

На правах рукописи

Елисеева Надежда Николаевна



**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ И РАЗРАБОТКА
ПОИСКОВЫХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ
НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ
В ГЕОДЕЗИИ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Мустафин Мурат Газизович

Официальные оппоненты:

Волков Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра геодезии, землеустройства и кадастров, профессор;

Мазуров Борис Тимофеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 10 декабря 2020 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 9 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в геодезии происходят кардинальные изменения, как в методах измерений, так и в обработке получаемых данных. Повышение производительности измерительной и вычислительной техники не только послужили толчком для постановки сложных задач оптимизации в геодезии, но и дали возможности решать поставленные задачи по-новому, например, с помощью методов нелинейного программирования и, в частности, поисковыми методами.

В этих условиях математическая обработка геодезических измерений приобретает принципиально новые возможности, происходит постепенный переход от классических строгих методов к альтернативным методам математического программирования, эволюционного моделирования и т.п., что существенно расширяет возможности численного анализа процесса оптимизации. Данная тенденция обусловлена стремительным развитием компьютерной техники и программного обеспечения.

Поисковые методы как при самостоятельном использовании, так и в сочетании с традиционными подходами создают широкую математическую базу для классифицирования и оперативного выбора наиболее эффективного решения задач оптимизации, что предопределяет актуальность диссертационной работы.

Кроме того, разработка поисковых методов непосредственно связана с программными средствами, которые возможно интегрировать в различные компьютерные технологии моделирования. В этой связи настоящая разработка отвечает взятому курсу страны на импортозамещение и создание отечественных программных продуктов.

Степень разработанности темы исследования

Математическая обработка геодезических измерений является важнейшим аспектом во всех областях геодезии. Значительный вклад в развитие её теоретических основ внесли видные учёные-геодезисты: В.Д. Большаков, П.А. Гайдаев, В.Н. Ганьшин, В.Г. Зданович, А.А. Изотов, Ф.Н. Красовский, Н.Г. Келль, Л.Н. Келль, А.И. Мазмишвили, М.С. Молоденский, В.В. Попов, К.Л. Проворов, Н.А. Урмаев, А.С. Чеботарёв и другие; дальнейшее

развитие данной отрасли продолжили И.Т. Антипов, В.А. Бывшев, А.А. Визгин, М.Д. Герасименко, В.В. Голубев, А.В. Гордеев, Н.Д. Дроздов, Б.Н. Дьяков, Г.Н. Ефимов, И.Г. Журкин, Ю.В. Кемниц, С.А. Коробков, В.А. Коугия, Ю.В. Линник, Ю.И. Маркузе, М.М. Машимов, Г.А. Мещеряков, Ю.М. Нейман, В.К. Панкрушин, А.З. Сазонов, А.А. Соломонов, М.С. Урмаев, З.С. Хаимов, А.В. Хлебников, З.М. Юршанский, З. Адамчевский и другие.

Развитие методов математического программирования связано с именами следующих учёных: Дж.Б. Данциг, Р. Беллман, Л.В. Канторович, Дж. Фон Нейман, Д. Химмельблау и другие.

Вопросами теории оптимизации в геодезической практике и внедрением методов нелинейного программирования при математической обработке геодезических измерений занимались многие учёные-геодезисты, среди которых М.Я. Брынь, Н.Г. Видуев, А.В. Зубов, М.И. Коробочкин, Н.Т. Ковтун, В.А. Коугия, Б.Т. Мазуров, Г.В. Макаров, Ю.И. Маркузе, М.М. Машимов, В.И. Мицкевич, В.Г. Назаренко и другие.

Как правило, при решении задач оптимизации в геодезии применяют методы, основанные на вычислении производных. Поискные методы рассматриваются в контексте сравнения с другими методами при решении какой-либо конкретной задачи. На данный момент в геодезии существуют лишь единицы отработанных методик, выполненных в программном виде, в рамках которых стратегии поисковых методов адаптированы для решения геодезических задач. Возможности применения данных методов в геодезической практике рассмотрены в работах М.Я. Брыня, А.В. Зубова, М.И. Коробочкина, В.А. Коугия, Г.В. Макарова и В.И. Мицкевича.

Цель работы – повышение информативности, эффективности и оперативности процесса обработки геодезических измерений за счёт разработки и использования поисковых методов.

Идея работы состоит в численном анализе процесса оптимизации при решении различных геодезических задач, на основе которого осуществляется выбор алгоритмов, уточняющих и ускоряющих процесс оптимизационного поиска.

Задачи исследований:

1. Анализ методов обработки геодезических измерений и обоснование применения поисковых методов для решения оптимизационных геодезических задач.

2. Разработка оптимизационных поисковых методов, основанных на фундаментальных принципах: теории квадратичной аппроксимации целевой функции и эволюционных стратегиях.

3. Создание программных алгоритмов по реализации разработанных поисковых методов.

4. Проверка разработанных программных алгоритмов при решении прикладных геодезических задач.

Объект исследований – объекты геодезического мониторинга и результаты измерений.

Предмет исследований – процесс обработки измерений: поисковые методы оптимизации при решении геодезических задач, компьютерно-информационная технология обработки измерений на базе современного программного обеспечения.

Научная новизна работы:

1. Разработан программный алгоритм, реализующий метод парабол, который за счёт квадратичной аппроксимации целевой функции легко адаптируется для решения оптимизационных геодезических задач, эффективен и гарантированного даёт верные результаты при разных вариантах задания начальных значений параметров.

2. Разработан простой генетический алгоритм поисковой оптимизации, основанный на имитации эволюционного процесса (размножение, мутация, отбор).

3. Предложен программный комплекс, реализующий простой генетический алгоритм, позволяющий, в совокупности с методикой оценки качества оптимизируемых моделей (объектов, процессов, явлений и т.п.), построенных по методу наименьших квадратов, эффективно выделять и отбраковывать грубые ошибки измерений при обработке больших объёмов данных.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Предложены алгоритмы решения оптимизационных задач, совершенствующие аппарат математической обработки геодезических измерений поисковыми методами за счёт программной реализации

метода парабол, разработки простого генетического алгоритма, и рекомендовано их объединение в одну методику для повышения оперативности и эффективности оптимизационного процесса.

Разработаны методика и практические рекомендации по применению поисковых методов, создан программный комплекс по их реализации с обработкой результатов геодезических измерений применительно к определению кренов сооружений башенного типа.

Методология и методы исследования

Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, включающим научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области теории математической обработки геодезических измерений и теории оптимизации, разработку программных алгоритмов, реализующих поисковые методы в программной среде Visual Basic for Application, и проверку их работоспособности на практических примерах решения геодезических задач.

Положения, выносимые на защиту:

1. При обработке результатов геодезических измерений эффективно применение оптимизационного метода парабол с обоснованием шага разностной схемы, что позволяет резко сократить число итераций (до 1-2 итераций) для достижения минимума целевой функции даже при очень грубом задании начальных значений параметров.

2. Применение разработанного простого генетического алгоритма при нелинейной оптимизации геодезических измерений обеспечивает сходимость итерационного процесса для широкого спектра начальных значений параметров, что при сравнении с другими методами значительно упрощает процесс решения и повышает надёжность конечных результатов.

3. Применение простого генетического алгоритма в совокупности с оценкой качества оптимизируемых моделей (объектов, процессов, явлений и т.п.), построенных по методу наименьших квадратов, представляет собой эффективную методику быстрой отбраковки грубоошибочных измерений при обработке больших объёмов геодезических данных поисковыми методами.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием широко известных методов математического программирования и эволюционного моделирования. Адекватность методов, используемых в работе, подтверждается фундаментальными исследованиями по внедрению теории оптимизации для широкого круга производственных задач, применением современных и проверенных ведущими научно-исследовательскими организациями программного комплекса Mathcad и программной среды Visual Basic for Application, а также обсуждением основных результатов работы в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на всероссийских и международных конференциях: II Всероссийская научно-практическая конференция «Совершенствование средств и методов сбора, обработки геопро пространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования», (г. Тюмень, 2018 г.); XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); XV Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); Международная научно-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД-2019) (г. Кисловодск, 2019 г.); 62-ая Международная научная конференция на базе Горно-геологического университета им. И. Рылъски (г. София, Болгария, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

Практическая реализация

Результаты исследований, а также разработанный программный комплекс рекомендуется к применению при геодезическом мо-

ниторинге сооружений башенного типа в процессе строительства и эксплуатации в производственной деятельности ООО «Научно-производственное предприятие «Бента» и ЗАО «Геодезические приборы» (г. Санкт-Петербург).

Выводы и рекомендации диссертационной работы целесообразно использовать в учебном процессе по дисциплинам специальности «Прикладная геодезия».

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теории оптимизации и методам нелинейного программирования; анализе стратегий поисковых методов, их разработке и совершенствовании; составлении программ, реализующих методы поисковой оптимизации, для решения тестовых оптимизационных задач, и проведении экспериментальных исследований по их внедрению при решении геодезических задач; обобщении полученных экспериментальных результатов, анализе и обсуждении их с научным руководителем; составлении и оформлении публикаций; апробации основных положений работы.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 188 наименований, и 13 приложений. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка и 13 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность преподавателям и сотрудникам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета, а также лично научному руководителю, д.т.н. М.Г. Мустафину за значительную помощь на разных этапах выполнения работы.

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность к.т.н. А.В. Зубову за идеи, рекомендации, советы и важный вклад в диссертационную работу, а также ощутимую моральную поддержку в период её написания, и к.т.н. Ю.Н. Корнилову за полезные советы, критические замечания и редакторские правки.

Автор считает своим долгом выразить благодарность за неоценимый вклад в диссертацию д.т.н. Г.В. Макарова. Геннадий Васильевич являлся активным сторонником поисковых методов и одним из основоположников их использования при обработке геодезических данных. Диссертационная работа во многом является продолжением и развитием его идей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования; сформулированы цель, идея, задачи и научная новизна работы; определены объект и предмет исследований; раскрыты теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования; изложены положения, выносимые на защиту; приведены степень достоверности результатов исследования, их апробация и практическая реализация, а также личный вклад соискателя, данные о публикациях, структура работы и благодарности.

В первой главе представлены основные положения теории оптимизации. Рассмотрены существующие оптимизационные задачи в геодезии и методы математического программирования (линейного, нелинейного, дискретного, динамического и стохастического) для их решения. Показан спектр применения методов нелинейного программирования в различных областях геодезии, а также перспективы их дальнейшего использования.

В геодезии встречается огромное количество задач оптимизации. Самые сложные относятся к области космической и высшей

геодезии: оптимизация орбит спутниковых систем и траекторий космических аппаратов; уточнение геопотенциала Земли, определение параметров связи двух систем координат и т.п. В фотограмметрии оптимизация имеет место при трансформировании снимков и определении элементов их ориентирования, при построении фотограмметрических сетей, создании и обработке цифровых моделей рельефа (ЦМР) и т.п. В прикладной геодезии: выверка различных конструкций, юстировка и выставление в проектное положение элементов радиотелескопа, обработка результатов обмерных работ при лазерном сканировании, определение соосностей цилиндрических (конических) объектов и т.п. Один из самых распространённых примеров оптимизационных задач в геодезии – это уравнивание различных геодезических сетей.

Как правило, при решении задач оптимизации в геодезии применяют методы, основанные на вычислении производных. Наиболее часто поисковые методы рассматриваются в контексте сравнения с другими методами. На данный момент в геодезии существуют лишь единицы отработанных методик, в которых поисковые методы адаптированы для решения геодезических задач.

Во второй главе приведены основные сведения для постановки задач оптимизации при использовании поисковых методов, описаны наиболее распространённые поисковые методы и приведена их условная классификация с точки зрения схожести стратегии поиска, также рассмотрено сравнение поисковых методов с классическими строгими методами уравнивания.

Раскрыты предпосылки развития методов нелинейного программирования и взаимосвязь компьютерных технологий и геодезии, тем самым обоснована необходимость развития и актуальность применения поисковых методов в геодезии.

На основе теоретических исследований поисковых методов для дальнейшей работы выбраны две стратегии в силу их преимуществ и наличия потенциала с точки зрения повышения быстродействия оптимизационного процесса: стратегия квадратичной аппроксимации (а именно метод парабол) и генетические алгоритмы случайного поиска (простой генетический алгоритм).

В третьей главе изложен принцип решения задач оптимизации методами квадратичной аппроксимации, приведены исследования точности вычислений методом парабол, проведено сравнение с методом Ньютона вторых производных.

На основе теоретических и практических исследований разработан программный алгоритм, реализующий метод парабол в общем виде, и приведены результаты решения трёх тестовых оптимизационных геодезических задач (аппроксимация результатов обмеров окружностью, комбинированная засечка и многократная линейная засечка) при разных вариантах задания начальных значений параметров с целью проверки работоспособности и определения путей повышения эффективности рассматриваемого оптимизационного метода.

В четвёртой главе рассмотрен простой генетический алгоритм при решении оптимизационных геодезических задач, а также определены пути уменьшения эвристического влияния на конечные результаты для дальнейшего совершенствования данного метода.

На основе стратегии простого генетического алгоритма разработан программный алгоритм, который проверен при решении трёх тестовых оптимизационных геодезических задач при разных вариантах задания начальных значений параметров.

В пятой главе описан автоматизированный программный комплекс для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования (НЛС). Программный комплекс является результатом практической реализации теоретических разработок о возможностях применения поисковых методов (а именно простого генетического алгоритма) при решении оптимизационных задач в геодезической практике. Разработанный комплекс позволяет значительно ускорить процесс камеральной обработки при определении крена.

В заключении изложены основные результаты и выводы, полученные в ходе исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. При обработке результатов геодезических измерений эффективно применение оптимизационного метода парабол с

обоснованием шага разностной схемы, что позволяет резко сократить число итераций (до 1-2 итераций) для достижения минимума целевой функции даже при очень грубом задании начальных значений параметров.

Метод парабол является одним из методов полиномиальной аппроксимации, основная идея которых состоит в том, что для целевой функции строится аппроксимирующий многочлен, и его точка минимума служит приближением к истинному (оптимальному) значению искомого параметра. Данные методы основываются на теореме Вейерштрасса об аппроксимации. В методе парабол применяется полином второго порядка. Рассмотрим принцип решения задач оптимизации данным методом на примере аппроксимации результатов обмеров окружностью. Целевая функция метода наименьших квадратов для данной задачи имеет вид (1):

$$f(X, Y, R) = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2} - R \right]^2 = \min, \quad (1)$$

где X и Y – координаты центра окружности; R – радиус окружности; x_i и y_i – плановые координаты точек, измеренных на окружности. Требуется найти такие значения параметров X , Y и R , при которых целевая функция примет наименьшее значение.

Зададим начальное значение параметра X_0 и шаг k изменения этого параметра. Аргументы Y и R пока остаются неизменными. Вычислим три значения целевой функции $f_{-1} = f(X_{-1}, Y, R)$, $f_0 = f(X_0, Y, R)$, $f_{+1} = f(X_{+1}, Y, R)$ в соседних точках для аргументов $X_{-1} = X_0 - k$, X_0 и $X_{+1} = X_0 + k$. Построим аппроксимирующую параболу по трём точкам (рисунок 1).

Вычисление оптимального значения параметра X_{opt} (2) производится с помощью «глобального» шага h (3):

$$X_0 + h = X_{opt}; \quad (2)$$

$$h = \frac{k \cdot (f_{-1} - f_{+1})}{2 \cdot (f_{-1} - 2 \cdot f_0 + f_{+1})}. \quad (3)$$

На рисунке 2 представлена схема аппроксимации целевой функции с помощью «глобального» шага по одному параметру.

Затем последовательно выполняется аппроксимация целевой функции по параметру Y (при неизменных параметрах X_{opt} и R) и по параметру R (при неизменных параметрах X_{opt} и Y_{opt}). Таким образом, первое приближение целевой функции к минимальному значению осуществляется путём последовательного уточнения каждого параметра.

На основе исследований точности вычислений методом парабол установлено, что в начале итерационного процесса, когда значения определяемых параметров далеки от истинных, шаг изменения этих параметров должен быть большим. Как правило, по методу парабол достаточно одного приближения для попадания в область минимума целевой функции. Следовательно, на каждой последующей итерации шаг k необходимо уменьшать, чтобы не произошло закливания в области минимума.

Работоспособность метода парабол проверена при решении трёх тестовых оптимизационных геодезических задач. В таблицах 1-3 приведены результаты решения тестовых задач при разных вариантах задания начальных значений параметров. Из представленных расчётов видно, что если начальные значения параметров заданы грубо, то за первое приближение удаётся значительно приблизиться к искомым значениям параметров (сократить разницу между начальными и оптимальными значениями параметров более, чем в два раза). Если начальные значения параметров заданы довольно точно, то требуется всего несколько приближений для получения искомого параметров. Данный метод гарантированно находит решение за малое количество итераций, а также безошибочно определяет направление минимизации целевой функции. Программная реализация метода парабол показала, что его легко можно адаптировать для решения многомерных задач оптимизации. Полученные результаты свидетельствуют, что метод парабол эффективен и даёт верные результаты. Это подтверждено сравнением с результатами, полученными в программе Mathcad.

2. Применение разработанного простого генетического алгоритма при нелинейной оптимизации геодезических измерений обеспечивает сходимость итерационного процесса для широкого спектра начальных значений параметров, что при сравнении с другими методами значительно упрощает процесс решения и повышает надёжность конечных результатов.

Отличительной особенностью генетических алгоритмов является использование оператора «скрещивания», благодаря которому выполняется рекомбинация решений. Несмотря на это, среди данных алгоритмов имеют место те, которые действуют по самому простому сценарию естественного отбора – при бесполом размножении, т.е. без скрещивания. Простой генетический алгоритм относится к эволюционным стратегиям поисковой оптимизации. Данный алгоритм – это примитивное воплощение процесса эволюции. Он является самым близким аналогом поисковых методов математического программирования, а именно метода случайного поиска.

Рассмотрим простой генетический алгоритм при его программной реализации (рисунок 3). Имеем целевую функцию $f(x_1, x_2 \dots x_m)$, которая зависит от m параметров. Вычисляется значение целевой функции при начальных значениях параметров $f^0(x_1, x_2 \dots x_m)$ – это особь нулевого поколения. Далее формируется первое поколение $f_1^I, f_2^I, f_3^I \dots f_n^I$. Количество особей n может быть задано заранее или формироваться случайным образом. В новом поколении каждая особь имеет свой уникальный генотип, благодаря следующим действиям: случайному изменению параметров на некоторый заданный шаг k и случайной мутации параметров u . Как правило, в качестве мутации используется добавление достаточно малой равномерно или нормально распределённой случайной величины к каждому параметру целевой функции. Экспериментальным путём установлено, что величина шага k должна постепенно уменьшаться. Предложен следующий вариант подобного уменьшения: изменение величины шага параметров целевой функции осуществляется по логарифмическому закону, а последние t итераций с постоянной малой величиной шага.

Мутации могут быть и полезные, и вредные. Из первого поколения выбирается особь с наилучшим генотипом, т.е. целевая функция с минимальным значением, все остальные целевые функции бракуются (отсеиваются). Лучшая особь становится родителем для следующего поколения. Описанный эволюционный процесс (размножение, мутации, отбор) выполняется от поколения к поколению до достижения минимума целевой функции f_{\min} .

В таблицах 4-6 приведены результаты решения тестовых задач данным методом при разных вариантах задания начальных значений параметров. Полученные результаты показали, что простой генетический алгоритм не менее эффективен, чем метод парабол, и даёт верные результаты за конечное количество итераций. Преимуществом простого генетического алгоритма является простота, также стоит отметить его надёжность и сходимость, несмотря на то, что алгоритм является эвристическим.

На основе первого и второго защищаемых положений следует рекомендация для дальнейшего совершенствования аппарата математической обработки геодезических измерений поисковыми методами – объединение метода парабол и простого генетического алгоритма в одну методику, состоящую из двух этапов. На первом – методом парабол за 1-2 итерации попасть в область минимума целевой функции. На втором – простым генетическим алгоритмом найти оптимальное решение. Таким образом, используются только преимущества данных методов, а так как простой генетический алгоритм начинает работать уже в области минимума целевой функции, т.е. в непосредственной близости от оптимального решения, то устраняется его эвристический характер.

3. Применение простого генетического алгоритма в совокупности с оценкой качества оптимизируемых моделей (объектов, процессов, явлений и т.п.), построенных по методу наименьших квадратов, представляет собой эффективную методику быстрой отбраковки грубоошибочных измерений при обработке больших объёмов геодезических данных поисковыми методами.

Особенностью поисковых методов является то, что решение будет найдено, даже если исходные данные содержат грубые ошиб-

ки. В этом случае оптимальные значения параметров будут далёкими от истинных, следовательно, минимальное значение целевой функции будет значительно отличаться от нуля. Поэтому при использовании поисковых методов нужно обязательно выполнять либо отбраковку грубоошибочных измерений ещё до процесса оптимизации, либо на каждой итерации в процессе оптимизации.

Предложена методика отбраковки, которая базируется на оценке качества оптимизируемых моделей, построенных по методу наименьших квадратов. Рассмотрим её на примере аппроксимации окружностью. Данная методика основана на двух критериях. Во-первых, выполняется обобщённый χ^2 – контроль, который позволяет оценить качество построенной модели в целом (критерий Пирсона), он указывает на наличие в исходных данных грубых искажений (4):

$$[v] \leq \mu_0^2 \cdot \chi^2, \quad (4)$$

где v – отклонения от окружности; μ_0 – априорная (предполагаемая) средняя квадратическая погрешность положения каждой точки; χ^2 – квантиль распределения Пирсона.

Во-вторых, проверяется отклонение v_i каждой точки от построенной окружности, т.е. не превышает ли экстремальная величина предельно допустимого значения (критерий Граббса-Смирнова) (5):

$$v_i \leq \eta \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{\frac{r}{n}} = \eta \cdot \mu_0 \cdot \sqrt{\frac{n-3}{n}}, \quad (5)$$

где η – критическая величина распределения экстремального значения; r – количество избыточных для построения окружности точек; n – общее количество точек в окружности.

Критические значения обоих критериев χ^2 и η аппроксимированы для доверительной вероятности 0.95 и легко находятся для любого количества точек n . Если хотя бы один из указанных критериев не выполняется, то программа находит точку с максимальным отклонением от построенной модели, удаляет её и перестраивает

модель. Данная методика была проверена в совокупности с работой простого генетического алгоритма при аппроксимации окружностью сечений дымовых труб, полученных наземным лазерным сканированием. Были просчитаны тестовые примеры с антенной (антеннами), лестницами, пролетевшей птицей. На рисунке 4 показаны сечения до и после процесса отбраковки.

Встречались тестовые варианты, с которыми алгоритм отбраковки не справлялся. Чрезмерное загромождение сечения скана лишними элементами не позволяло эффективно распознать те точки, которые следует отбраковать. Например, если на скан попала часть соседнего здания (рисунок 5), то следует удалить такие точки до процесса оптимизации, т.е. при предварительной «чистке» скана. Примеры различных конструктивных деталей дымовых труб представлены на рисунке 6.

Представленная методика применена в автоматизированном программном комплексе для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования. Использование простого генетического алгоритма в комплексном решении прикладной геодезической задачи показало его практическую значимость. А его применение в совокупности с предложенной оценкой качества моделей, построенных по методу наименьших квадратов, представляет собой эффективную методику быстрой отбраковки грубошибочных измерений при обработке больших объёмов данных поисковыми методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – программной реализации математических алгоритмов поисковых методов с повышением их эффективности и быстродействия. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Дано обоснование целесообразности развития и использования в геодезической практике методов поисковой оптимизации. Показана на конкретных примерах эффективность их применения для обработки результатов геодезических измерений.

2. Разработан программный алгоритм, реализующий метод парабол, который за счёт квадратичной аппроксимации целевой функции легко адаптируется для решения оптимизационных геодезических задач, эффективен и гарантированно даёт верные результаты при различных вариантах задания начальных значений параметров.

3. Разработан простой генетический алгоритм поисковой оптимизации, основанный на имитации эволюционного процесса (размножение, мутации, отбор), позволяющий упростить процесс оптимизации по сравнению с другими поисковыми методами как с точки зрения его программной реализации, так и с точки зрения пользователя, за счёт упрощённого математического алгоритма решения.

4. Предложен программный комплекс, реализующий простой генетический алгоритм, позволяющий в совокупности с методикой оценки качества оптимизируемых моделей (объектов, процессов, явлений и т.п.), построенных по методу наименьших квадратов, эффективно выделять и отбраковывать грубые ошибки измерений при обработке больших объёмов данных.

5. Эффективность предложенных поисковых методов (метода парабол и простого генетического алгоритма) подтверждена при решении тестовых оптимизационных геодезических задач при разных вариантах задания начальных значений параметров.

6. Разработан автоматизированный программный комплекс для решения прикладной геодезической оптимизационной задачи (определение кренов дымовых труб по данным наземного лазерного сканирования) с применением поисковой стратегии простого генетического алгоритма. Данный комплекс представляет собой готовую технологию и позволяет значительно ускорить процесс камеральной обработки при определении крена.

7. Перспективы исследований состоят в расширении спектра поисковых методов и их адаптации для более широкого применения в геодезической практике.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Зубов, А.В. Решение маркшейдерско-геодезических задач поисковыми методами / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева** // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №5 (120). – С. 35-38. – ISSN 2073-0098.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

2. Eliseeva, N.N. The application of search methods for solving optimization problems / **N.N. Eliseeva**, A.V. Zubov // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – CRC Press. – 2019. – Vol. 1. – Pp. 346-352. DOI: 10.1201/9781003014577-43.

3. Eliseeva, N.N. Application of an evolutionary algorithm to a software suite for determining degrees of tilt in cylindrical structures based on terrestrial laser scanning data / **N.N. Eliseeva**, A.V. Zubov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 698. – №1. – Pp. 1-7. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044013.

Публикации в прочих изданиях:

4. Зубов, А.В. Применение метода оптимизационной параболы для решения нелинейных маркшейдерско-геодезических задач / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева** // Маркшейдерский вестник. – 2019. – №1 (128). – С. 24-27. – ISSN 2073-0098.

5. Зубов, А.В. Применение поисковых методов при решении оптимизационных нелинейных инженерно-геодезических задач / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева** // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2018. – С. 372-377.

6. Елисеева, Н.Н. Применение поисковых методов при решении нелинейных оптимизационных задач / **Н.Н. Елисеева** // Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, посвящённой 25-летию Конституции Республики Беларусь «Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов». – Минск: БНТУ. – 2019. – С. 364-369.

7. Елисеева, Н.Н. Применение метода поиска при решении оптимизационных задач в геодезии / **Н.Н. Елисеева** // Сборник тезисов докладов XVII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля. СПб.: СПбГУ. – 2019. – С. 160.

8. Зубов, А.В. Определение кренов строительных сооружений башенного типа путём аппроксимации результатов обмеров окружностью / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева** // Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования». – Тюмень: Тюменский индустриальный университет. – 2019. – С. 145-149.

9. Зубов, А.В. Применение методов поисковой оптимизации в геодезической практике / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева** // Труды Международной научно-практической конференции «Современные проблемы инженерной геодезии». – СПб.: ПГУПС. – 2019. – С. 31-35.

10. Eliseeva, N.N. The application of search methods for solving optimization problems in geodesy / **N.N. Eliseeva**, A.V. Zubov // Journal of Mining and Geological Sciences. 62nd International Scientific Conference. – 2019. – Vol. 62. – №3. – Pp. 82-85.

11. Eliseeva, N.N. The application of search methods for solving optimization problems in geodesy / **N.N. Eliseeva**, A.V. Zubov // Scientific conference abstracts. The XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019». – 2019. – P. 238.

Свидетельство:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666740 Российская Федерация. Определение кренов сооружений башенного типа / А.В. Зубов, **Н.Н. Елисеева**; заявитель и правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – № 2019665987; заявл. 05.12.19; зарегистрир. 13.12.2019; опубл. 13.12.2019, Бюл. №12. – 1 с.

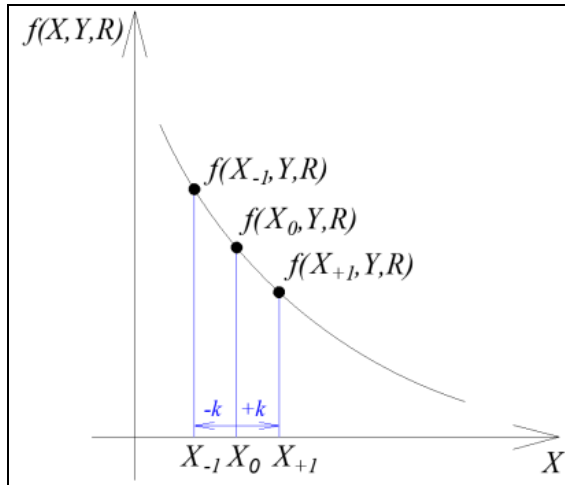


Рисунок 1 – Фрагмент аппроксимирующей параболы для параметра X

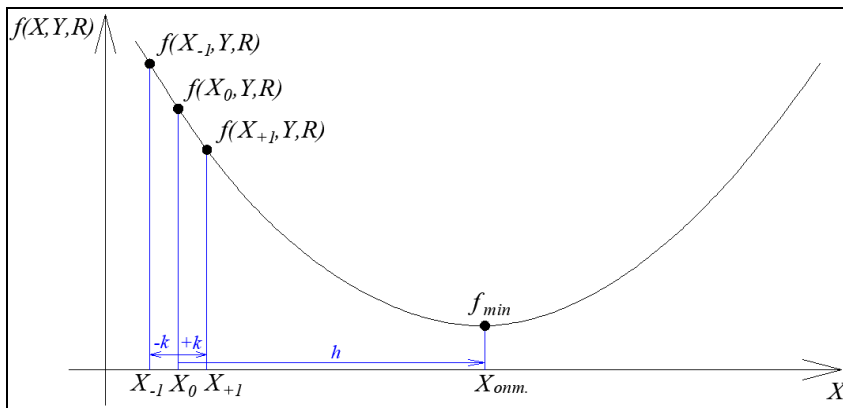


Рисунок 2 – Упрощённая схема аппроксимации целевой функции по параметру X методом парабол

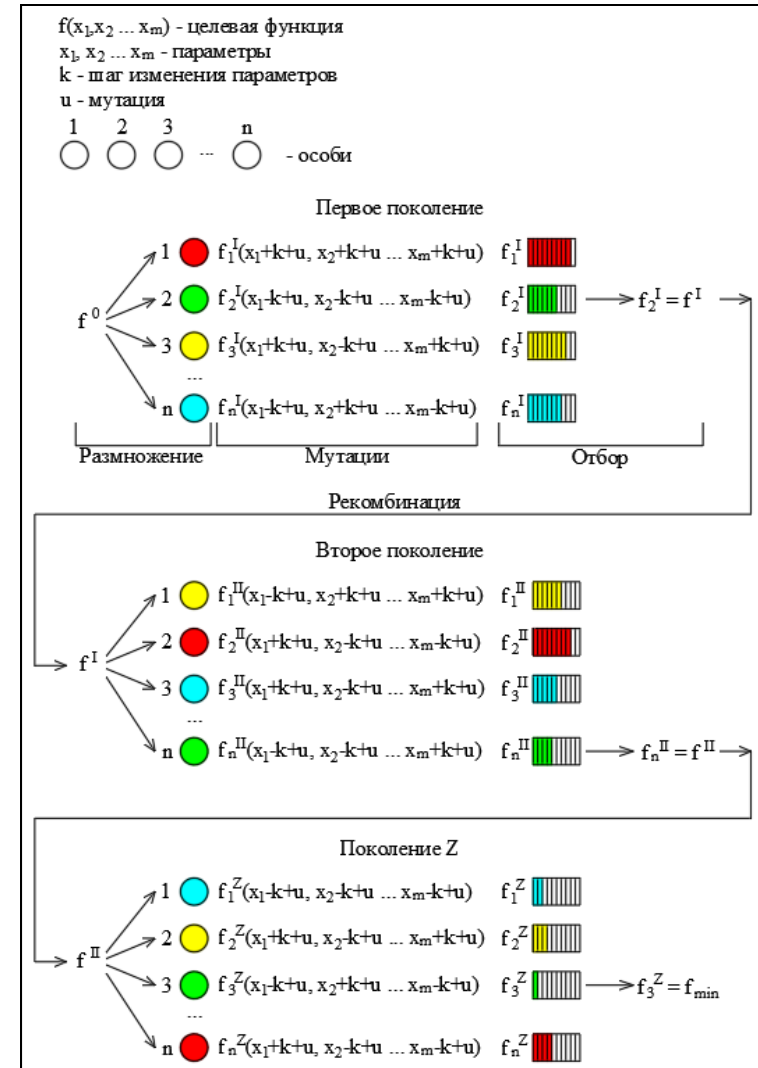


Рисунок 3 – Визуализация простого генетического алгоритма

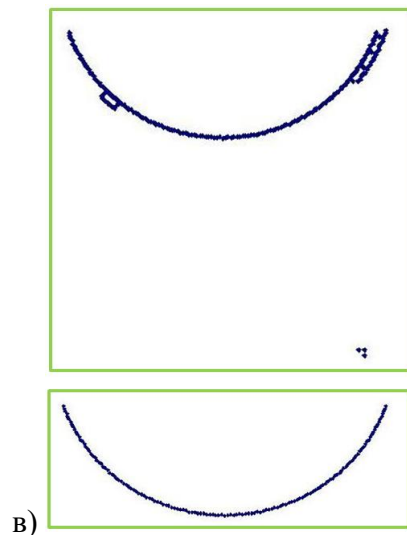
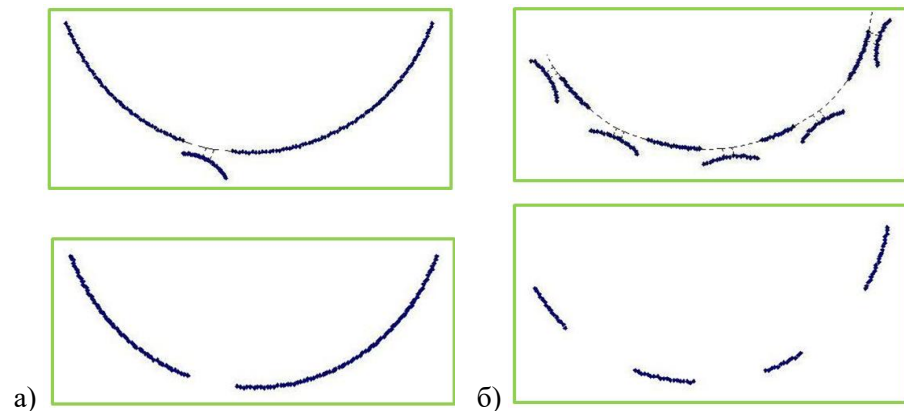


Рисунок 4 – Примеры сечений до и после отбраковки:
 а) с одной антенной; б) с несколькими антеннами;
 в) с лестницами и птицей

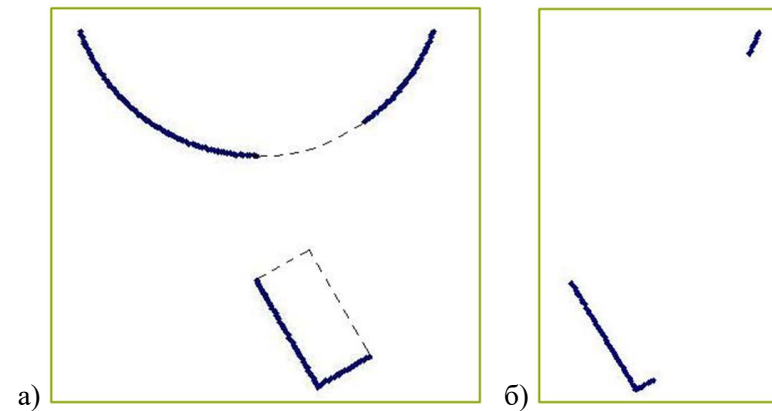


Рисунок 5 – Пример сечения с частью соседнего здания:
 а) до отбраковки; б) после отбраковки



Рисунок 6 – Примеры различных конструктивных деталей
 дымовых труб

Таблица 1 – Результаты решения задачи аппроксимации результатов обмеров окружностью методом парабол при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f_0	Значения параметров после первой итерации	Значение целевой функции после первой итерации	Кол-во итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 15.000 \text{ м}$ $Y = 15.000 \text{ м}$ $R = 2.000 \text{ м}$	1571	$X = 10.802 \text{ м}$ $Y = 11.896 \text{ м}$ $R = 2.178 \text{ м}$	36.14	31	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.07003
$X = 9.000 \text{ м}$ $Y = 9.000 \text{ м}$ $R = 1.500 \text{ м}$	31.59	$X = 9.409 \text{ м}$ $Y = 9.985 \text{ м}$ $R = 1.179 \text{ м}$	27.52	23	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.05699
$X = 10.000 \text{ м}$ $Y = 10.000 \text{ м}$ $R = 1.000 \text{ м}$	0.6187	$X = 10.031 \text{ м}$ $Y = 10.080 \text{ м}$ $R = 1.078 \text{ м}$	0.2269	4	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.03432

Таблица 2 – Результаты решения комбинированной засечки методом парабол при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f_0	Значения параметров после первой итерации	Значение целевой функции после первой итерации	Кол-во итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 139\,000.00 \text{ м}$ $Y = 156\,000.00 \text{ м}$	7463974	$X = 139\,473.33 \text{ м}$ $Y = 157\,042.74 \text{ м}$	3119737	49	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.7845
$X = 140\,000.00 \text{ м}$ $Y = 157\,000.00 \text{ м}$	19936	$X = 140\,217.50 \text{ м}$ $Y = 157\,097.18 \text{ м}$	7427	38	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.5933
$X = 140\,350.00 \text{ м}$ $Y = 157\,135.00 \text{ м}$	0.4162	$X = 140\,354.54 \text{ м}$ $Y = 157\,139.29 \text{ м}$	0.2963	22	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.2852

Таблица 3 – Результаты решения многократной линейной засечки методом парабол при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f_0	Значения параметров после первой итерации	Значение целевой функции после первой итерации	Кол-во итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 0.000 \text{ м}$ $Y = 0.000 \text{ м}$	16288238	$X = 1\,636.909 \text{ м}$ $Y = 1157.597 \text{ м}$	6808040	52	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.8967
$X = 2\,000.000 \text{ м}$ $Y = 2\,000.000 \text{ м}$	43506	$X = 2\,117.489 \text{ м}$ $Y = 2\,097.180 \text{ м}$	16208	47	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.6247
$X = 2\,100.000 \text{ м}$ $Y = 2\,100.000 \text{ м}$	0.9082	$X = 2\,100.190 \text{ м}$ $Y = 2\,100.344 \text{ м}$	0.6467	16	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.6223

Таблица 4 – Результаты решения задачи аппроксимации результатов обмеров окружностью простым генетическим алгоритмом при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f^0	Количество итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 15.000 \text{ м}$ $Y = 15.000 \text{ м}$ $R = 2.000 \text{ м}$	1571	500	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.0004091
$X = 9.000 \text{ м}$ $Y = 9.000 \text{ м}$ $R = 1.500 \text{ м}$	31.59	500	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.0003617
$X = 10.000 \text{ м}$ $Y = 10.000 \text{ м}$ $R = 1.000 \text{ м}$	0.6187	500	$X = 10.032 \text{ м}$ $Y = 10.089 \text{ м}$ $R = 1.079 \text{ м}$	0.0003382

Таблица 5 – Результаты решения комбинированной засечки простым генетическим алгоритмом при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f^0	Количество итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 139\,000.00 \text{ м}$ $Y = 156\,000.00 \text{ м}$	7463974	500	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.01318
$X = 140\,000.00 \text{ м}$ $Y = 157\,000.00 \text{ м}$	19936	500	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.01345
$X = 140\,350.00 \text{ м}$ $Y = 157\,135.00 \text{ м}$	0.4162	500	$X = 140\,354.63 \text{ м}$ $Y = 157\,139.37 \text{ м}$	0.002841

Таблица 6 – Результаты решения многократной линейной засечки простым генетическим алгоритмом при разных вариантах задания начальных значений параметров

Начальные значения параметров	Начальное значение целевой функции f^0	Количество итераций	Конечные значения параметров	Минимальное значение целевой функции f_{\min}
$X = 0.000 \text{ м}$ $Y = 0.000 \text{ м}$	16288238	500	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.002502
$X = 2\,000.000 \text{ м}$ $Y = 2\,000.000 \text{ м}$	43506	500	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.002491
$X = 2\,100.000 \text{ м}$ $Y = 2\,100.000 \text{ м}$	0.9082	500	$X = 2\,100.145 \text{ м}$ $Y = 2\,100.350 \text{ м}$	0.001334