

В. Ю. Наумов¹✉

Система автоматизированного проектирования для сетей геодезического мониторинга с использованием технологии виртуальной реальности

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: valentin.naumov@list.ru

Аннотация. Проектирование сетей геодезического мониторинга представляет собой комплексную задачу, требующую одновременного учета нормативных требований, геометрических факторов, технических характеристик средств измерений и внешних условий для достижения необходимой точности. Традиционные методы не позволяют осуществлять априорную количественную оценку видимости, геометрической устойчивости сети и ее метрологических характеристик, что ведет к субъективным и неоптимальным проектным решениям. В качестве решения разработана система, основанная на интеграции технологий виртуальной реальности и генетического алгоритма. Данный подход позволяет перенести процесс проектирования в цифровую среду, где выполняется автоматическая оптимизация конфигурации сети и строгий расчет ее точности до начала полевых работ.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, проектирование сетей, виртуальная реальность, генетический алгоритм, автоматизированное проектирование

V. U. Naumov¹✉

Computer-aided design system for geodetic monitoring networks using virtual reality technology

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: valentin.naumov@list.ru

Annotation. The design of geodetic monitoring networks is a complex task that requires simultaneous consideration of regulatory requirements, geometric factors, technical characteristics of measuring instruments and external conditions to achieve the required accuracy. Traditional methods do not allow for a priori quantitative assessment of the visibility, geometric stability of the network and its metrological characteristics, which leads to subjective and suboptimal design decisions. As a solution, a system based on the integration of virtual reality technologies and a genetic algorithm has been developed. This approach allows us to transfer the design process to a digital environment, where automatic optimization of the network configuration and strict calculation of its accuracy are performed before the start of field work.

Keywords: geodetic monitoring, network design, virtual reality, genetic algorithm, optimization, automated designing

Введение

Проектирование сетей геодезического мониторинга – это сложная задача, требующая одновременного учета нормативных требований, геометрии объекта

и характеристик оборудования. Традиционные методы не обеспечивают объективной априорной оценки точности и ведут к субъективным, неоптимальным решениям. В данной работе предлагается новый подход на основе интеграции технологий виртуальной реальности и генетического алгоритма в единую систему автоматизированного проектирования, позволяющую перенести процесс в цифровую среду, выполнить автоматическую оптимизацию конфигурации и строго рассчитать ее точность до начала полевых работ.

Методы и материалы

Для автоматизации процесса проектирования сетей геодезического мониторинга была разработана система, основанная на интеграции нескольких технологических и вычислительных методов. В качестве базовой платформы использована среда разработки Unity, которая обеспечила создание интерактивного цифрового двойника объекта мониторинга с реалистичной физикой и геометрией. Трехмерные модели зданий импортировались в форматах FBX и obj, после чего в виртуальной среде размещались геодезические марки, соответствующие реальным точкам контроля деформаций.

Ключевым компонентом системы является генетический алгоритм [1], реализованный на языке C для оптимизации размещения тахеометров. Алгоритм оперирует популяцией потенциальных конфигураций сети, каждая из которых представляет собой набор индексов, соответствующих допустимым позициям станций. Функция приспособленности оценивает качество конфигурации по комплексному критерию, включающему процент покрытия видимых марок, общее количество станций, степень связности сети между приборами и оценку качества геометрических фигур, образуемых станциями. Механизм эволюции включает этапы турнирной селекции, одноточечного скрещивания и трех типов мутаций – добавления, удаления или замены станции в конфигурации.

Для пространственного анализа и проверки условий измерений в системе реализован алгоритм трассировки лучей – raycasting [2; 4], который определяет наличие прямой видимости между предполагаемым положением тахеометра и каждой маркой, а также между различными станциями. При этом учитывается высота установки прибора и наличие физических препятствий, таких как элементы конструкций здания. На основе успешных лучей визирования автоматически генерируется синтетический набор геодезических наблюдений – горизонтальных направлений и наклонных расстояний, с добавлением случайной погрешности, соответствующей паспортной точности моделируемого измерительного прибора.

Для строгой метрологической оценки проектного решения полученная конфигурация сети и синтезированный массив наблюдений экспортируются в формате XML, соответствующем схеме данных открытого программного обеспечения GNU Gama [3]. Данный программный комплекс выполняет уравнивание созданной сети методом наименьших квадратов, в результате чего рассчитываются ключевые показатели: апостериорная средняя квадратическая ошибка единицы веса, ковариационная матрица поправок координат, а также средние квадрати-

ческие ошибки положения каждой марки. На основе этих данных система автоматически формирует итоговый отчет (рис.1), содержащий количественную оценку точности и надежности предложенной конфигурации. Параллельно, для наглядного представления, в интерфейсе виртуальной среды генерируется графическая схема построенной сети с визуализацией станций, марок и линий визирования. Полученные количественные показатели импортируются обратно в систему (рис. 5.), где служат основой для сравнительного анализа и селекции различных вариантов размещения измерительного оборудования, сгенерированных в процессе работы генетического алгоритма.

GNU Gama

General parameters of the adjustment

Coordinates	xyz	xy	z
Adjusted	0	4	0
Constrained *	0	0	0
Fixed	0	2	0
Total	0	6	0

Number of directions 10 Number of bearings 2
 Number of distances 10
 Total of observations 20

Number of project equations 20 Number of unknowns 10
 Degrees of freedom 10 Network defect 0

m0 apriori 1.00
 m0" apriori 0.25 [pvv] 6.04413e-01

During statistical analysis we work
 - with apriori standard deviation 1.00
 - with confidence level 95 %

Ratio m0" apriori / m0 apriori: 0.246
 95 % interval does not contain value m0"/m0 (0.570, 1.431)
 m0"/m0 (distances): 0.248
 m0"/m0 (directions): 0.238
 Confidence coefficient: 1.960

Maximal normalized residual 0.57 does not exceed critical value 1.96
 on significance level 5 % for observation #15
 <direction from="T2" to="G2" val=" 357-44-27.7000" stdev="5.0" />

Points

Fixed points

point	x	y
T1	0.00000	0.00000
T2	-16.45300	12.46900

Observations

Adjusted observations

i	standpoint	target	observed value	adjusted [m/d]	std.dev [mm/ss]	confi.
1	T1	T2 dir.	307-10-21.39	307-10-20.28	3.9	7.7
2		T2 dist.	20.64500	20.64406	0.0	0.0
3		G1 dir.	322-25-04.36	322-25-04.44	3.8	7.4
4		G1 dist.	59.20100	59.20060	3.4	6.7
5		G2 dir.	328-52-34.94	328-52-36.02	4.6	9.1
6		G2 dist.	33.03300	33.03113	1.7	3.3
7		G3 dir.	32-53-15.25	32-53-15.32	5.0	9.8
8		G3 dist.	8.42800	8.42656	0.7	1.3
9		G4 dir.	114-20-47.09	114-20-46.98	4.6	9.1
10		G4 dist.	24.08100	24.08162	3.4	6.8
11	T2	T1 dir.	127-10-21.41	127-10-21.97	3.9	7.6
12		T1 dist.	20.64500	20.64406	0.0	0.0
13		G1 dir.	330-17-10.41	330-17-10.35	4.5	8.8
14		G1 dist.	39.65600	39.65636	3.5	6.8
15		G2 dir.	357-44-27.70	357-44-27.18	4.9	9.6
16		G2 dist.	15.81700	15.81539	1.9	3.7
17		G3 dir.	104-23-52.42	104-23-52.22	5.0	9.7
18		G3 dist.	21.70800	21.70692	0.3	0.6
19		G4 dir.	120-15-53.28	120-15-53.50	3.7	7.2
20		G4 dist.	44.44800	44.44748	3.4	6.7

Residuals and analysis of observations

i	standpoint	target	f[%]	v [mm/ss]	v'	e-obs e-adj [mm/ss]
1	T1	T2 dir.	21.4	-1.107	0.4	-2.9 -1.8
2		T2 dist.	100.0	-0.941	0.2	-0.9 0.0
3		G1 dir.	24.0	0.077	0.0	0.2 0.1
4		G1 dist.	31.2	-0.402	0.1	-0.8 -0.4
5		G2 dir.	7.5	1.076	0.6	7.4 6.4
6		G2 dist.	65.9	-1.867	0.4	-2.1 -0.2
7		G3 dir.	0.1 w	0.066	0.3	
8		G3 dist.	86.2	-1.436	0.3	-1.5 -0.0
9		G4 dir.	7.0	-0.112	0.1	-0.8 -0.7
10		G4 dist.	31.1	0.624	0.2	1.2 0.6
11	T2	T1 dir.	22.2	0.559	0.2	1.4 0.9
12		T1 dist.	100.0	-0.941	0.2	-0.9 0.0
13		G1 dir.	10.0	-0.062	0.0	-0.3 -0.3
14		G1 dist.	30.9	0.361	0.1	0.7 0.3
15		G2 dir.	1.7 w	-0.520	0.6 m	
16		G2 dist.	62.5	-1.609	0.3	-1.9 -0.3
17		G3 dir.	0.7 w	-0.197	0.3	
18		G3 dist.	93.6	-1.081	0.2	-1.1 -0.0
19		G4 dir.	26.5	0.220	0.1	0.5 0.3
20		G4 dist.	31.3	-0.521	0.1	-1.0 -0.5

Рис. 1. Результаты уравнивания геодезической сети

Результаты

В результате проведенного исследования была разработана программная система, реализующая полный цикл автоматизированного проектирования сетей геодезического мониторинга. Система предоставляет комплексный инструментарий, объединяющий два взаимодополняющих подхода.

Первый подход – интерактивное проектирование в среде виртуальной реальности (рис. 4), позволяющее инженеру вручную размещать тахеометры и марки на трехмерной модели объекта. Система выполняет динамический анализ: для каждой станции определяет видимые марки, визуализирует линии визирования и проверяет взаимную видимость между станциями. Это дает возможность

в реальном времени оценивать геометрию сети, корректировать размещение оборудования и учитывать нюансы, такие как доступность точек для монтажа.

Второй подход – полностью автоматическая оптимизация на основе генетического алгоритма (рис. 3). Пользователь задает исходные условия: расположение марок и характеристики приборов. Система формирует массив допустимых позиций для тахеометров, исключая точки внутри сооружений и в зонах препятствий. На этом множестве запускается генетический алгоритм [1], оперирующий популяцией конфигураций сети. Каждая конфигурация оценивается по многокритериальной функции, учитывающей процент покрытия марок, количество станций, степень связности сети и качество образуемых геометрических фигур. Эволюционный цикл (селекция, скрещивание, мутация) обеспечивает поиск конфигурации, оптимально балансирующей между точностью и затратами ресурсов.

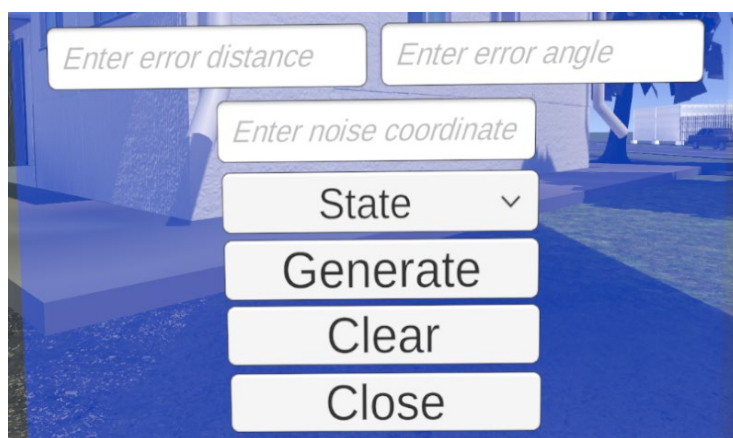


Рис.3. Меню для автоматизированного проектирования

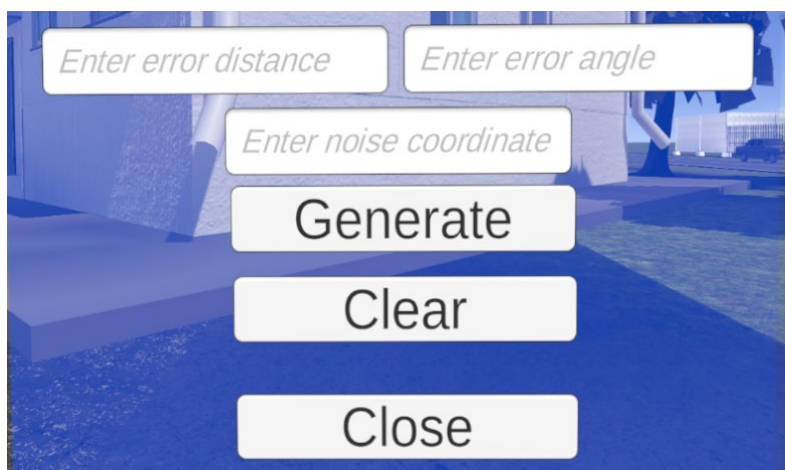


Рис. 4. Меню для ручного проектирования



Рис. 5. Отчет GNU Gama в Unity

Обсуждение

Представленная система предлагает новый подход к проектированию сетей геодезического мониторинга за счет интеграции виртуальной реальности, генетического алгоритма и метрологического анализа. Сочетание автоматизированной оптимизации с интерактивным проектированием позволяет эффективно объединить формальный поиск решений с экспертным контролем.

Применение генетического алгоритма значительно сокращает время поиска рациональных конфигураций сети и улучшает ее ключевые геометрические показатели. В то же время, в сложных условиях с множеством препятствий алгоритм может предлагать решения, требующие последующей корректировки специалистом из-за трудностей полной формализации всех практических ограничений и риска сходимости к локальным оптимумам. Поэтому роль инженера способного провести содержательный анализ и финальную доработку проекта, остается критически важной, рис. 6.

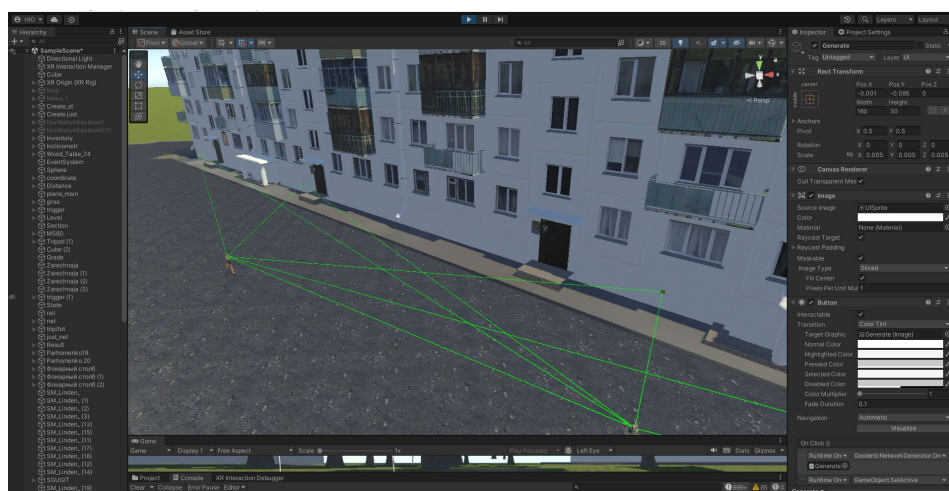


Рис. 6. Пример построения геодезической сети при помощи генетического алгоритма

Основное преимущество системы заключается в обеспечении априорной метрологической оценки проекта – возможности рассчитать ожидаемую точность и надежность геодезической сети до начала полевых работ. Это соответствует современным нормативным требованиям и создает основу для объективного обоснования проектных решений.

Заключение

Таким образом, разработанный инструмент представляет собой шаг в направлении обоснованного проектирования, сочетая вычислительную оптимизацию с экспертным анализом. Перспективы развития системы связаны с учетом дополнительных факторов в алгоритме оптимизации, интеграцией с BIM – средами и развитием облачных сервисов для коллективной работы.

Благодарности

Исследование выполняется в рамках НИР 0110 – Исследование выполнено при поддержке госбюджетной научно-исследовательской работы «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Генетический алгоритм // Википедия / Page Version ID: 149813595. 2025.
2. ПО и движок для игровой разработки VR | Unity. – URL: <https://unity.com/ru/solutions/vr> (дата обращения: 01.12.2025) – Текст: электронный.
3. GNU Gama. – URL: <https://www.gnu.org/software/gama/> (дата обращения: 28.11.2025) – Текст: электронный.
4. Unity - Manual: VR development in Unity. – URL: <https://docs.unity3d.com/2023.2/Documentation/Manual/VROverview.html> (дата обращения: 01.12.2025) – Текст: электронный.

© В. Ю. Наумов, 2026