

Модели для цифровых двойников пространственно-распределенных объектов

Г. В. Верхова, С. В. Акимов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ)
galina500@inbox.ru, akimov-sv@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований в области разработки многоаспектных геоинформационных моделей для цифровых двойников пространственно-распределенных объектов. Показано, что цифровые двойники пространственных объектов, созданные на базе многоаспектных моделей, позволяют с единых методологических позиций представить как общесистемные, так и геоинформационные аспекты природных и антропогенных объектов и могут быть положены в основу единой киберсреды постиндустриального общества.

Ключевые слова: цифровой двойник, общесистемные аспекты, географические аспекты, единая киберсреда постиндустриального общества, геоинформационные модели регионов, геоинформационные модели техногенных объектов, геоинформационные модели природных объектов

I. ВВЕДЕНИЕ

Геоинформационные системы находят все более широкое применение во всех сферах деятельности [1–4], обеспечивая проведение анализа социальных, экономических и топографических особенностей, который необходим при планировании экономических отраслей, проведения комплекса мероприятий, направленных на повышении качества жизни населения, предупреждения чрезвычайных ситуаций. Без геоинформационных систем невозможна организация и управление распределенными производствами, а также эффективное функционирование виртуальных организаций.

Современные геоинформационные системы различаются по территориальному охвату, проблемно-тематической ориентации и по способу организации географических данных. Геоинформационные системы обычно используются совместно с другими информационными системами, автоматизирующими процессы проектирования, планирования и управления, что требует проведения мероприятий по их интеграции в единую киберсреду постиндустриального общества.

Теоретико-методологическую основу интеграции различных информационных систем в единую киберсреду предоставляет теория CALS (Computer Aided Lifecycle Support) и Industry 4.0. Современная тенденция развития CALS предполагает создание методов и технологий глубокой интеграции гетерогенных данных об изделии или любом системном объекте на базе моделей, которые могут быть использованы на всех этапах жизненного цикла [5–8].

Эффективное формирование единой киберфизической среды постиндустриального общества, в которой органическим образом представлены географические и общесистемные аспекты, возможно лишь на базе цифровых двойников пространственно-распределенных объектов [9–12]. Создание цифровых двойников требует разработки новых теоретико-методологических принципов и моделей, которые обеспечат синтез общесистемных и географических аспектов пространственно-распределенных объектов и смогут быть использованы на всех этапах жизненного цикла.

Данная статья посвящена вопросам разработки многоаспектных геоинформационных моделей для цифровых двойников пространственно-распределенных объектов, которые могут быть положены в основу единой киберфизической среды постиндустриального общества. Применение таких моделей в цифровых двойниках обеспечит возможность представить с единых методологических позиций общесистемных и географических аспектов пространственно-распределенных природных и антропогенных объектов.

II. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ГИС

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» цифровой двойник изделия определяется как система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. Цифровой двойник базируется на согласованном и непротиворечивом множестве мультидисциплинарных и мультимасштабных моделей объекта на всех этапах жизненного цикла. Таким образом, одной из методологических основ создания цифровых двойников является системная инженерия на основе моделей (Model-based systems engineering, MBSE).

MBSE представляет собой сквозное применение моделирования для формирования системных требований, анализа, проектирования, верификации и валидации процессов на этапах жизненного цикла изделия. В рамках данного метода основным артефактом является модель, а не документ. MBSE ориентирован на применении в отраслях, имеющими дело со сложными системами, таких как аэрокосмическая, оборонная, железнодорожная, автомобильная, обрабатывающая промышленность и т. д.

Модель в MBSE должна описывать как проблему, которую должна решить проектируемая система (оперативный аспект), так и саму проектируемую систему (системный аспект). Операционный аспект

Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина

представляет собой точку зрения пользователей, операторов и руководителей. Данный аспект представляет бизнес-процессы, цели, организационную структуру, варианты использования и информационные потоки. Системный аспект представляет решение, архитектуру проектируемой системы. Каждый из данных аспектов состоит из двух частей: логической и физической. Разделение логических и физических аспектов модели является способом управления сложностью системы. Если модель построена правильно, все четыре квадранта должны быть тесно связаны. Поставленные в рамках применения данной методологии задачи должны прослеживаться до конкретных элементов решения, а логические элементы должны быть соотнесены с физическими структурам. Пользователь созданной модели должен иметь возможность четко наблюдать, как концепции и компоненты верхнего уровня отображаются на функции более низкого уровня. Пользователи должны иметь возможность выполнять системный анализ, создавать матрицы зависимостей, запускать симуляции и создавать представление о системе для каждого заинтересованного лица.

Цифровой двойник системного объекта может быть представлен следующим образом [13]:

$$DT = \langle DT_1, DT_2, DT_3, DT_4 \rangle, \quad (1)$$

где:

DT_1 – семейство best-in-class технологий мирового уровня;

DT_2 – семейство матриц целевых показателей/требований и ресурсных ограничений;

DT_3 – семейство взаимосвязанных высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей системного объекта;

DT_4 – семейство взаимосвязанных высокоадекватных мультидисциплинарных математических моделей виртуальных испытаний, стендов и полигонов.

Канадская компания Presagis анонсировала гибкую и масштабируемую цифровую экосистему VELOCITY 5D, которая автоматически преобразует 2D- и 3D-данные ГИС в реалистичные цифровые двойники с широкими информационными возможностями предоставления о пространственных объектах в реальном масштабе времени. В VELOCITY 5D четвертое измерение подразумевает время, а пятое – контекст. Данная экосистема в первую очередь нацелена на повышение качества поддержки принятия решений.

В VELOCITY 5D применяется искусственный интеллект для извлечения информации из цифровых двойников пространственных объектов, с целью выявления моделей взаимодействия людей, поведения толпы, движения транспортных средств и других объектов и отношений между ними. Это позволяет пользователям лучше интерпретировать комплексную ситуацию в динамически меняющемся мире и моделировать будущие ситуации. Платформа VELOCITY 5D нацелена на реализацию возможности создания общенационального высокоточного цифрового двойника на основе данных ГИС масштаба страны в течение нескольких часов с последующим выполнением

сценариев моделирования, визуализации, планирования и картирования.

III. СИНТЕЗ ОБЩЕСИСТЕМНЫХ И ГЕОГРАФИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ В РАМКАХ МЕТОДОЛОГИИ МНОГОАСПЕКТНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Исходя из положений, изложенных в предыдущем разделе, цифровой двойник может быть эффективно реализован на базе многоаспектных общесистемных моделей, включающих в себя семейство согласованных моделей:

- описательных;
- предсказательных;
- созидательных.

Данные три модели в рамках методологии многоаспектного моделирования могут быть реализованы с помощью системы комплексных и интегративных моделей [5–6], как показано на рис. 1.

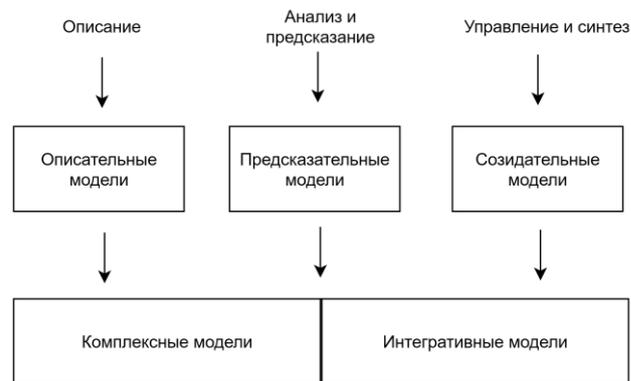


Рис. 1. Многоаспектное общесистемное моделирование с помощью комплексных и интегративных моделей

Комплексная представляет собой системологическую модель, которая описывает класс объектов на уровне системных аспектов и отдельно взятый объект на уровне всех аспектов, подлежащих рассмотрению, и для которых имеются обеспечивающие их формализмы. Комплексная модель призвана объединить множество математических и компьютерных моделей, представляющих различные аспекты объектов, в единое целое. Комплексные модели не подменяют другие типы моделей, а являются своеобразной надстройкой над ними. Методология комплексных моделей призвана дать ответы на следующие вопросы:

- сведение информационных моделей, описывающих различные аспекты объекта в единую систему;
- установление связей между информационными моделями и предсказательными моделями;
- разработка механизмов манипуляции информационными моделями без обращения к предсказательным моделям (нахождение объектов, отвечающих определенным требованиям, определение совместимости между объектами, комплексирование объектов), включая многокритериальный и интеллектуальный поиск, учет совместимости объектов.

Интегративная модель является оптимизационной многокритериальной моделью со структурно-параметрическим управлением. Интегративная модель представляет собой наиболее полную модель класса объектов, которая содержит механизмы формализованного представления технико-экономических и тактико-технических требований, множество структурно-параметрических решений, заданное интенционально, методы вычисления всех интересующих характеристик объекта и алгоритм решения многокритериальной оптимизационной задачи. Интегративная модель строится на основе различных видов формализмов: математического анализа и линейной алгебры, математического программирования, теории многокритериальной оптимизации, инженерии знаний, теории алгоритмов, технологии программирования и информационных технологий, и является моделью верхнего уровня (надстройкой) над комплексной моделью.

Цифровые двойники пространственно-распределенных объектов требуют обобщения многоаспектных общесистемных моделей на случай представления наряду с общесистемными, географических аспектов. Синтез общесистемных и геоинформационных аспектов осуществляется с помощью описательных моделей общесистемных аспектов (рис. 1), которые входят в состав как геоинформационных, так и общесистемных моделей, и через которые осуществляется сквозное двунаправленное информационное взаимодействие между ними (рис. 2). Географические аспекты реализуются с помощью формализмов многоаспектных геоинформационных моделей, а реализация общесистемных аспектов осуществляется в многоаспектных общесистемных моделях.



Рис. 2. Синтез геоинформационных и общесистемных аспектов в многоаспектных геоинформационных моделях

Синтез общесистемных и геоинформационных аспектов в рамках единой многоаспектной модели обеспечит, с одной стороны, дополнение модели управления жизненным циклом пространственно-распределенного объекта, что необходимо, в частности, для эффективного управления распределенным производством и логистикой, а, с другой стороны, позволит выполнить глубокую интеграцию моделей жизненных циклов продукции, производимой на распределенных производствах, в единую модель жизненного цикла географически распределенного объекта или системы.

IV. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В РАМКАХ ЕДИНОЙ КИБЕРСРЕДЫ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА

Предварительный стандарт ПНСТ 417-2020 определяет киберфизическую систему как интеллектуальную систему, которая включает в себя инженерные взаимодействующие сети физических и вычислительных компонентов. В рамках киберфизической системы осуществляется интеграция вычислительных ресурсов в физические сущности любого вида, включая биологические и рукотворные объекты. Киберфизические системы являются одной из основных компонентов Industry 4.0 [4].

В работе [14] киберфизическая система *CPS* представлена в следующем виде:

$$CPS = \langle Ph, Lg, Sens, Act, Hum \rangle, \quad (2)$$

где:

Ph – множество физических компонентов;

Lg – множество логических компонентов;

Sens – множество датчиков;

Act – множество исполнительных механизмов;

Hum – множество лиц, вовлеченных в функционирование киберфизической системы.

Функционирование киберфизической системы определяется множеством функциональных компонентов *F*, представляющее собой совокупность взаимодействующих между собой физических и логических компонентов, формирующих базовую единицу функциональности [14]:

$$F = \{ \langle Ph_i, Lg_i \rangle | Ph_i \subseteq Ph, Lg_i \subseteq Lg, i \in [1, n], j \in [1, m] \}, \quad (3)$$

Пространственно-распределенный объект, а также отдельные компоненты могут рассматриваться как распределенные киберфизические системы, взаимодействующие друг с другом в информационно-коммуникационном пространстве. По аналогии с определением цифровой среды, киберфизическую среду можно определить как открытую совокупность киберфизических систем. Адекватное отражение состояния пространственно-распределенного объекта в реальном масштабе времени и обеспечение их информационного взаимодействия требует наличия единой геоинформационной среды, являющейся частью киберфизической среды постиндустриального общества.

Основу единой геоинформационной среды представляет киберсреда, обеспечивающая функционирование агентов, являющихся

представителями всех компонентов киберфизической среды, а также их информационное взаимодействие. Киберфизическая среда может быть представлена в виде мультиагентной системы (МАС) [15]:

$$MAS = \langle A, E, R, ORG \rangle, \quad (4)$$

где:

A – множество агентов;

E – коммуникационная среда;

R – множество связей между агентами;

ORG – определение МАС, как изображения, представляющего собой сходные между собой регулярные конфигурации, объединенные в множество, на котором определены классы эквивалентности.

Применение концепции многоагентной геоинформационной среды обеспечит:

- многоаспектное представление информации о пространственно-распределенном объекте;
- смещение акцентов с отдельных слоев ГИС на аспекты, отражающие разные стороны пространственно-распределенного объекта;
- формирования единой геоинформационной среды на базе цифровых двойниках географически распределенных объектов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- современные методы геодезии, картографии и геоматики позволяют достаточно эффективно моделировать отдельные геоинформационные аспекты пространственно-распределенных объектов;
- на данный момент отсутствует развитая теоретико-методологическая база, позволяющая выполнять сквозное многоаспектное геоинформационное моделирование пространственных объектов на всех этапах жизненного цикла;
- необходима разработка метода многоаспектного моделирования, обеспечивающего возможность синтеза общесистемных и геоинформационных аспектов в рамках единой многоаспектной модели с единых методологических позиций, которую можно использовать на всех этапах жизненного цикла пространственно-распределенного объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Кокурин К.Д. Геоинформационная система для управления загруженностью муниципальных объектов // Телекоммуникации. 2015. № 5. С. 36-40.
- [2] Aicha O., Abdessamad G., Hassane J.O. Groundwater Flooding in Urban Areas: Occurrence process, Potential Impacts and The Role Of Remote Sensing And GIS Techniques In Preventing It // 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo). 2020, Pp. 1-5. [DOI: 10.1109/Morgeo49228.2020.9121879]
- [3] Malaanine M.I., Lechgar H. Conception of Geocoding Matching Algorithm for Casablanca City – Morocco // 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo). 2020, Pp. 1-4. [DOI: 10.1109/Morgeo49228.2020.9121884]
- [4] M. N. Hassan Reza, C. Agamudai Nambi Malarvizhi, S. Jayashree and M. Mohiuddin, "Industry 4.0–Technological Revolution and Sustainable Firm Performance," 2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0), Raigarh, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619363.
- [5] Verkhova G.V., Akimov S.V. Multi-Aspect modeling system objects in CALS // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. P. 452-454. [DOI: 10.1109/SCM.2017.7970614]
- [6] Акимов С.В., Никифоров О.Г. Методология комплексных моделей системных объектов // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 2. С. 138-149.
- [7] Khoder H.M., Verkhova G.V., Akimov S.V. Parametric multi-aspect modeling of distributed bus-modular control systems // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). Dr. Mikhail Shestopalov; Co-chair of the Conference Organizing Committee, Chair of the IEEE Russia NW Section; Vice Rector for Research, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETU". 2017. С. 259-262.
- [8] Кходер Х., Верхова Г.В., Акимов С.В. Модульная технология проектирования гибких сложных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 9. С. 86-90.
- [9] V. Mihoković, L. Zalović and i. V. Zalović, "Establishing the utility charges spatial database using digital twin technology," 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croa-tia, 2020, pp. 437-441, doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245407.
- [10] H. Sofia, E. Anas and O. Faiz, "Mobile Mapping, Machine Learning and Digital Twin for Road Infrastructure Monitoring and Maintenance: Case Study of Mohammed VI Bridge in Morocco," 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), Casablanca, Morocco, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/Morgeo49228.2020.9121882.
- [11] P.-M. Brunet et al., "AI4GEO: A Path From 3D Model to Digital Twin," IGARSS 2022–2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposi-um, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 4728-4731, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883433.
- [12] A. Lee, J. Kim and I. Jang, "Movable Dynamic Data Detection and Visualiza-tion for Digital Twin City," 2020 IEEE International Conference on Consumer Elec-tronics - Asia (ICCE-Asia), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICCE-Asia49877.2020.9277250.
- [13] Прохоров А., Лысачев М. Цифровые двойники. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: «Росэнергоатом», 2020.
- [14] Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2019; 23(6): 161-175.
- [15] R.G. Sanfelice. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice / D. Rawat, J. Rodrigues, I. Stojmenovic. CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4822-6333-6.