu. V., Afonin, D. A., & Shevchenko, G. G. (2021). Evaluating the accuracy of determining the points' position by free stationing method. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 82(5), 2–9. DOI 10.22389/0016-7126-2021-971-5-2-9 [in Russian].
11. Kornilov, Yu. N., Tsareva, O. S., & Shevchenko, A. S. (2021). Optimization of deformation marks location at building a network in the form of a linear spatial intersection. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 82(12), 2-11. DOI 10.22389/0016-7126-2021-978-12-2-11 [in Russian].
12. Nguyen Huu Viet. (2018). Development of a methodology for assessing the vertical displacements of the foundations of buildings and structures based on the analysis of the elements of the deformation network model. *Extended abstract of candidate's thesis*. Saint-Petersburg, 19 p. [in Russian].
13. Filipiak-kowszyk, D., & Kamiński, W. (2020). Determination of vertical displacements in relative monitoring networks. *Archives of Civil Engineering*, 66(1), 309 – 326.
14. Tsareva, O. S. (2020). Method for assessing spatial deformations in geodetic monitoring of cultural heritage monuments. *Extended abstract of candidate's thesis*. Saint-Petersburg, 20 p. [in Russian].
15. AbdAllah, A. A. G., Wang, Z. (2022). Optimizing the geodetic networks based on the distances between the net points and the project border. *Scientific Reports*, 12(1), P. 647. DOI 10.1038/s41598-021-04566-0.
16. Kol'tsov, P. V. (2012). Reflectionless observation technique of deforming edges of open-pit mines and spoil dumps. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 198, 65–69 [in Russian].
17. Kuzin, A. A., & Palkin, P. O. (2021). Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks. *Journal of Physics Conference Series*, 1728(1), P. 012010. DOI 10.1088/1742-6596/1728/1/012010/.
18. Tyurin, S. V. (2004). Adjustment of free spatial networks. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 156, P. 193. Retrieved from <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/8963> [in Russian].
19. Zubov, A. V., & Pavlov, N. S. (2013). Evaluation of the stability of supporting and deformation mine surveying and geodetic networks. *Marksheyderskiy vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 2(94), 21–23 [in Russian].
20. Zybov, A. V., & Bykasov, D. A. (2020). Obtaining parameters of connection between plane coordinate systems by newton's method of the second order. *Geodeziia, zemleustroistvo i kadastry: problemy i perspektivy*

razvitiia [Geodesy, Land Management and Cadastrics: Problems and Prospects of Development], 1, 58–62 [in Russian].

21. Kougia, V. A., & Kanashin, N. V. (2008). Determination by the gradient method of the elements of communication between three-dimensional coordinate systems. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2, 22–28 [in Russian].

22. Eliseeva, N. N., & Zubov, A. V. (2019). The application of search methods for solving optimization problems in geodesy. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources* (pp. 346–352). DOI 10.1201/9781003014577-43.

23. Rajaganapathy S., Melbourne J., & Salapaka, M. V. (2022). Change detection using an iterative algorithm with guarantees. *Automatica*, 136(1), P. 110075. DOI 10.1016/j.automatica.2021.110075.

24. Bryn, M. Ya., & Shevshenko, G. G. (2020). Designing a geodetic network through the search method based on the use of an undistorted model. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 81(12), 2–10. DOI 10.22389/0016-7126-2020-966-12-2-10 [in Russian].

25. Teunissen, P. J. G. (2017). Distributional theory for the DIA method. *Journal of Geodesy*, 92(2). DOI 10.1007/s00190-017-1045-7/.

26. Zaminpardaz, S., Teunissen, P. J. G., & Tiberius, C. C. J. M. A risk evaluation method for deformation monitoring systems. *Journal of Geodesy*, 94(3). DOI 10.1007/s00190-020-01356-w.

27. Duchnowski, R. (2013). Hodges–Lehmann estimates in deformation analyses // Duchnowski R. Hodges–Lehmann estimates in deformation analyses. *Journal of Geodesy*, 87(10-12). DOI 10.1007/s00190-013-0651-2.

28. Langbein, J. (2012). Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker–random-walk models. *Journal of Geodesy*, 86(9). DOI 10.1007/s00190-012-0556-5.

29. Prószyński, W. (2010). Another approach to reliability measures for systems with correlated observations. *Journal of Geodesy*, 84, 547–556. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0394-2>.

30. Zubov, A. V., Belyaev, V. V., & Evteeva, T. A. (2011). Ozenka kachestva modeley, postroennyh po method naimenshih kvadratov. *Marksheyderskiy vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 1(81), 39–42 [in Russian].

31. Rüdiger, L., & Lösler, M. (2017). Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria. *Journal of Applied Geodesy*, 11, 271–283.

32. Nowel, K. (2020). Specification of deformation congruence models using combinatorial iterative DIA testing procedure. *Journal of Geodesy*, 94(12), 1–23. DOI 10.1007/s00190-020-01446-9.

33. Ismael Érique Koch, Ivandro Klein, Luiz Gonzaga Jr, Marcelo Tomio Matsuoka, Vinicius Francisco Rofatto, & Mauricio Roberto Veronez. (2019). Robust Estimators in Geodetic Networks Based on a New Metaheuristic: Independent Vortices Search. *Sensors*, 19(20). DOI 10.3390/s19204535.

34. Wiśniewski, Z. (2022). Total Msplit estimation. *Journal of Geodesy*, 96(10), P. 82. DOI 10.1007/s00190-022-01668-z.

35. Yang, L., & Shen, Y. (2020). Robust M estimation for 3D correlated vector observations based on modified bifactor weight reduction model. *Journal of Geodesy*, 94(3). DOI 10.1007/s00190-020-01351-1.

36. Kornilov, Yu. N., & Tsareva, O. S. (2020). Perfecting the methods of monitoring the buildings and structures deformation. *Geodeziia i kartografiia [Geodesy and Cartography]*, 4, 9–18. DOI 10.22389/0016-7126-2020-958-4-9-18 [in Russian].

37. Chang, G., Xu, T., & Wang, Q. (2018). M-estimator for the 3D symmetric Helmert coordinate transformation. *Journal of Geodesy*, 92, 47–58. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1043-9>.

38. Nowel, K. (2018). Squared Msplit(q) S-transformation of control network deformations. *Journal of Geodesy*, 93(1). DOI 10.1007/s00190-018-1221-4.

39. Nowel, K., & Kamiński, W. (2014). Robust estimation of deformation from observation differences for free control networks. *Journal of Geodesy*, 88(8). DOI 10.1007/s00190-014-0719-7.

40. Hamza, V., Ambrožič, T., & Stopar, B. (2020). Deformation analysis: the Caspary approach. *Geodetski Vestnik*, 64(01), 68–88. DOI 10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.68-88.

Author details

Murat G. Mustafin –D. Sc., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy.

Gleb E. Vasiljev – Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy.

Received 13.04.2023

© M. G. Mustafin, G. E. Vasiljev, 2023