

Е. Ф. Голубь¹, Т. Ю. Бугакова^{1}*

Моделирование пространственно-временных состояний техногенных систем по геодезическим данным для обеспечения безопасного функционирования

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Аннотация. Современные технические средства наблюдений позволяют получить цифровое описание пространственного объекта. Применение математических методов, дает возможность аппроксимировать координатные данные объекта и представить его в виде математической модели, изучение которой позволяет получить любую информацию об изменении состояния объекта в пространстве и времени для предупреждения аварийных ситуаций и безопасного функционирования. В статье рассмотрены практические примеры построения математических моделей для определения пространственной ориентации объекта, крена фундамента жилого здания и оценки его интегральной деформации методом математической аппроксимации. Построение и анализ математической модели по пространственной цифровой информации об объекте позволяет определить пространственное положение всего инженерно-технического сооружения в виде математического объекта, анализ которого дает возможность выполнять комплексную оценку пространственно-временного состояния объекта в целом и его геометрических параметров.

Ключевые слова: пространственно-временное состояние, инженерно-технические сооружения, математические модели, методы аппроксимации

E. F. Golub¹, T. Yu. Bugakova^{1}*

Modeling of Spatio-Temporal States of Technogenic Systems Based on Geodetic Data to Ensure Safe Operation

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Abstract. Current technical means of observation make it possible to obtain a digital description of a spatial object. The use of mathematical methods makes it possible to approximate the coordinate data of an object and present it in the form of a mathematical model, the study of which allows obtaining any information about changes in the state of the object in space and time to prevent emergencies. The article considers practical examples of building mathematical models for determining the spatial orientation of an object, the roll of the foundation of a residential building and assessing its integral deformation by mathematical approximation. The building and analysis of a mathematical model based on spatial digital information about an object determine the spatial position of the entire engineering and technical structure in the form of a mathematical object, the analysis of which makes it possible to perform a comprehensive assessment of the spatial and temporal state of the object as a whole and its geometric parameters.

Keywords: spatial-temporal state, engineering structures, mathematical models, approximation methods

Введение

Контроль пространственно-временного состояния (ПВС) инженерно-технических сооружений является одной из важнейших задач обеспечения безопасности их эксплуатации [16–18]. Любые инженерно-технические сооружения (ИТС) подвержены воздействию внешних и внутренних факторов, что способствует изменению их состояний. Сегодня существует множество примеров аварийных ситуаций, техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций, связанных с эксплуатацией зданий и инженерных сооружений (объектов) [13, 20]. Совершенствуются технологии строительства, инструменты и средства наблюдений за пространственно-временным состоянием объектов, однако все это не гарантирует полную безопасность таких объектов. Современные технические средства наблюдений позволяют получить цифровое описание пространственного объекта [14–16]. Применение математических методов, дает возможность аппроксимировать координатные данные объекта и представить его в виде математической модели, изучение которой позволяет получить любую информацию об изменении состояния объекта в пространстве и времени для предупреждения аварийных ситуаций и безопасного функционирования [24].

Методы и материалы

В основу современных программных продуктов (ПО) заложены математические алгоритмы, позволяющие определить параметры вертикальных и горизонтальных смещений, деформаций, а также визуализировать изменения пространственно-временного состояния ИТС и их конструктивных элементов [1, 4–6]. Однако, на сегодняшний день, данные программы имеют некоторые недостатки [10–12].

1. Пользователь не может изменить математические алгоритмы, которые заложены в таких программах, что усложняет оценку ПВС ИТС, т.к. в некоторых случаях необходимо учитывать их индивидуальные конструктивные особенности и особенности влияния внешних факторов.

2. Использование большинства программ для детализированной оценки ИТС, подразумевает подключение нескольких модулей, что в свою очередь значительно повышает затраты для использования ПО в исследованиях ПВС ИТС.

3. Программные продукты имеют ограниченное количество математических алгоритмов, что затрудняет проведение комплексного и полного анализа состояния ИТС.

4. В условиях импортозамещения возникают сложности использования зарубежного ПО.

Для комплексного контроля пространственно-временного состояния ИТС систем необходимы данные о геометрических свойствах объекта, как функция времени. К ним относятся форма, размеры, положение в пространстве и другие свойства, характеризующие взаимное расположение множества точек объекта относительно внешней среды и относительно друг друга [6–9]. Выполнить непосредственное измерение таких параметров даже современными техническими

средствами чаще всего не удастся и поэтому для их определения применяют методы математического моделирования [2, 3, 26–29].

Объектом исследований определения ПВС является жилой дом в городе Новосибирск по адресу: ул. Октябрьская, дом № 40 (рис. 1).

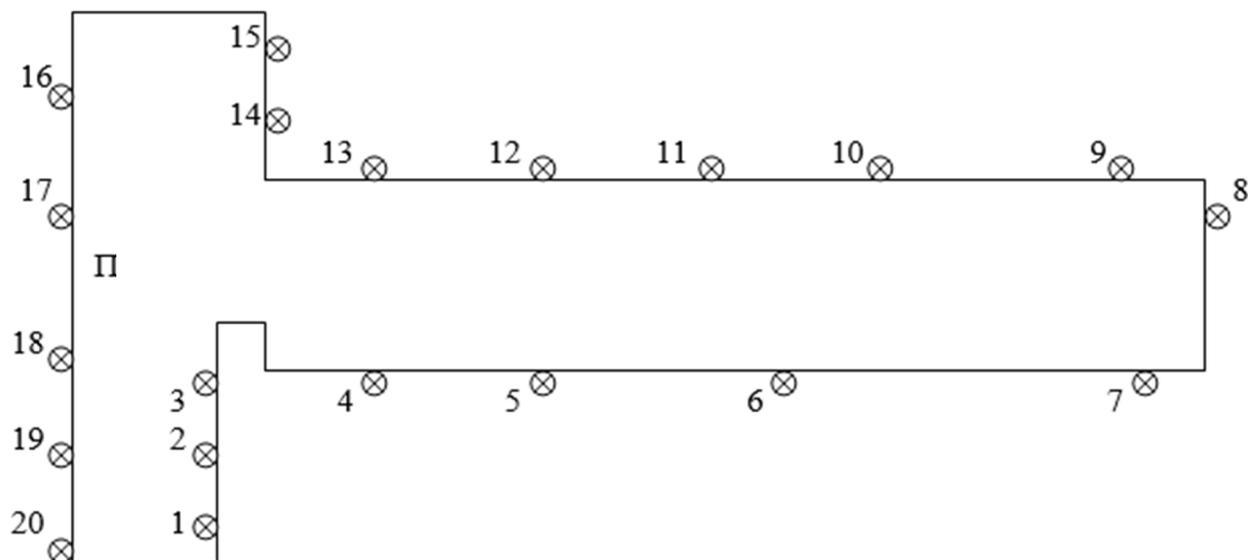


Рис. 1. План размещения геодезических марок в стене жилого здания по ул. Октябрьская, 40

Для геодезического контроля в фундамент здания заложено 20 геодезических марок (контрольных точек). В результате 12 циклов геодезических наблюдений получены высотные координаты марок $H_i(t)$, где $i=1,2..20$, $t=1,2..12$. Координаты X_i и Y_i , определены относительно условной системы координат.

Целью исследований является определение пространственной ориентации фундамента жилого здания (крена) [1–5] и определение интегральной деформации объекта в целом [10–13].

Результаты исследований

Для определения пространственной ориентации фундамента здания была выполнена аппроксимация множества контрольных точек математической моделью плоскости S для каждого цикла наблюдений [24–26]. Пример результата аппроксимации, выполненной в программе MathCad, изображен на рис. 2 (а – для цикла №1, б – цикла №12).

Изменение пространственной ориентации фундамента объекта определяется углом α° между нормалью $N_{t=1}$, проведенной к плоскости на момент t_1 и нормалью $N_{t=2,3..12}$, определенными на другие моменты времени. Результаты вычислений углов между нормалью представлены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют об изменении ориентации объекта (общий крен фундамента) [11–13, 22, 25].

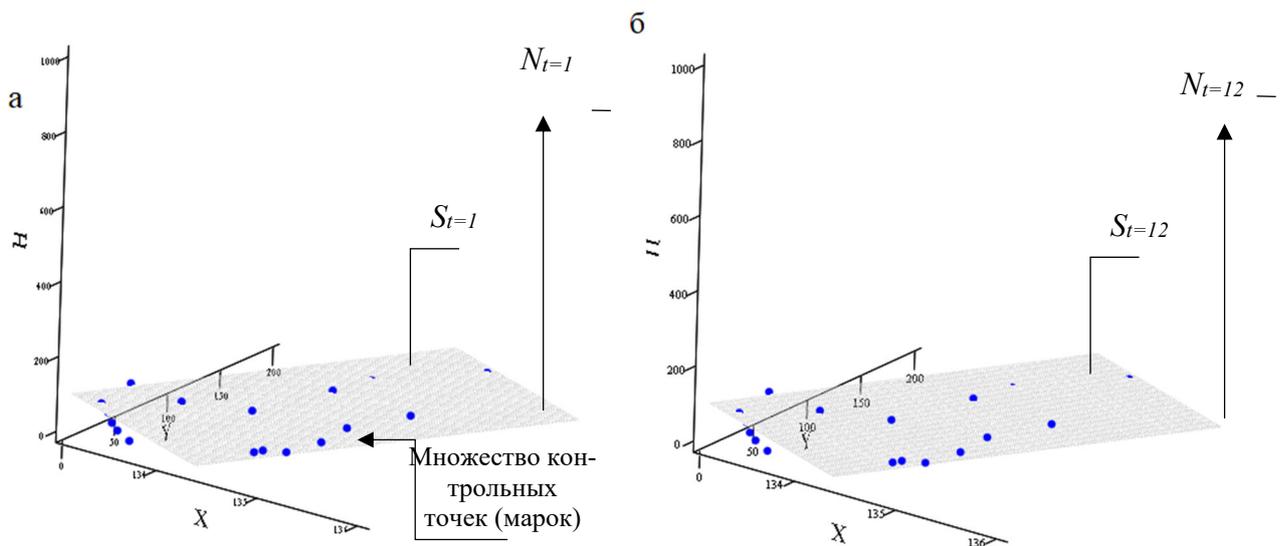


Рис. 2. Аппроксимация множества контрольных точек плоскостью (а – 1 цикл наблюдений; б – 12 цикл наблюдений)

Таблица 1

Углы между нормальными

| $\alpha_{t_1-t_2}$ | $\alpha_{t_1-t_4}$ | $\alpha_{t_1-t_5}$ | $\alpha_{t_1-t_9}$ | $\alpha_{t_1-t_{11}}$ | $\alpha_{t_1-t_{12}}$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 03°07'55,2" | 03°08'24,0" | 03°08'27,6" | 03°08'27,6" | 3°08'27,6" | 03°08'27,6" |

Для определения интегральной деформации был выбран метод аппроксимации множества контрольных точек объекта сферой [29, 30]. Интегральная деформация характеризуется изменением радиуса R сферы. На рис. 3 представлены результаты аппроксимации объекта сферой, выполненной в программе MathCad.

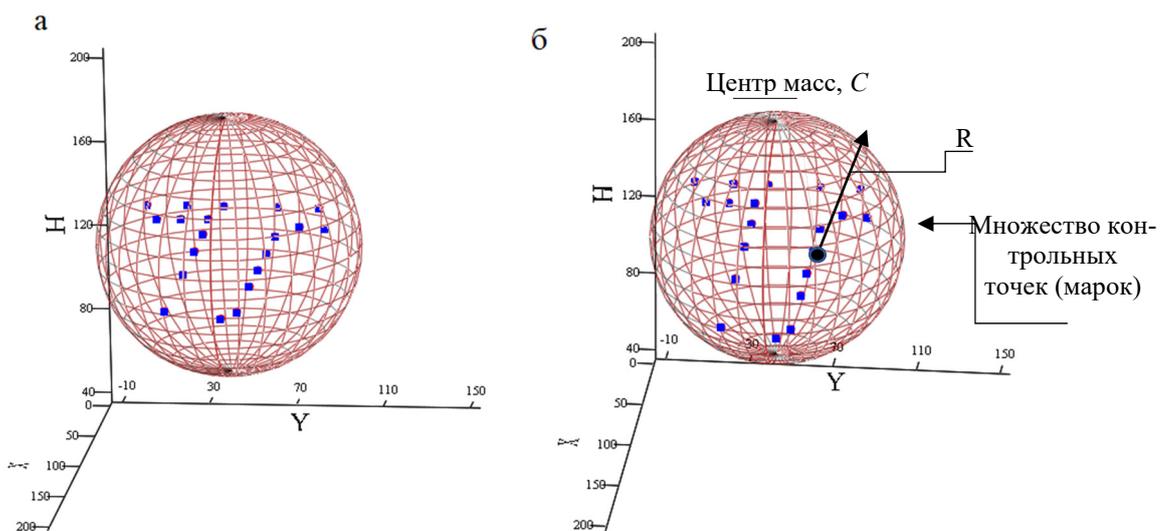


Рис. 3. Аппроксимация облака точек сферой (а – 1 цикл наблюдений; б – 12 цикл наблюдений)

В табл. 2 представлены разности длин радиусов, вычисленного на момент t_1 и на другие моменты времени.

Таблица 2

Разность длин радиусов ΔR , м

| ΔR 1–2 | ΔR 1–4 | ΔR 1–5 | ΔR 1–9 | ΔR 1–10 | ΔR 1–11 | ΔR 1–12 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0,0001 | 0,0002 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0010 | 0,0010 | 0,0000 |

В ходе выполнения аппроксимации множества контрольных точек объекта сферой: было обнаружено изменение радиуса, а также смещение центра масс сферы $C=0,001$. При допустимом отклонении высотных координат контрольных точек $H=\pm 0,005$ м., можно сделать вывод, что интегральная деформация отсутствует (является незначительной) [14–21].

Заключение

Любая дополнительная информация, полученная на основании исходных данных об объекте крайне важна для контроля инженерно-технических сооружений и позволит существенно снизить риск возникновения чрезвычайных и аварийных ситуаций, тем самым обеспечить безопасность эксплуатации сооружений.

Построение и анализ математической модели по пространственной цифровой информации об объекте позволяет определить пространственное положение всего ИТС в виде математического объекта, анализ которого дает возможность выполнять комплексную оценку пространственно-временного состояния ИТС в целом и его геометрических параметров. В зависимости от формы объекта и задач определения изменения состояния ИТС необходимо подбирать наиболее подходящую модель для дальнейшего анализа.

Для более точной аппроксимации объекта математической моделью рекомендуется использовать в качестве исходных данных результаты лазерного сканирования всего объекта в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере [Текст]: учебное пособие для вузов / П.Г. Белов. – М.: Академия, 2003. – 512 с.
2. Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно-временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.
3. Бугакова Т. Ю. Оценка устойчивости состояний объектов по геодезическим данным методом фазового пространства: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск: СГГА, 2005.
4. Бугакова Т. Ю., Борисов Д. А., Яковлев Д. А. Программная реализация метода делоне для определения формы и размеров техногенных объектов по геопространственным данным // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4С. – С. 15–19.
5. Бугакова Т. Ю., Вовк И. Г. Определение вращательного движения объекта по результатам многократных геодезических измерений [Текст] // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2013: IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апр. 2013, – Новосибирск: СГГА, 2013. - С.88-92.

6. Бугакова Т. Ю., Шарапов А. А. Применение мультиагентного подхода для определения пространственно-временного состояния техногенных систем, XII Международный Форум «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2016» 18 апреля 2016, Новосибирск: СГУГиТ, С. 189–194.
7. Бугакова Т. Ю., Шляхова М. М., Кноль И. А. Структурная декомпозиция объекта методами математического моделирования с последующей визуализацией на основе WebGL. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 244 с. – С. 142–147
8. Вовк И. Г. Математическое моделирование пространственно-временного состояния систем по геометрическим свойствам и оценка техногенного риска методом экспоненциального сглаживания [Текст]: Вестник СГГА / И. Г. Вовк, Т. Ю. Бугакова. – Новосибирск: СГГА, 2012. – Выпуск 4 (20). – С. 47–58.
9. Вовк И. Г. Определение геометрических инвариантов поверхности в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 59–69.
10. Вовк И. Г. Системно-целевой подход в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 115–124.
11. Жуков, Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст]: учебное пособие для вузов / Б. Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 376 с
12. Использование GNSS оборудования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.eft-gnss.ru/> – Загл. с экрана.
13. Карпик А.П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 4. С. 3-7.
14. Мазуров Б.Т. Геодинамические системы (кинематические и деформационные модели блоковых движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 5–15.
15. Национальный стандарт российской федерации ГОСТ Р 22.1.12-2005, Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. Москва, ИПК, Издательство стандартов, 2005
16. Роберт Лафоре. Структуры данных и алгоритмы JAVA. Питер, 2013.
17. Хиллер Б., Ямбаев Х.К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
18. Яковлев Д. А. Текстурирование модели техногенного объекта и его привязка к системе координат в среде 3d studio max 2009 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10 20 апреля 2012 г.). Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 3. С. 149–152.
19. Carcanague S., Julien O., Vigneau W., Macabiau C., Hein G. Finding the right algorithm - Low-Cost, Single-Frequency GPS/GLONASS RTK for Road Users//Inside GNSS. 2013. Vol. 8, No. 6. P. 7-80.
20. F. Zarzoura, R. Ehigiator -Irughe, B. Mazurov. Utilizing of Mathematical Frame Work in Bridge Deformation Monitoring Asian Journal of Engineering and Technology (ISSN: 2321 -2462) Volume 02 -Issue 04, August 2014. -Pp. 293-300.
21. François Mazuyer and Marc Vanderschueren. TS01E -Surveying Practice across the world -6676. FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability Abuja, Nigeria, 6-10 May 2013
22. Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP/A. I. Savich, M. M. Il'in, V. P. Elkin, V. I. Rechitskii, A. B. Bасова//Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 47. № 2. Pp. 89-101
23. Ghiasian M., Ahmadi M.T. Effective model for dynamic vertical joint opening of concrete arch dam//Proc. of the int. symp. on dams for a changing word-80th annual meet. and 24th cong. of ICOLD. Kyoto, Japan. 2012. Pp. (4) 41-46.

24. GPS for geodesy. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. (Eds.). – Berlin: Springer, 1998 – 650 p.
– АНГЛ.
25. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS -Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more. -Wien, New-York: Springer. -2008. -516 p.
26. Mazuyer F., Vanderschueren M. TS01E -Surveying Practice across the world -6676 // FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability (6–10 May). – Abuja, Nigeria, 2013.
27. Neuner H., Schmitt C., Neumann I. Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with // Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring. – Nottingham, England, 2013.
28. Studies on the static and dynamic behavior of the Sayano-Shushenskaya arch gravity dam/A. I. Savich, V. I. Bronshtein, M. E. Groshev, E. G. Gaziev, M. M. Il'in, V. I. Rechitskii//International Journal on Hydropower and Dams. 2013. Vol. 20. № 6. Pp. 453-58.
29. Tatiana Bugakova, Artem Sharapov . Modeling of a prototype multi-agent system monitoring man-made objects// Engineering Studies, Issue 3 (2), Volume 8. “Taylor & Francis”, 2016. - Pages C.430–440.
30. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Web-Based Geoinformation System for Exploring Geomagnetic Field, Its Variations and Anomalies. Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. Volume 582 of the series Communications in Computer and Information Science, 2016, pp. 22-35.

© *Е. Ф. Голубь, Т. Ю. Бугакова, 2023*