

УДК 004.91

DOI: 10.17223/19988605/55/4

**А.В. Воробьев****КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ  
(НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ)***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00011.*

Рассматриваются вопросы повышения эффективности пространственной интерполяции данных, описывающих процессы с выраженной пространственной анизотропией. Предложен подход к интерполяции, основанный на применении многоуровневой системы цифровых двойников, представленной совокупностью пространственных кластеров, которые включают физические прототипы соответствующих объектов и их виртуальные модели – цифровые двойники. На примере результатов мониторинга параметров геомагнитного поля показана эффективность применения предложенной концепции.

**Ключевые слова:** цифровые двойники; обработка данных; корреляционный анализ; фрактальные множества; пространственные кластеры.

В настоящее время, в условиях развития цифровой экономики, одним из магистральных направлений развития информационных технологий является разработка технологий обеспечения физических и технических систем различного уровня сложности их цифровыми двойниками.

Под цифровым двойником [1. С. 79] понимается программный аналог технического или физического объекта, процесса или системы, моделирующий их внутренние характеристики, свойства и поведение в динамически меняющихся условиях окружающей среды.

Основа концепции цифрового двойника независимо от прикладной области его применения представляет собой совокупность трех основных составляющих [2]:

- 1) физический объект-прототип в его реальном окружении;
- 2) виртуальный объект – цифровой двойник – в его виртуальном окружении [3. С. 2051];
- 3) информационные потоки и данные, обеспечивающие взаимодействие физического объекта-прототипа и его цифрового двойника [4. С. 86; 5. С. 1023].

При этом в зависимости от конкретных ситуаций использования в прикладных областях цифровые двойники могут выступать как в роли прототипа цифрового двойника, так и в качестве его цифрового экземпляра [6. С. 66; 7. С. 24]. В первом случае имеет место высокоточная модель, не связанная информационным потоком с физическим объектом или системой [8. С. 154; 9. С. 817; 10; 11]. Во втором случае предполагается описание реального объекта с непрерывной информационной связью с оригинальным объектом [12. С. 10; 13. С. 25].

Одним из перспективных направлений применения цифровых двойников является создание так называемых «виртуальных приборов (устройств)» [1. С. 79; 8. С. 154; 14. С. 1; 15. С. 109], целью которых являются непрерывная регистрация и мониторинг параметров объектов и систем различной природы происхождения в тех локациях, которые физически или по каким-либо иным причинам недоступны для размещения физических информационно-измерительных устройств и систем.

В этой связи указанное приложение цифровых двойников может являться эффективным решением проблемы пространственной интерполяции данных, имеющих пространственно-временную привязку и характеризующихся выраженной пространственной анизотропией описываемых ими процессов или явлений.

Примером тому являются неоднородные пространственно-временные геомагнитные данные, непрерывно регистрируемые сетью наземных магнитных обсерваторий и вариационных станций, а также искусственными спутниками в околоземном пространстве. Высокие требования к техническому и программному оснащению магнитных обсерваторий зачастую делают невозможным размещение магнитометрического оборудования в некоторых географических локациях, например в высокоширотных областях. Вместе с тем именно в таких регионах мониторинг геомагнитных параметров имеет принципиальное значение.

Известно, что задача пространственной интерполяции в настоящее время решается посредством применения широкого спектра геоинформационных технологий: крикинг, сплайн, обратновзвешенные расстояния, метод ближайшего соседа – основные методы, доступные сегодня как программно, так и с использованием инструментальных средств [16, 17]. Вместе с тем ни один из известных подходов не учитывает особенности пространственной анизотропии интерполируемых данных и принимает одни и те же модели и методы для различных географических областей. В этой связи имеет место погрешность, величина которой для многих задач неприемлема [2]. К примеру, для геомагнитных данных анализ показал, что применение известных методов пространственной интерполяции сопровождается среднеквадратической ошибкой в среднем от 7,3 до 11,2 нТл при допустимой стандартами погрешности в 1 нТл. В результате интерполированные данные могут повлечь за собой серьезные ошибки в моделировании и принятии решений, что, в свою очередь, сопряжено с финансовыми и временными затратами на устранение их последствий (например, при инклинометрических исследованиях с применением магниточувствительного оборудования).

В этой связи применение в обозначенных и им подобных локациях цифровых двойников технических объектов и систем позволит в значительной мере решить проблему их пространственной анизотропии, обеспечивая доступ к геомагнитной информации в том числе и в тех пространственно-временных координатах, для которых не предусмотрен или недоступен физический прототип.

## **1. Концепция многоуровневой системы цифровых двойников**

Проблема пространственной анизотропии источников данных с точки зрения теории цифровых двойников имеет двойственную природу. С одной стороны, выраженный анизотропный характер пространственного распределения параметров геомагнитного поля и его вариаций в земном и околоземном пространстве объясняет тот факт, что для цифрового двойника не всегда гарантированно может быть найден и идентифицирован его физический прототип [4]. С другой стороны, физический прототип в совокупности со своим цифровым двойником не обеспечивают полного покрытия земного и околоземного пространства, что также усугубляется тем, что их работоспособное состояние в любой момент может быть нарушено в силу различных причин природного и техногенного характера, а также под воздействием человеческого фактора.

Для решения обозначенной проблемы представляется целесообразным представить цифровые двойники и их физические прототипы в виде многоуровневой системы, в которой каждый уровень образует пространственный кластер. Отличительной особенностью решения является то, что группа «цифровой двойник – физический прототип» представляет собой фрактал, многократно повторяемый как в рамках одного уровня, так и между несколькими уровнями системы. Тем самым на отличных от базового уровнях абстракции каждый цифровой двойник и его физический прототип также задаются парой «цифровой двойник – физический прототип». Взаимосвязь между парами осуществляется посредством организации дуплексных информационных потоков, имеющих место как локально (на одном уровне системы), так и глобально (между разными уровнями). В результате формируется многоуровневая система, где на каждом пространственном кластере задается собственная подсистема вида «цифровой двойник – физический прототип».

Представляется важным отметить, что агрегирование информационных потоков, поступающих из физических прототипов и их цифровых двойников, осуществляется на уровне одного родительского для указанных элементов пространственного кластера. К примеру, множество пар «цифровой

двойник – физический прототип» обмениваются друг с другом информацией о своем функционировании без дополнительного промежуточного сохранения, используя локальные средства и системы хранения данных. При этом совокупность всех одноуровневых пар передает информацию о значениях параметров в централизованное хранилище данных. В дальнейшем взаимодействие разноуровневых информационных потоков будет реализовано связями, организованными между хранилищами и базами данных. Интеграция данных, предполагающая сведение гетерогенных моделей хранимых данных в унифицированную форму (модель), может быть реализована практикуемыми в настоящее время при создании единого информационного пространства медиаторами и интерпретаторами.

Необходимо отметить, что в паре «физический прототип – цифровой двойник» любой из компонентов может отсутствовать. В этом случае создание виртуальной модели для цифрового двойника при отсутствии его физического прототипа осуществляется методами машинного обучения на основании доступных физических объектов, которые в этом случае могут выступать прототипами нескольких пар «физический прототип – цифровой двойник». Аналогичные рассуждения справедливы и для отсутствующих цифровых двойников: физический объект из пары может выступать в качестве прототипа для другой пары, но только того же уровня системы.

Структура многоуровневой системы цифровых двойников представляет собой объект некоторой размерности, обладающий свойством масштабной инвариантности. В общем виде при схематическом представлении система цифровых двойников, согласно предложенной концепции, представляет собой геометрический фрактал.

Применительно к техническим устройствам применение многоуровневой системы цифровых двойников обеспечивает качественно новый переход от аппаратных технических систем к программным системам, опирающимся в своем функционировании исключительно на возможности вычислительных машин.

## 2. Математическая модель многоуровневой системы цифровых двойников

Представляется целесообразным формализовать описание многоуровневой системы цифровых двойников в теоретико-множественном базисе. В качестве единицы моделирования в данном случае выступает уровень системы цифровых двойников, обозначенный как  $DW_n$ , что соответствует подсистеме цифровых двойников  $DW$  уровня  $n$ . Важно отметить, что для заданного уровня  $n$  допустимо соотношение

$$DW = \{DW_1, DW_2, \dots, DW_n\}, n \in N,$$

где  $DW_n$  –  $l$ -я подсистема множества подсистем уровня  $n$ .

Порядок обозначения смежных уровней подсистем может быть представлен последовательным присвоением соответствующих индексов. Каждая подсистема уровня  $n$  представляет собой совокупность элементов различного типа (как атомарных, так и составных). Базовым предлагается считать уровень с индексом  $n = 1$ , представленный совокупностью пар объектов вида «прототип – цифровой двойник», взаимодействие которых реализуется посредством информационных потоков:

$$dw_i^n = \{P_k, D_k\}_{k=1}^m : P_k \neq \emptyset, D_k \neq \emptyset,$$

где  $P, D$  – соответственно прототип и цифровой двойник объекта,  $k$  – индекс объекта,  $m$  – общее число объектов на уровне  $n$ ,  $dw_i^n$  –  $i$ -я подсистема множества подсистем уровня  $n$ .

Соотношения между информационными потоками, представленными в качестве выходных для прототипа и его цифрового двойника, можно представить в виде соответствия между элементами соответствующих множеств. Пусть  $I_P$  – выходной информационный поток прототипа, представленный, к примеру, в виде набора временных рядов. Тогда  $I_D$  – соответствующий ему выходной информационный поток его цифрового двойника, представленного в той же подсистеме.

В этом случае имеет место соответствие между элементами множеств  $I_P$  и  $I_D$ , представленное в виде соотношения эквивалентности вида

$$\rho \subseteq I_P \times I_D,$$

где  $\rho$  – отношение эквивалентности, основанное на декартовом произведении соответствующих множеств (в данном случае  $I_P$  и  $I_D$ ).

Указанное отношение по определению является рефлексивным, симметричным и транзитивным, т.е. имеет место система соотношения:

$$\begin{aligned} a \rho b, \forall a \in I_P, b \in I_D, \\ a \rho b \Rightarrow b \rho a, \forall a \in I_P, b \in I_D, \\ a \rho b \&\&b \rho c \Rightarrow a \rho c, \forall a \in I_P, b \in I_D. \end{aligned}$$

Очевидно, что  $I_P$  делит  $I_P$ . Если  $I_P$  делит  $I_D$  и  $I_D$  делит  $I_P$ , то они совпадают. И, наконец, если  $I_P$  делит  $I_D$  и  $I_D$  делит произвольно взятое  $I_X$ , то  $I_P$  делит  $I_X$ . Поэтому выполняются соответственно свойства рефлексивности, антисимметричности и транзитивности для данного отношения. Иными словами, имеет место соотношение следующего порядка:

$$I_P \leq I_D : a \leq b \parallel b \leq a, \forall a \in I_P, b \in I_D,$$

где  $\leq$  – отношение порядка для множеств  $I_P$  и  $I_D$ ,  $a, b$  – отдельные компоненты соответствующих кортежей данных для множеств  $I_P$  и  $I_D$  соответственно.

С учетом выделенных отношений справедливы следующие замечания. Пусть  $(I_P, \leq)$  – отношение порядка на множестве  $I_P$ . Тогда для любого  $B \subseteq I_P$  наименьшим в  $B$  будет такое  $a_0 \in B$ , что для любых  $b \in B$  выполняется соотношение вида  $a_0 \leq b$ . И наоборот, для любого  $B \subseteq I_P$  наибольшим в  $B$  будет такое  $a_0 \in B$ , что для любых  $b \in B$  выполняется соотношение вида  $a_0 \geq b$ .

Тогда предполагается, что отношение линейного порядка на множестве  $I_P$  или  $I_D$  называется отношением полного порядка, если в любом его непустом подмножестве  $B \subseteq I_P$  (или  $B \subseteq I_D$ ) найдется минимальный элемент. Соответственно, согласно известным положениям теории множеств, в том случае, если множества  $I_P$  и  $I_D$  содержат минимальные элементы, то они, в свою очередь, являются вполне упорядоченными множествами с полным порядком на отношении полного порядка.

Каждая подсистема многоуровневой системы цифровых двойников демонстрирует поведение и обладает специфическими свойствами, характерными для фрактальных множеств. В общем виде пара «прототип – цифровой двойник» повторяется на каждом уровне системы. Так, пусть уровень с индексом  $n$  представлен подсистемой цифровых двойников вида, содержащей  $m$  пар «прототип – цифровой двойник» для объектов и процессов любой природы происхождения:

$$dw^n = \{P_k, D_k\}_{k=1}^m,$$

где  $P, D$  – соответственно прототип и цифровой двойник объекта,  $k$  – индекс объекта,  $m$  – общее число объектов на уровне  $n$ ,  $dw^n$  – подсистема уровня  $n$ .

Соответственно, следующий –  $(n + 1)$ -й – уровень системы цифровых двойников представляет собой очередную связку вида «прототип – цифровой двойник». При этом подсистема предыдущего –  $n$ -го – уровня представляет собой один из компонентов этой связки, выступая в качестве прототипа или его цифрового двойника. Иными словами, имеет место соотношение следующего вида:

$$dw^{n+1} = \{P_k, D_k\}_{k=1}^p : P_k = dw_i^n, D_k = dw_{i+1}^n,$$

где  $P, D$  – соответственно прототип и цифровой двойник объекта,  $k$  – индекс объекта,  $p$  – общее число объектов на уровне  $(n + 1)$ ,  $dw^n$  – подсистема уровня  $n$ ,  $dw^{n+1}$  – подсистема уровня  $(n + 1)$ .

Аналогичные рассуждения справедливы для всех уровней, предусмотренных в соответствующей системе цифровых двойников. В результате структура многоуровневой системы цифровых двойников представляет собой объект некоторой размерности  $n$ , обладающий свойством масштабной инвариантности. В общем виде при схематическом представлении система цифровых двойников, согласно предложенной концепции, представляет собой геометрический фрактал.

Тогда, в соответствии с теоремой о самоподобных множествах, для системы цифровых двойников  $DW$  существуют такие преобразования подобия  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , что:

$$DW = S_1(DW) \cup S_2(DW) \cup \dots \cup S_n(DW).$$

Еще одно свойство, унаследованное системой цифровых двойников из теории фракталов, заключается в том, что для  $DW S_i(DW)$  попарно не пересекаются. Размерность Минковского  $d$  для системы  $DW$  цифровых двойников определяется, согласно следующему выражению:

$$Nr^d = 1.$$

Иными словами, размерность подобия системы цифровых двойников  $DW$  как самоповторяющегося множества представляет собой решение следующего уравнения:

$$r_1^d + r_2^d + \dots + r_n^d = 1,$$

где  $r_i^d$  –  $i$ -й коэффициент подобия.

Далее, снова применяя к множеству цифровых двойников теорию самоповторяющихся множеств, представляется целесообразным отметить равенство нулю  $d$ -меры Хаусдорфа всех попарных пересечений составляющих его подмножеств.

### 3. Пример многоуровневой системы цифровых двойников

Рассмотрим в качестве примера систему цифровых двойников, представленную множествами прототипов технических объектов регистрации параметров магнитного поля Земли и их цифровых двойников (рис. 1) [19. С. 648; 20. С. 23]. На базовом уровне подсистема представлена совокупностью пар «прототип – цифровой двойник» для наземных магнитных обсерваторий. Каждый компонент вектора магнитного поля представляет собой связку прототипа объекта и его цифрового двойника.

Соответственно, имеет место следующее соотношение:

$$dw_i^d = \{MC\_X_i, MC\_Y_i, MC\_Z_i, MC\_F_i\}, i = 1, \dots, n,$$

$$MC\_X_i = \{ЦД\_X, Прототип\_X\}, MC\_Y_i = \{ЦД\_Y, Прототип\_Y\},$$

$$MC\_Z_i = \{ЦД\_Z, Прототип\_Z\}, MC\_F_i = \{ЦД\_F, Прототип\_F\},$$

где  $MC\_X_i, MC\_Y_i, MC\_Z_i, MC\_F_i$  – объекты, соответствующие  $X, Y$  и  $Z$ -компонентам полного вектора геомагнитного поля в точке  $i$ , Прототип\_ $X$ , Прототип\_ $Y$ , Прототип\_ $Z$ , Прототип\_ $F$  – показатели на магнитометре значений  $X, Y, Z$ -компонент полного вектора поля в точке  $i$ , ЦД\_ $X$ , ЦД\_ $Y$ , ЦД\_ $Z$ , ЦД\_ $F$  – цифровые двойники показателя на магнитометре значений  $X, Y, Z$ -компонент полного вектора геомагнитного поля в точке  $i$ .

Следующий уровень сформирован магнитной обсерваторией, осуществляющей регистрацию параметров геомагнитного поля и его вариаций. Каждая магнитная обсерватория объединяет представленные выше связки «прототип – цифровой двойник» всех перечисленных компонент.

В свою очередь, обсерватории вместе со своими цифровыми двойниками объединяются в пары «прототип – цифровой двойник», и далее формируется новый уровень с индексом  $n = 2$ :

$$dw_i^2 = \{dw_i^1\}_{i=1}^n,$$

где  $dw_i^2$  – магнитная обсерватория или станция (прототип или цифровой двойник соответствующего технического объекта).

Магнитные обсерватории и их цифровые двойники объединяются по пространственным характеристикам и образуют пространственные кластеры, в совокупности составляющие следующий уровень системы цифровых двойников с индексом  $n = 3$ :

$$dw_i^3 = \{dw_i^2\}_{i=1}^m,$$

где  $dw_i^3$  – множество магнитных обсерваторий или станций (прототипов или цифровых двойников соответствующего технического объекта), составляющих один пространственный кластер.

Указанные пространственные кластеры подсистемы уровня  $n = 3$  объединяются далее в подсистему с индексом  $n = 4$  – наземный уровень:

$$dw_i^4 = \{dw_i^3\}_{i=1}^p,$$

где  $dw_i^4$  – множество пространственных кластеров.

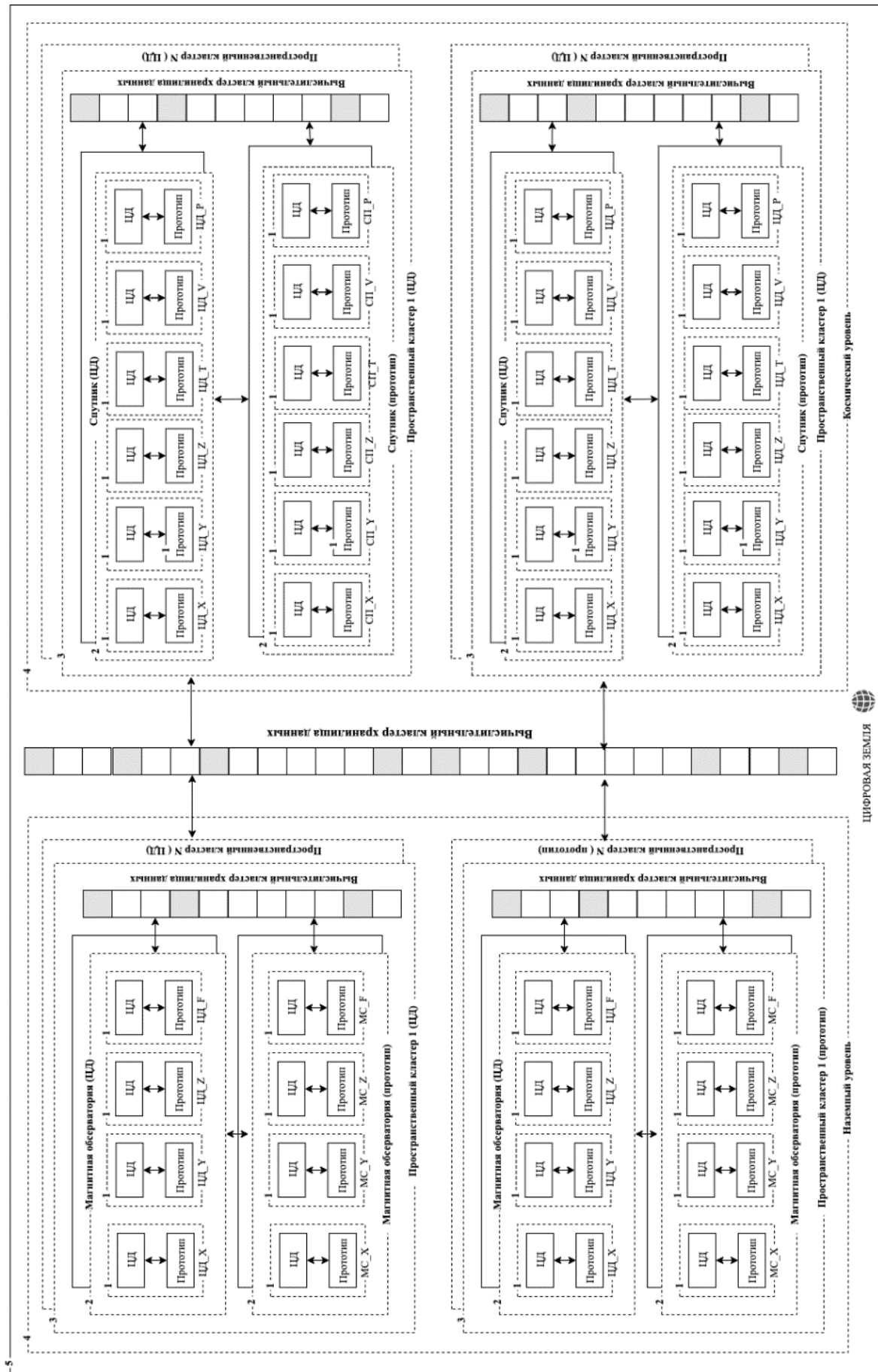


Рис. 1. Пример схемы многоуровневой системы цифровых двойников «Цифровая Земля»

Fig. 1. An example of multilevel digital twins system "Digital Earth"

Аналогичным образом формируется одноуровневый с ним космический уровень, интегрирующий информационные потоки, получаемые с искусственных спутников Земли, осуществляющих мониторинг геомагнитного поля. Если рассматривать декомпозицию подсистем в обратном направлении, то космический уровень декомпозируется на спутники (уровень  $n = 3$ ).

Для оценки эффективности решения был проведен ряд вычислительных экспериментов по пространственной интерполяции геомагнитной информации по данным проекта SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/mag/>). Результаты показали, что применение системы цифровых двойников как виртуальных моделей магнитных обсерваторий обеспечивает среднеквадратическую ошибку от 0,53 до 1,02 нТл, что укладывается в регламентируемый стандартами диапазон.

## Заключение

В результате проведенных исследований предложено решение проблемы пространственной интерполяции данных с выраженной пространственной анизотропией на основе концепции многоуровневой системы цифровых двойников. Последняя отличается тем, что для повышения эффективности и надежности процессов обработки и моделирования данных создаются пары вида «цифровой двойник – прототип», многократно повторяемые и на разных уровнях интегрируемые в отдельные пространственные кластеры, иерархически связанные друг с другом. Исследования показали значительное уменьшение величины среднеквадратической ошибки пространственной интерполяции при использовании указанного подхода на примере геомагнитных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аббасова Т.С. Развитие виртуальных инструментов для создания цифровых двойников // Информационно-технологический вестник. 2019. № 2 (20). С. 79–88.
2. Stark R., Freseman C., Lindow K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services // CIRP Annals. 2019. № 68. P. 129–132.
3. Alam K.M., El Saddik A. C2PS: a Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems // IEEE Access. 2017. P. 2050–2062.
4. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches / F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (eds.), Cham : Springer International Publishing, 2017. P. 85–113.
5. Bakhvalov Yu., Kopylov I. Training and assessment the generalization ability of interpolation methods // Computer Research and Modeling. 2015. № 7. P. 1023–1031. DOI: 10.20537/2076-7633-2015-7-5-1023-1031.
6. Ковалёв С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // Системы и средства информ. 2020. № 30:1. С. 66–81
7. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. 2013. № 2 (36). С. 24–36.
8. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Панов С.А. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов // Программные продукты и системы. 2016. № 3 (29). С. 154–161.
9. Batty M. Digital twins // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2018. № 45 (5). P. 817–820.
10. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect // Mechatronic Futures. Springer, 2016. P. 59–74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5.
11. Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing // Computers in Industry. 2019. № 113. P. 103–130. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103130.
12. Habe H., Li B., Weissenberg N., Cirullies J., Otto B. Digital twin for real-time data processing in logistics // Hamburg International Conference of Logistics (HICL). 2019. № 27. P. 3–28. DOI: 10.15480/882.2462.
13. Josifovska K., Yigitbas E., Engels G. Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems // IEEE / ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems (SEsCPS). 2019. P. 25–31. DOI: 10.1109/SEsCPS.2019.00012.
14. Halenar I., Juhas M., Juhasova B., Borkin D. Virtualization of Production Using Digital Twin Technology // 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), Krakow–Wieliczka, Poland, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765940.
15. Otto B., Hompel M., Wrobel S. International Data Spaces: Reference architecture for the digitization of industries // Digital Transformation. Springer, 2019. P. 109–128. DOI: 10.1007/978-3-662-58134-6\_8.
16. Aliyev Z. Spatial data interpolation // International Journal of Medical and Biomedical Studies. 2018. № 2. P. 7–10. DOI: 10.32553/ijmbs.v2i4.36.

17. Albarghouthi A., Berdine J., Cook B., Kincaid Z. Spatial Interpolants // ESOP 2015: Programming Languages and Systems. 2015. P. 634–660. DOI: 10.1007/978-3-662-46669-8\_26.
18. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production // Procedia Manufacturing. 2017. V. 11. P. 939–948.
19. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Подход к оценке относительной информационной эффективности магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. № 58. С. 648–652. DOI: 10.1134/S0016794018050164.
20. Воробьева Г.Р., Воробьев А.В. Подход к повышению производительности программных процессов обработки и хранения больших объемов геомагнитных данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 50. С. 23–30.

Поступила в редакцию 22 декабря 2020 г.

Vorobev A.V. (2021) THE CONCEPT OF A MULTI-LEVEL SYSTEM OF DIGITAL TWINS (ON THE EXAMPLE OF GEOMAGNETIC DATA). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 55. pp. 26–34

DOI: 10.17223/19988605/55/4

The problem of spatial interpolation of data with the required accuracy is especially relevant for processes and phenomena of natural origin, which are characterized by pronounced spatial anisotropy of information. An example of this is geomagnetic data as a result of observing the parameters of the Earth's magnetic field and its variations. Technical means of recording such data, as a rule, are limited by the possibilities of physical placement due to the high requirements for the hardware and software necessary for information and measurement monitoring, as well as the associated economic and time costs. The impossibility of placing monitoring technical means in certain geographic locations increases the information entropy of the processes that take place there and are relevant for study and observation.

The solution to this problem is partly possible by using modern geoinformation technologies, the algorithms of which allow interpolating spatial data by known values. However, the accuracy of spatial interpolation is not always satisfactory: in particular, the restoration of geomagnetic data in this way provides a root mean square error of 7.3 to 11.2 nT for various spatial regions, which significantly exceeds the error of 1 nT permissible by the standards.

In this regard, in order to solve the indicated problem, the concept of a multi-level system of digital twins of technical objects is proposed. The concept is based on the idea of multiple repetition of pairs "digital twin - physical prototype" to form a hierarchical multilevel structure of fractal type. Duplex inter-level information interaction is carried out through the use of specialized data stores that aggregate information coming from the components of the level (while the simultaneous presence of both elements of the pair is optional).

The physical prototypes are both directly technical objects and pairs of the form "digital twin - physical prototype", as a result of which the structure formed in this case functions according to the principles of information backup. The sequential creation of the levels of the system of digital twins allows to significantly increase the coverage area of the earth and near-earth surfaces by physical and virtual technical means, the functioning of which is modeled using machine learning methods that form interpolated values based on retrospective analysis of known data.

It is expected that for geomagnetic data, the use of a multilevel system of digital twins will allow collecting information on the state of the geomagnetic field and its variations in hard-to-reach geographic locations, for example, in the Arctic zone, where the placement of magnetometric equipment is extremely difficult. Studies have shown that the application of the proposed concept for solving the problem of spatial interpolation of geomagnetic data provides a root-mean-square error from 0.53 to 1.02 nT, which falls within the range regulated by the standards.

Keywords: digital twins; data processing; correlation analysis; fractal sets; spatial clusters.

VOROBIEV Andrei Vladimirovich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation).

E-mail: geomagnet@list.ru

## REFERENCES

1. Abbasova, T.S. (2019) The development of virtual tools for creating digital doubles. *Informatsionno-tehnologicheskij vestnik – Information Technology Bulletin*. 2(20). pp. 79–88.
2. Stark, R., Freseman, C. & Lindow, K. (2019) Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Annals*. 68. pp. 129–132. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.024
3. Alam, K.M. & El Saddik, A. (2017) C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems. *IEEE Access*. pp. 2050–2062. DOI: 10.1109/ACCESS

4. Grieves, M. & Vickers, J. (2017) Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S. & Alves, A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. pp. 85–113.
5. Bakhvalov, Yu. & Kopylov, I. (2015) Training and assessment the generalization ability of interpolation methods. *Computer Research and Modeling*. 7. pp. 1023–1031. DOI: 10.20537/2076-7633-2015-7-5-1023-1031
6. Kovalev, S.P. (2020) Information architecture of the power system digital twin. *Sistemy i sredstva inform – Systems and Means of Informatics*. 30(1). pp. 66–81. DOI: 10.14357/08696527200106
7. Dmitriev, V.M. & Gandzha, T.V. (2013) Principle of formation of multilevel computer models of SCADA-systems for the control of complex technological objects. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2(36). pp. 24–36.
8. Dmitriev, V.M., Gandzha, T.V. & Panov, S.A. (2016) VIP. The system of virtual instruments and devices for education and scientific experiment automation. *Programmnye produkty i sistemy – Software and Systems*. 3(29). pp. 154–161. DOI: 10.15827/0236-235X.115.154-162
9. Batty, M. (2018) Digital twins. *Environment and Planning B. Urban Analytics and City Science*. 45(5). pp. 817–820. DOI: 10.1177/2399808318796416
10. Boschert, S. & Rosen, R. (2016) Digital Twin–The Simulation Aspect. *Mechatronic Futures*. pp. 59–74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5
11. Cimino, C., Negri, E. & Fumagalli, L. (2019) Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*. 113. pp. 103–130. DOI: 10.1016/j.compind.2019.103130
12. Habe, H., Li, B., Weissenberg, N., Cirullies, J. & Otto, B. (2019) Digital twin for real-time data processing in logistics. *Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*. 27. pp. 3–28. DOI: 10.15480/882.2462
13. Josifovska, K., Yigitbas, E. & Engels, G. (2019) Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems. *IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems (SEsCPS)*. pp. 25–31. DOI: 10.1109/SEsCPS.2019.00012
14. Halenar, I., Juhas, M., Juhasova, B. & Borkin D. (2019) Virtualization of Production Using Digital Twin Technology. *20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. Krakow-Wieliczka, Poland. pp. 1–5. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765940
15. Otto, B., Hompel, M. & Wrobel, S. (2019) International Data Spaces: Reference architecture for the digitization of industries. *Digital Transformation*. pp. 109–128. DOI: 10.1007/978-3-662-58134-6\_8
16. Aliyev, Z. (2018) Spatial data interpolation. *International Journal of Medical and Biomedical Studies*. 2. pp. 7–10. DOI: 10.32553/ijmbs.v2i4.36
17. Albarghouthi, A., Berdine, J., Cook, B. & Kincaid, Z. (2015) Spatial Interpolants. *ESOP 2015: Programming Languages and Systems*. pp. 634–660. DOI: 10.1007/978-3-662-46669-8\_26
18. Negri, E., Fumagalli, L. & Macchi, M. (2017) A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production. *Procedia Manufacturing*. 11. pp. 939–948.
19. Vorobev, A.V. & Vorobeve, G.R. (2018) Podkhod k otsenke otnositel'noy informatsionnoy effektivnosti magnitnykh observatoriy seti INTERMAGNET [An approach to assessing the relative information efficiency of magnetic observatories in the INTERMAGNET network]. *Geomagnetizm i aeronomiya – Geomagnetism and aeronomy*. 58. pp. 648–652.
20. Vorobeve, G.R. & Vorobev, A.V. (2020) Approach to improving the performance of software processes for processing and storing large volumes of geomagnetic data. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 50. pp. 23–30. DOI: 10.17223/19988605/50/3