

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-8-30-37

Manuscript received 08 June 2023;
Accepted 20 July 2023

Лихтциндер Борис Яковлевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
lixt@psuti.ru

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровое моделирование, компьютерное моделирование, цифровая модель, среда моделирования, моделируемая сеть, система управления, прогнозирование

Аналитические методы состоят в преобразовании символьной информации, записанной на языке математического анализа. При использовании аналитических методов строится математическая модель объекта, например, в виде дифференциальных или интегральных уравнений. При аналитическом подходе требуемые зависимости выводятся применением математических правил. Однако, мы часто встречаемся с неразрешимостью аналитических уравнений и невозможностью получения окончательного результата в замкнутой форме. В данной статье рассматриваются различные виды моделирования и понятие "цифровой двойник", а также концепции и примеры их реализации. Отмечено, что компьютерное моделирование позволяет не только получить прогноз, но и определить, какие управляющие воздействия на систему приведут к благоприятному развитию событий между компонентами модели, являющимися отражением реальных связей. Современные производственные процессы весьма сложны и распределены в пространстве и во времени. Поэтому модели таких процессов должны учитывать распределенный характер объектов моделирования. Также проводится анализ взаимодействия цифровой модели с объектом моделирования, представляющим реальный процесс. Показано, что взаимодействие происходит через средства сопряжения, обеспечивающие сопряжение модели и объекта моделирования. Рассмотрена кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций. В качестве примера цифровых двойников, использующих модели временных рядов, рассмотрена модель временного запаздывания в телекоммуникационной сети. В качестве примера цифровых двойников, использующих модели предметной области, рассмотрена система замены аккумуляторных батарей узлов беспроводных сенсорных сетей.

Информация об авторе:

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия

Для цитирования:

Лихтциндер Б.Я. Связь и цифровые двойники // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №8. С. 30-37.

For citation:

Likhtsinder B. Ya. (2023) Communications and digital twins. T-Comm, vol. 17, no.8, pp. 30-37. (in Russian)

Введение

Не секрет, что, производя вычисления по различным формулам мы все чаще обращаемся к обычному калькулятору. Действительно, различные алгебраические действия в калькуляторе хорошо алгоритмизированы и реализованы в виде микропрограмм, что позволяет быстро произвести требуемые вычисления.

Аналитические методы состоят в преобразовании символической информации, записанной на языке математического анализа. При использовании аналитических методов строится математическая модель объекта, например, в виде дифференциальных или интегральных уравнений. При аналитическом подходе требуемые зависимости выводятся применением математических правил. Однако, мы часто встречаемся с неразрешимостью аналитических уравнений и невозможностью получения окончательного результата в замкнутой форме. Несомненно, аналитическая формула более наглядно представляет анализируемый объект или процесс, но для получения конечных цифровых результатов все равно необходимо алгоритмизировать процесс вычисления по ней. Все равно, указанные алгоритмы должны быть программно реализованы.

Развитие современной вычислительной техники позволяет производить алгоритмизацию вычислений на все более ранних стадиях процесса анализа, заменяя аналитические соотношения программно реализуемыми алгоритмическими конструкциями. Многие анализируемые объекты часто бывают настолько сложны, что получение аналитических моделей, адекватно отражающих их поведение, становится не реальным, и для таких объектов создаются программно реализуемые «цифровые двойники» [5]. Концепция «Цифровых двойников» (ЦД) широко развивается и занимает все большее место в производственных процессах. Эта концепция является частью четвертой промышленной революции, которая призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты.

Появилось множество различных противоречивых определений этого понятия. [1, 2, 3, 10-15].

С понятием «цифровой двойник» начинает происходить то же, что произошло с понятием «Интернет вещей», когда словосочетание «Интернет вещей» начинают применять ко многим технологическим телекоммуникационным сетям, в которых отсутствует «Интернет», и к офисным сетям, в которых «вещи» отсутствуют, и непосредственно взаимодействуют между собой не предметы, а операторы. Однако, все определения согласны в одном: «цифровой двойник», это – цифровая модель некоторого объекта или процесса.

Модели в цифровых двойниках

ЦД отображают некоторые *сущности*, которые являются объектами или процессами реального мира. Несмотря на многообразие сущностей (это могут быть отдельные элементы или целые производства) ЦД представляет собою некоторый программный продукт, отображающий определенные свойства указанных сущностей. Такие программные продукты могут быть разделены на *классы*. Класс в программировании является мощным средством, позволяющим структурировать

сложную систему. Класс определяет шаблон, в соответствии с которым строятся отдельные экземпляры класса. Каждый экземпляр данного класса рассматривается как самостоятельный объект. Все экземпляры одного класса имеют одинаковые перечни их свойств, однако, значения одноименных свойств для каждого экземпляра могут быть различны. Каждый экземпляр данного класса рассматривается как самостоятельный *активный объект*.

Каждый активный объект имеет структуру (совокупность включенных в него активных объектов и их связи), а также состояние, определяемые его параметрами. Каждый экземпляр активного объекта имеет свое собственное поведение, он может иметь свои значения параметров и функционирует независимо от других объектов, взаимодействуя с ними и с внешней средой.

При создании ЦД используют объектно-ориентированный подход к представлению сложных систем. Этот подход позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы с помощью иерархии абстракций. Например, на некотором уровне абстракции каждую телекоммуникационную сеть можно считать единым объектом и рассматривать взаимодействие отдельных сетей. Но, более детально сеть можно представить как совокупность взаимодействующих между собой коммутаторов. Каждый из этих коммутаторов может быть представлен, своей структурой взаимодействующих узлов, а каждый из узлов – представлен структурой взаимодействующих элементов. Экземпляры одного класса рассматриваются как одинаковые ЦД, которые могут находиться в различных состояниях. Состояния различных экземпляров описывается значениями его переменных. Взаимосвязь переменных характеризуется различными функциональными зависимостями, а изменение переменных во времени определяются значениями соответствующих таймеров (функции времени).

Любая сложная логика поведения ЦД может быть выражена с помощью комбинации дифференциальных и алгебраических уравнений, переменных, таймеров и программного кода. Алгебраические и дифференциальные уравнения, как и логические выражения, записываются обычно аналитически. Интерпретация любого числа параллельно протекающих процессов в ЦД должна быть скрыта от пользователя. Отслеживание событий во всех процессах, определенных в ЦД, должно выполняться автоматически.

Модельное и реальное время.

Поскольку ЦД представляет собой модель, понятие модельного времени является базовым в системах. Модельное время – это условное логическое время, в единицах которого определено поведение всех объектов ЦД. Модельное время может изменяться либо непрерывно, если поведение объектов описывается дифференциальными уравнениями, либо дискретно, переключаясь от момента наступления одного события к моменту наступления следующего события, если присутствуют только дискретные события. Моменты наступления всех планируемых событий хранятся в так называемом календаре событий, откуда выбирается наиболее раннее событие для выполнения связанных с ним действий.

Ускоренная работа компьютера, по сравнению с реальными процессами, позволяет осуществить прогнозирование и, на основе прогноза, повысить качества управления объектом.

Цифровые двойники в ифокоммуникациях

В отрасли связи ЦД также нашли свое отражение. В [5] указаны направления в эксплуатационной поддержке ифокоммуникационных сетей с использованием ЦД:

Развитию концепции ЦД в связи несомненно будет способствовать представленная на рисунке 1 [5] кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций (КДМ), состоящая из горизонтальных и вертикальных доменов.

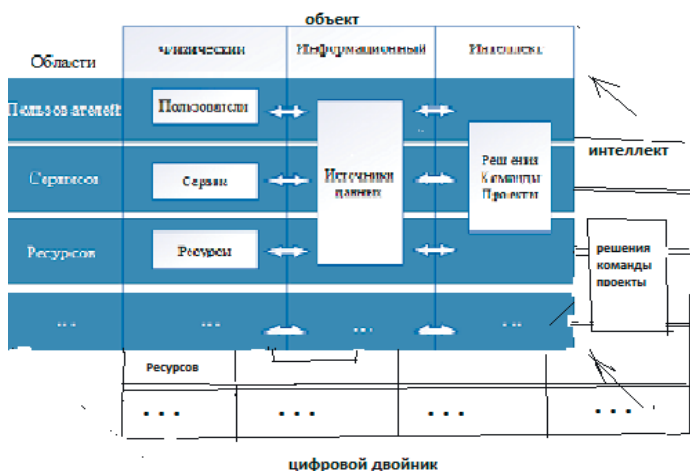


Рис. 1. Кросс-доменная модель управления функциями телекоммуникаций (КДМ)

Вертикальный Физический домен (ФД) включает в себя физические «сущности», отражающие работу оператора в реальности: физическую инфраструктуру, услуги, клиентов другие физические объекты. Вертикальный Информационный домен включает информацию о физическом домене, получаемую от различных источников. Интеллектуальный домен включает человеческий фактор.

Именно Информационный домен служит основой при разработке ЦД управления сетью связи. Горизонтальные стрелки отражают интерфейсы связей, с помощью которых происходит обмен между вертикальными доменами. В рассматриваемой КДМ предполагается, что в ЦД отсутствуют домены физический и интеллектуальный, а весь ЦД размещается в информационном домене. С этим трудно согласиться, поскольку ЦД имеет также свое физическое воплощение и свою интеллектуальную (когнитивную) часть (он проектируется и управляется). Возможно, было бы целесообразно размещать ЦД на отдельной параллельной плоскости, содержащей все три домена (физический, информационный и интеллектуальный). В этом случае средства сопряжения между ЦД и объектом отображались бы как связи между указанными плоскостями, как это показано на рисунке 1.

Способы моделирования

Существует два различных способа моделирования [16, 17]:

Первая разновидность отвечает на вопрос: «Что будет, если объект подвергнется данному воздействию (или, в частном случае, воздействия будут отсутствовать)? Такое моделирование называют «прямым» (рис. 2а).



Рис. 2. Способы моделирования

Вторая разновидность отвечает на вопрос: «Какие воздействия необходимо сделать, чтобы объект моделирования пришел в требуемое состояние»? Такое моделирование называют «обратным», и оно требует гораздо больших временных затрат (рис. 2б). И только появление высоко производительных вычислительных средств позволило во многих случаях осуществлять «обратное» моделирование в реальном масштабе времени,

Часто считают одним из требований, предъявляемых к моделям, составляющим цифровые двойники то, что моделируемые процессы должны протекать в модели не медленнее, чем они протекают в реальном масштабе времени. Однако, это не вполне так. Разве цифровой файл, на котором записано изменение некоторого процесса во времени, нельзя считать цифровым двойником этого процесса.

Изменение быстро протекающего процесса может быть воспроизведено и визуализировано в замедленном масштабе времени. Если же, наоборот, моделирование происходит быстрее, чем в реальном масштабе времени, модели могут быть синхронизированы с моделируемым объектом или использованы для получения прогнозирующей информации о состоянии объекта [7-9]. Прогнозирование позволяет компенсировать запаздывания в цепях управления и тем самым, повысить качество регулирования в системах с обратной связью. Оно позволяет повысить скорость реагирования управляющей системы на изменения состояния объекта.

Структура цифровых двойников

ЦД отличаются от обычных моделей наличием связей, аналогичных тем, с помощью которых моделируемый объект общается с внешним миром, и называемых средствами сопряжения. Указанные связи представлены на рисунке 3 (на рис. 1 средства сопряжения показаны стрелками между плоскостями).

Если поведение таких объектов носит непрерывный характер, то информация об объекте, вводимая в модель, должна быть преобразована в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а результаты цифрового моделирования могут быть преобразованы в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Цифровая информация, находящаяся в базах объекта моделирования, обменивается с моделью через цифровые преобразователи (ЦП). В различных случаях отдельные средства сопряжения могут отсутствовать.

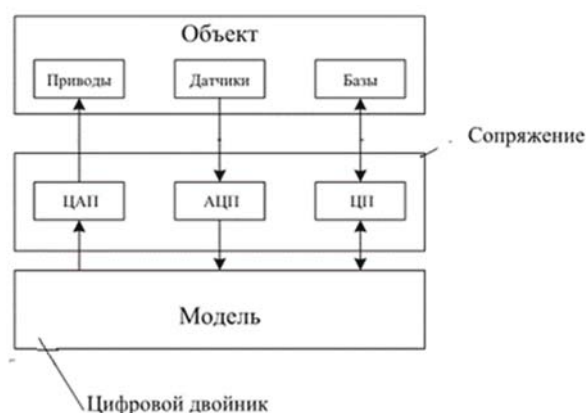


Рис. 3. Структура цифрового двойника

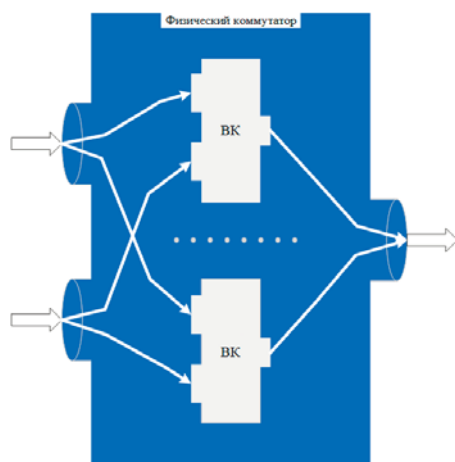


Рис. 4. Виртуальные коммутаторы

Примером цифровых двойников в телекоммуникациях, могут служить «виртуальные коммутаторы» (рис. 4). Реальные физические коммутаторы часто выполняются как объединение в одном устройстве нескольких (порядка сорока) независимых программных моделей, имеющих единую память и общие с физическим коммутатором порты ввода и вывода информации. Все такие виртуальные коммутаторы одинаковые и являются цифровыми двойниками, имеющими общие средства сопряжения.

Аналогично, в качестве цифровых двойников обычных телефонных аналоговых каналов можно считать цифровые «виртуальные каналы».

Модель на основе предметной области

Различают два вида моделей, применяемых при создании ЦД. Это – модели предметной области и модели временных рядов. В качестве примеров ЦД с моделями предметной области, следует отнести рассмотренные выше виртуальные коммутаторы, а также модели, применяемые при осуществлении подзарядки или замены аккумуляторных батарей элементов беспроводных сенсорных сетей (БСС), с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [6]. Рассмотрим алгоритм работы такой системы:

Имеется сеть сенсорных узлов I с перезаряжаемыми аккумуляторными батареями.

Аккумуляторы заменяются путем доставки и замены на стационарной станции сенсорных узлов с помощью дрона D . Требуется определить последовательность замены аккумуляторов с тем, чтобы в процессе замены ни один из аккумуляторов не успевал полностью разрядиться, при этом, время, затраченное дроном в работе (коэффициент загрузки дрона) было бы минимальным.

На центральной базе всегда имеются готовые для замены узлы с заряженными аккумуляторами. На центральную базу поступает по сети информация о степени зарядки аккумуляторов всех сенсорных элементов.

Атрибуты сенсорного устройства:

T – время от начала полного цикла облета и зарядки всех сенсорных элементов дроном D .

N – Число сенсорных устройств.

I – Идентификатор сенсорного устройства.

$Z(I; T)$ – Уровень заряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$\{Z(I; T)\}$ – Массив уровней заряда аккумуляторов устройств I в момент времени T .

$ZMAX(I)$ – Максимальный уровень заряда аккумулятора устройства I .

$ZMIN(I)$ – Минимальный уровень заряда аккумулятора устройства I .

$TR(T; I)$ – время, необходимое для полной разрядки, аккумулятора устройства I , с момента T .

$T(I)$ – Множество остаточных времен работы аккумуляторов в цикле.

$TMIN$ – Остаточное время работы минимально заряженного аккумулятора в течение полного цикла.

$Cort\ TR(T; I)$ – Кортж значений $TR(T; I)$ – в порядке их возрастания.

$VZ(I; T)$ – Скорость заряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$VR(I; T)$ – Скорость разряда аккумулятора устройства I в момент времени T .

$VRmax(I)$ – Максимальная скорость разряда аккумулятора устройства I .

$X(I, I)$ – Координаты сенсорного устройства I .

$L(I)$ – Расстояния от базы до сенсорного устройства I .

Атрибуты дрона:

D – Идентификатор дрона.

$X(DT), Y(DT)$ – Координаты дрона D в момент времени T .

$L(DIT)$ – Расстояние от дрона D до сенсорного элемента I в момент времени T .

$V(D)$ – Скорость перемещения дрона в направлении сенсорных устройств.

$TC(D)$ – Время цикла полного облета дроном D всех сенсорных устройств.

$TC(D; I)$ – Время цикла подзарядки дроном D сенсорного устройства I .

$T(D; I)$ – Время, необходимое для прилета дрона от станции до сенсорного устройства I .

TO – Время, необходимое для обслуживания сенсорного устройства.

$T(O; I)$ – Время, необходимое для прилета и обслуживания дрона сенсорного устройства I .

Известны координаты $X(I)$, $Y(I)$ – сенсорного устройства I , а также координаты центральной базы XB и YB . Следовательно, известны LI – расстояния от базы до сенсорного устройства I .

$Z(I; 0)$ – Уровень заряда аккумулятора сенсорного устройства I в момент начала цикла, при $T=0$.

Степень заряженности аккумулятора будем характеризовать временем, необходимым для его

Полной разрядки, начиная с момента T .

$$TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}.$$

Время, необходимое для прилета дрона от станции до сенсорного устройства I , определяется:

$$T(D; I) = \frac{L(D; I; T)}{VD}.$$

Время, необходимое для обслуживания дрона сенсорного устройства $TO(D; I)$.

Время, полного полета дрона и обслуживания сенсорного устройства I .

$$TPO(D; I) = TP(D; I) + TO(D; I).$$

Алгоритм

1. Начало полного цикла $T = 0$.
2. Ввести данные массива $\{Z(I; T)\}$, ввести N . $K=0$.
3. Определить минимальные времена до полной разрядки сенсорных устройств I .
4. $TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}$; $I = 1 \dots N$
5. Отнести $TR(T; I)$ к множеству $\{TR(T; I)\}$.
6. Выбрать минимальный элемент. $TR(T; I) \min$ множества $\{TR(T; I)\}$ и определить значение I .
7. Выбранный элемент $TR(T; I) \min$ отнести в множество $\{TR(T; I) \min\}$
8. Моделируется время. $TPO(D; I) = TP(D; I) + TO(D; I)$.
9. Определяется время окончания обслуживания $T = T + TPO(D; I)$.
10. Определяется остаточный заряд для каждого сенсорного устройства $J \neq I$, в момент окончания обслуживания текущего сенсорного устройства I
 $Z(J; T) = Z(J; T) - T(D; I) \cdot VR \max(J)$.
11. Определяется остаточный заряд сенсорного устройства I на момент окончания обслуживания текущего сенсорного устройства I . $Z(I; T) = Z \max(I)$.
12. Определяется минимальный остаточный заряд для каждого сенсорного устройства I , в момент возвращения на базу дрона после окончания обслуживания текущего сенсорного

устройства I . $Z(I; T) = Z(I; T) - TP(D; I) \cdot VR \max(I)$. Создается массив $\{Z(I; T)\}$.

13. Определяются $TR(T; I)$ – модельные времена, для полной разрядки, аккумуляторов устройств I ,

$$14. TR(T; I) = \frac{Z(I; T)}{VR \max(I)}; I = 1 \dots N$$

15. Отнести $TR(T; I)$ к множеству $\{TR(T; I)\}$.

16. Выбрать минимальный элемент. $TR(T; I) \min$ множества $\{TR(T; I)\}$ и определить значение I .

17. Выбранный элемент $TR(T; I) \min$ отнести в множество $\{TR(T; I) \min\}$

18. $k = k + 1$,

19. Если $k < N$, перейти к пункту 7.

20. Выбрать и вывести минимальный элемент $TMIN$ множества $\{TR(T; I) \min\}$.

21. Если $TMIN < 0$, вывести «подзарядка не выполняема».

22. Если $TMIN > \Delta T$ перейти к пункту 2.

23. Включить таймер ожидания начала полетов на время $TMIN > 0$.

24. Конец

Элемент $TMIN$ – Остаточное время работы минимально заряженного аккумулятора в течение полного цикла, т.е. допустимое время ожидания очередного вылета, с момента окончания полного цикла моделирования.

Приведенный нами алгоритм подзарядки или замены элементов питания сенсорных узлов БСС с использованием БПЛА позволяет создать ЦД процесса обслуживания БСС и существенно увеличить время работы как элементов БСС, так и сети в целом.

Модель на основе временных рядов

В качестве примера ЦД, на основе временных рядов рассмотрим модель временного запаздывания в телекоммуникационной сети.

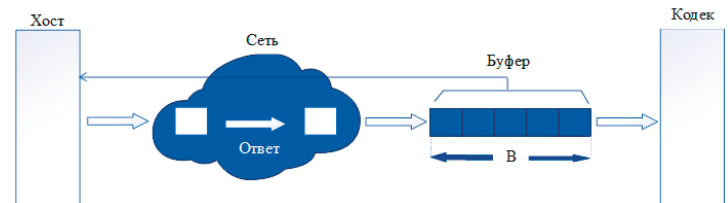


Рис. 5. Система буферизации видеотрафика

Указанная модель применяется для управления системой буферизации в сетях передачи потокового видеотрафика, представленной на рисунке 5 [4]. Информация запрашивается от хоста видеокодеком и передается ему в виде отдельных сегментов, между которыми следуют паузы.

В процессе передачи трафика происходят его задержки в сети. Задержки зависят от текущей загрузки различных участков сети, которая непрерывно изменяется во времени. Для уменьшения влияния задержек пакеты трафика буферизируются на приемной стороне.

Из буфера в кодек поступает равномерный поток со скоростью воспроизведения. Размер буфера B контролируется и через определенные промежутки времени, по мере уменьшения числа пакетов в буфере, производятся запросы, которые через сеть поступают к хосту. Хост направляет в качестве ответов очередные порции трафика, которые вновь проходят через сеть и пополняют буфер. Размер буфера стараются поддерживать постоянным. В процессе управления, видеотрафик периодически запрашивается. Качество регулирования размеров буфера может быть повышено, если в системе постоянно учитывать указанные задержки и осуществлять их прогнозирование.

Реализация процесса введения сигнала опережения поясняется на рисунке 6. Для определения задержек трафика в сети в нее периодически поступают тестирующие пакеты от тестера (в качестве тестирующих, могут быть использованы сигналы запроса пакетов). Пакеты, пройдя по сети до сервера и возвратившись обратно, обеспечивают определение круговых задержек сети.

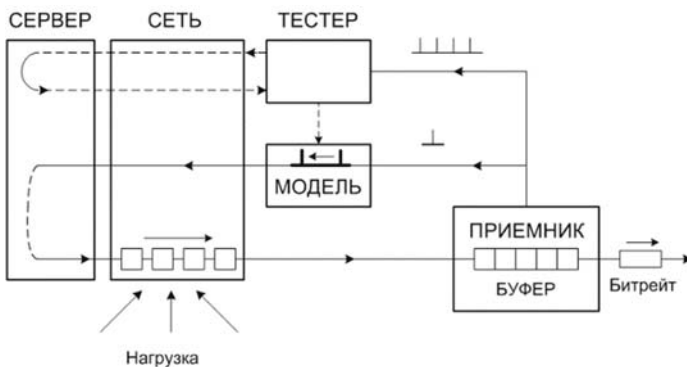


Рис. 6. Введение прогноза в цепь обратной связи

Получаемая информация обрабатывается, и в результате обработки формируется модель процесса запаздывания. На основании полученной модели производится прогнозирование запаздывания на расчетный момент подачи команды запроса очередного блока видеотрафика. Команда запроса подается с опережением, (по отношению к расчетной) на величину спрогнозированного запаздывания.

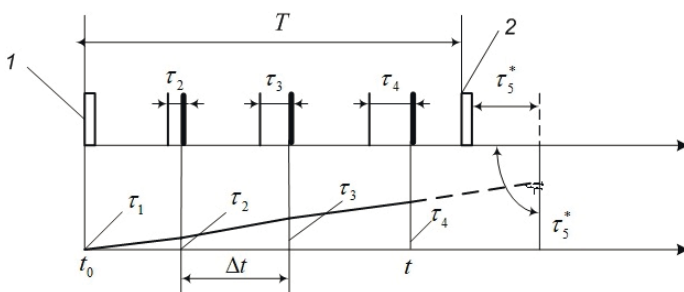


Рис. 7. Прогнозирование задержки τ^*

На рисунке 7. Показан процесс прогнозирования и учета задержки в сети. Команды запроса, поступающие циклично от приемника к передатчику обозначены цифрами 1. Цифрой -2 обозначена команда, поданная в данном цикле с опережением во времени на величину τ_5^* . T -обозначает время цикла,

без учета коррекции. В процессе функционирования приемник циклически посылает тестовые сигналы. Передатчик после получения сигнала, задержанного сетью, посылает приемнику ответный сигнал. Ответный сигнал также задерживается сетью и поступает в приемник. Таким образом, приемник определяет круговые задержки прохождения тестового сигнала по сети.

Значения задержек в моменты опроса обозначены буквами $\tau_1, \dots, \tau_5$. В соответствии с указанными задержками, формируется математическая модель, а на основании выбранной модели, производится прогнозирование значения требуемой задержки очередной команды запроса трафика.

На рисунке 7, на основании обработки результатов тестов $\tau_1, \dots, \tau_5$ получается прогнозируемое значение времени задержки τ^* . Очередной запрос -1 передается с опережением на время τ^* (обозначен цифрой 2), в результате чего происходит компенсация сетевых задержек и повышается качество процесса регулирования.

Если же требуемое время компенсации задержки τ^* окажется настолько большим, что запрос -2 должен поступить раньше, чем закончатся расчеты, то указанный запрос поступит непосредственно сразу же, после завершения расчетов.

В качестве модели процесса изменения задержек в сети может быть выбраны вейвлеты или разностные интерполяционные формулы, (например, формула Ньютона).

$$\tau^* = \tau_0 + u \Delta^{(1)} \tau_0 + \frac{u(u-1)}{2} \Delta^{(2)} \tau_0 + \dots,$$

где $u = \frac{t - t_0}{\Delta t}$ – число шагов, начиная от t_0 , t – величина

шага во времени, а $\Delta^{(i)} \tau_0$ – разности i -го порядка. Практика показала, что вполне можно ограничиться разностями третьего порядка.

Заключение

Несмотря на различие определений, цифровой двойник представляет собою цифровую модель некоторого объекта. Однако для того, чтобы считаться цифровым двойником, модель должна быть снабжена средствами сопряжения с объектом и должна иметь возможность постоянного обмена информацией с объектом. Для получения возможности прогнозирования моделируемого процесса, модель ЦД должна иметь достаточное быстродействие, обеспечивающее моделирование в реальном масштабе времени. Весьма полезной для понимания, следует считать Кросс-доменную модель управления функциями телекоммуникаций. Однако, ЦД имеет также свое физическое воплощение и свою интеллектуальную (когнитивную) часть (он проектируется и управляется). Возможно, было бы целесообразно размещать ЦД на отдельной параллельной плоскости, содержащей все три домена (физический, информационный и интеллектуальный). В этом случае, средства сопряжения между ЦД и объектом отображались бы как связи между указанными плоскостями. Приведенные примеры свидетельствуют о возможности широкого использования концепции ЦД в сфере телекоммуникаций.

Литература

1. Potcharov A. S., Saklakov V. M. Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. elibrary.ru (2018). Article in the collection of works of the All-Russian scientific and practical conference.
2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)
3. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>
4. Лихтциндер Б. Я. Патент №2746716. Способ управления буферной памятью потокового видео. 01.12.2022.
5. Гольдштейн А. Б., Кисляков С. В. Цифровой двойник для управления сетью связи // Вестник связи. 2021. №7. С. 27-32.
6. Лихтциндер Б. Я., Маслов О. Н. Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети. Патент 2730468 от 24.08.2020.
7. Тиханьчев О. В. Прогнозирование при управлении динамическими системами // Программные продукты и системы. Т.30. №17. 2017. С. 40-44.
8. Тиханьчев О. В., Саятин О. В. Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. 2015. № 4. С. 3-7.
9. Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Активный прогноз. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. 101 с
10. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровой_двойник.
11. Гончаров А. С., Саклаков В. М. Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. 2018.
12. Jack Reid and Donna Rhodes. Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs // Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
13. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
14. Jack Reid and Donna Rhodes. Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs // Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
15. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
16. Боев В. Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.
17. Коровин А. М. Моделирование систем: учебное пособие к лабораторным работам. Челябинск: Издательский центр Юргу, 2010. 47 с.

COMMUNICATIONS AND DIGITAL TWINS

Boris Ya. Likhttsinder, Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, lixt@psuti.ru

Abstract

This article discusses various types of modeling and the concept of "digital twin", as well as concepts and examples of their implementation. It is noted that computer modeling allows not only to obtain a forecast, but also to determine which control actions on the system will lead to a favorable development of events between the components of the model, which are a reflection of real relationships. Modern production processes are very complex and distributed in space and time. Therefore, models of such processes should take into account the distributed nature of the modeling objects. An analysis of the interaction of the digital model with the simulation object representing the real process is also carried out. It is shown that the interaction occurs through interfaces that provide interface between the model and the simulation object. A cross-domain model for managing telecommunications functions is considered. As an example of digital twins using time series models, a model of time delay in a telecommunications network is considered. This model is used to control the buffering system in networks for the transmission of streaming video traffic.

Keywords: digital twin, digital simulation, computer simulation, digital model, simulation environment, simulated network, control system, forecasting

References

1. A.S. Potcharov, V.M. Saklakov (2018). Digital Double: a review of existing solutions and prospects of technology development. elibrary.ru. All-Russian scientific and practical conference.
2. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST\\$double](https://ru.wikipedia.org/wiki/Cifrovo_@CAP_FIRST$double)
3. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb>
4. B.Ya. Lichtzinder. Patent No. 2746716. A method for managing the buffer memory of streaming video. 01.12.2022
5. A.B. Goldshtein, S.V. Kislyakov (2021). Digital twin for communication network management. *Communication Bulletin*, no. 7, pp. 27-32.
6. B.Ya. Likhtzinder, O.N. Maslov. A method for recharging batteries in a wireless sensor network. Patent 2730468 dated 08/24/2020.
7. O.V. Tikhanychev (2017). Forecasting in the management of dynamic systems. *Software products and systems*, vol. 30, no. 17, p. 40-44.

8. O.V. Tikhanychev, O.V. Sayapin (2015). Operational forecasting of the development of the situation as the basis for successful management of the use of troops (forces). *Military Thought*, no. 4, pp. 3–7.
9. D.A. Novikov, A.G. Chkhartishvili (2002). *Active forecast*. Moscow: Publishing house IPU RAS, 101 p.
10. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Digital twin](https://ru.wikipedia.org/wiki/Digital_twin).
11. A.S. Goncharov, V.M. Saklakov (2018). Digital twin: review of existing solutions and prospects for technology development. *library.ru. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*.
12. Jack Reid and Donna Rhodes (2016). Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, *Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology*.
13. M. Grieves (2016). Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
14. Jack Reid and Donna Rhodes (2016). Digital system models: An investigation of the nontechnical challenges and research needs, *Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology*.
15. M. Grieves (2016). Origins of the Digital Twin Concept, pp. 226-242. Springer, Montreal. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. enterprises.
16. V. D. Boev (2014). *Computer modeling: A manual for practical classes, coursework and diploma design in AnyLogic7*. St. Petersburg: VAS, 432 p.
17. A.M. Korovin (2010). *Modeling of systems: textbook for laboratory work*. Chelyabinsk: Yurgu Publishing Center, 47 p.

Information about author:

Boris Ya. Likhttsinder, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Povolzhskiy State University of Telecommunication and informatics, Samara, Russia