

6G с поддержкой цифровых двойников:

видение, архитектура
и перспективы развития

Приложения «Интернета всего» (IoE, Internet of Everything), такие как хептика (тактильные ощущения), взаимодействие человека с компьютером и расширенная реальность, использующие беспроводные системы шестого поколения (6G), предъявляют серьезные требования к показателям качества связи — задержке, надежности, скорости передачи данных и ощущению пользователя удовлетворенности качеством работы сервисов. Таким образом, для работы «Интернета всего» через 6G-сети требуется новая структура управления, эксплуатации и оптимизации беспроводной системы 6G и базовых услуг «Интернета всего». Предполагается, что основой новой структуры могут стать цифровые двойники. Они используют виртуальное представление физического уровня 6G в сочетании с соответствующими алгоритмами (например, машинного обучения, оптимизации), коммуникационными технологиями (например, миллиметровая и терагерцевая связь), вычислительными системами (например, периферийными и облачными вычислениями), а также технологиями, связанными с конфиденциальностью и безопасностью (например, блокчейн). В статье мы расскажем об основах функционирования 6G с цифровыми двойниками и представим компоненты архитектуры и тенденции развития, а также периферийные, облачные и периферийно-облачные двойники. Кроме того, мы дадим сравнительное описание различных двойников. И наконец, наметим и порекомендуем направления для будущих исследований.

Латиф У. Хан (Latif U. Khan)

Валид Саад (Walid Saad)

Дусит Ниято (Dusit Niyato)

Чжу Хан (Zhu Han)

Чунг Сеон Хонг (Choong Seon Hong)

Введение

Ландшафт исследований в области беспроводной связи быстро расширяется, захватывая новые применения «Интернета всего», такие как расширенная реальность (XR, extended reality), хептика, нейрокомпьютерное взаимодействие и летательные аппараты [1]. Чтобы соответствовать разнообразным требованиям этих сервисов (например, к задержке, надежности связи и удовлетворенности пользователей), беспроводные системы шестого поколения должны обладать определенными ключевыми свойствами [2–4]:

- Автономные беспроводные системы: предлагая различные новые сервисы «Интернета всего», беспроводные системы 6G будут полагаться на повсеместную, интеллектуальную и бесперебойную связь с огромным числом подключенных устройств. Эти сервисы требуют серьезной адаптации к динамически меняющейся среде и оптимизации ограниченных вычислительных и коммуникационных ресурсов. Поэтому, чтобы обеспечить работу сервисов IoE посредством 6G, необходимо создать автономные беспроводные системы, способные работать с минимальным вмешательством со стороны конечных пользователей. Такие автономные системы могут выполнять эффективную адаптацию и оптимизацию сетевых ресурсов, используя среди прочего новые методы машинного обучения, теории оптимизации, теории игр и теории сопоставления.

- Беспроводные системы на основе проактивного онлайн-обучения: IoE-приложения на основе 6G должны соответствовать высокодинамичным и экстремальным требованиям с точки зрения задержки, надежности, скорости передачи данных и ощущения пользователя удовлетворенности качеством работы сервисов. Чтобы выполнить эти требования, 6G будет использовать и высокочастотные диапазоны (например, миллиметровые, субтерагерцевые и терагерцевые), новые вычислительные технологии (например, облачные и периферийные вычисления) и технологии, обеспечивающие безопасность (в частности, блокчейн). Для успешной интеграции этих технологий нельзя полагаться на классические офлайн-системы обучения, вместо этого необходимы онлайн-решения, способные проактивно адаптироваться к динамично меняющимся условиям работы 6G-сетей.

Для эффективного использования перечисленных свойств беспроводных сетей 6G необходимо изучить концепцию цифровых двойников. Цифровой двойник — это виртуальное представление элементов и динамики физической системы [5, 6]. Для изучения динамики конкретной системы цифровой двойник использует машинное обучение, анализ данных и мультифизическое моделирование. Цифровые двойники можно разделить на цифровые двойники для мониторинга, моделирования и операционные цифровые двойники. Двойник для

мониторинга выполняет мониторинг состояния физической системы (в частности, приборной панели беспилотного автомобиля), тогда как двойник-модель за счет различных инструментов моделирования и машинного обучения прогнозирует состояния моделируемых систем. Кроме анализа системы, операционный двойник позволяет системным операторам взаимодействовать с ней и выполнять над ней различные действия. В нескольких работах рассматривались цифровые двойники для реализации «Индустрии 4.0» [5–7]. Так, в [5] была предложена таксономия блокчейна для цифровых двойников, в [6] авторы анализировали применение цифровых двойников в «Индустрии 4.0», а в [7] рассмотрели архитектуру цифровых двойников для «Индустрии 4.0». В отличие от работ [5–7] мы исследуем роль цифровых двойников в создании беспроводных систем 6G. При проектировании систем 6G операционный цифровой двойник позволяет обеспечить эффективное взаимодействие между различными элементами 6G, которое без такого операционного двойника было бы невозможно, поскольку другие двойники (например, двойники для моделирования и мониторинга) могут лишь анализировать киберфизическую систему, не управляя ею в реальном времени. Поэтому мы сосредоточимся на применении операционного цифрового двойника для управления системами 6G. В частности, цифровой двойник будет использовать виртуальное представление физической системы 6G, обеспечивая работу приложений IoE, включая технологии связи, вычислений, безопасности и конфиденциальности. Для оптимизации связи и вычислительных ресурсов сетей 6G цифровой двойник будет применять алгоритмы машинного обучения и оптимизации. Если не указано иное, в дальнейшем термин «цифровой двойник» будет относиться к операционному двойнику. Наш основной вклад заключается в следующем:

- Мы представляем основные требования к проектированию систем 6G, работающих при поддержке цифровых двойников. Этими требованиями являются разделение, масштабируемая интеллектуальная аналитика, управление данными на основе блокчейна, а также масштабируемость и надежность.
 - Мы предлагаем архитектуру 6G, поддерживаемую цифровыми двойниками, и представляем ее различные варианты, основанные на способах использования двойников.
 - Наконец, мы представляем перспективные направления будущих исследований.
- Насколько нам известно, это первая работа по изучению систем 6G с поддержкой цифровых двойников. В отличие от опубликованных ранее работ [1–3] по теме 6G в нашей статье представлена новая перспектива для исследований интеллектуальных автономных беспроводных систем 6G на базе цифровых двойников.

Основные требования к проектированию

В этом разделе мы представляем ключевые требования, необходимые для создания цифрового двойника для беспроводных систем 6G (рис. 1): разделение, масштабируемая интеллектуальная аналитика и управление данными на основе блокчейна. Для реализации указанных

требований необходимы масштабируемые и надежные архитектура и алгоритмы. Для анализа динамики системы цифровой двойник будет использовать виртуальное представление системы. Например, в 6G он будет виртуально представлять:

- физическую беспроводную систему (например, интеллектуальные отражающие поверхности с транспортными линиями связи);
- типичный прикладной физический объект 6G (например, беспилотный автомобиль, завод

«Индустрии 4.0» или система электронного здравоохранения);

- конкретный модуль (в том числе модуль пограничного кэширования, модуль вычислительной разгрузки на периферии).
- На основе анализа, выполняемого цифровым двойником в отношении запрашиваемого пользователем IoE-сервиса, осуществляются действия, необходимые для предоставления запрашиваемого сервиса 6G. Для облегчения управления сетью потребуется эффективное



а



б

Рис. 1. а) Основные требования к разработке; б) преимущества архитектуры на основе двойников

взаимодействие моделей цифровых двойников с другими технологиями, позволяющее проводить анализ и осуществлять управление ею (более подробная информация об архитектуре будет представлена далее). Для обучения моделей цифровых двойников можно использовать данные, генерируемые IoT-устройствами. В дополнение к этим данным в блокчейне будут храниться предварительно обученные модели двойников, которые можно использовать для обучения других моделей двойников с привлечением вновь получаемых данных для повышения эффективности. Такой способ обновления моделей двойников позволяет постепенно улучшать общую эффективность за счет вновь добавленных данных. Далее мы подробно обсудим требования для включения цифрового двойника в 6G.

Разделение

Преобразование физической системы в цифрового двойника в первую очередь основано на разделении. Разделение в контексте цифровых двойников может быть двух типов: разделение информации и системных функций (рис. 1а). Разделение информации позволяет преобразовать информацию о физической системе (то есть о состоянии системы) в усредненное цифровое представление, которое обеспечит универсальность и упростит внедрение цифровых двойников. Более того, усредненное цифровое представление помогает цифровым двойникам легко осознавать динамически меняющиеся состояния уровня физического взаимодействия. Пространство физического взаимодействия 6G состоит из базовых станций (BS), интеллектуальных отражающих поверхностей, интеллектуальных устройств/датчиков и периферийных/облачных серверов. Примеры информации из пространства физического взаимодействия 6G: сигналы от датчиков системы управления производственными процессами, голографические изображения, информация от тактильных датчиков, данные об использовании спектра 6G, данные о ресурсах периферийных серверов и т. п. С другой стороны, чтобы обеспечить гибкую работу беспроводной системы при помощи цифровых двойников, необходимо эффективно отделить системные функции аппаратного обеспечения — такие как управление мобильностью, распределение ресурсов, пограничное кэширование и т. д. — от программного обеспечения. Разделение системных функций позволит системе на основе цифровых двойников работать эффективно и адаптивно в соответствии с текущей динамикой сети — другими словами, позволит сетям 6G быть самодостаточными. Для реализации цифровых двойников сетей 6G перспективными основами могут стать программно-определяемые сети (SDN) и виртуализация сетевых функций (NFV). SDN обеспечивают разделение между плоскостью управления и плоскостью данных, тогда как NFV предоставляет экономичное решение для реализации различных сетевых функций с использованием виртуальных машин, работающих на стандартном оборудовании. Хотя SDN и NFV являются ключевыми средствами сегментирования сети,

6G с поддержкой цифровых двойников будет отличаться от классической сегментированной сети. В отличие от сегментированной сети 6G на базе цифровых двойников будет использоваться цифровое представление физической системы. Цифровое представление с машинным обучением позволит заранее анализировать и моделировать различные системные функции. Эти обученные модели будут храниться в блокчейне для их дальнейшего использования (более подробно это будет обсуждаться далее). В целом, систему 6G на основе цифровых двойников можно рассматривать как сложную концепцию, которая выполняет автономный анализ (например, упреждающую аналитику или анализ полученных данных) и предварительное обучение моделей двойников с использованием сохраненных в блокчейне данных) и управление в реальном времени. Однако сегментация сети позволит управлять ресурсами в реальном времени, реагируя на запросы конечных пользователей. Таким образом, мы можем сказать, что для эффективного управления система 6G на базе цифровых двойников будет применять сегментацию сети в дополнение к другим технологиям, среди которых разделение данных, блокчейн, проактивная аналитика и оптимизация.

Масштабируемая интеллектуальная аналитика

Система 6G должна выполнять предъявляемые к ней разнородные системные требования, поддерживать различные сетевые структуры и аппаратные архитектуры. Следовательно, беспроводные системы 6G на базе цифровых двойников должны основываться в первую очередь на эффективных схемах машинного обучения, выполняемого с помощью большого набора данных [3]. Однако подобное обучение сталкивается с различными проблемами, такими как необходимость иметь дело со сложной моделью машинного обучения большого размера и высокой вычислительной мощности, требующейся для процесса обучения. Например, неглубокие нейронные сети могут иметь лучшую масштабируемость с точки зрения вычислительной мощности для обучения на основе большого набора данных, но в высокодинамичных сценариях (например, для управления мобильностью, распределения ресурсов и пограничного кэширования) их эффективность будет невелика. В то же время использование модели на основе глубокого обучения может оказаться невозможным, если требуемая длительность обучения слишком велика. Для решения этих проблем можно использовать распределенные модели, основанные на глубоком обучении. Применение распределенных моделей позволит сократить время обучения за счет обучения отдельных, разделенных моделей в разных местах. После расчета отдельных моделей двойников на разных вычислительных ресурсах все обученные модели объединяются. Этот процесс итеративно повторяется до полной сходимости. Причем время вычислений, которое понадобится для создания полноценной модели двойника, и время, затрачиваемое

на передачу данных, имеют обратную зависимость: при увеличении числа распределенных машин время вычисления модели уменьшается, а время передачи данных возрастает. Однако существует некая точка насыщения, после которой время обучения (или сумма времени вычислений и времени связи) не показывает заметного роста при увеличении количества машин [8]. Поэтому, чтобы преодолеть данное ограничение, мы должны определить новые масштабируемые схемы машинного обучения. При реализации масштабируемой распределенной модели двойников на основе машинного обучения многообещающим решением может стать федеративное (совместное) обучение с разрежением. При таком методе обучения пересылаются только значимые значения из всего градиента, что еще больше снижает потребление ресурсов на передачу данных. Хотя федеративное обучение обеспечивает масштабируемость, из-за зависимости от единого центрального сервера, необходимого для вычислений глобальной модели, появляются проблемы с надежностью. Центральный сервер агрегации может выйти из строя из-за атаки или физического повреждения. Чтобы устранить этот недостаток, можно использовать распределенное федеративное обучение на основе распределенных агрегаций [9].

Управление данными на основе блокчейна

Для предоставления сервисов с чрезвычайно низкой задержкой система 6G на базе цифровых двойников будет основана прежде всего на децентрализованных сетевых архитектурах. При этом для прозрачного и непрерывного управления децентрализованными наборами данных многообещающим кандидатом станет блокчейн. Это связано с тем, что блокчейн хранит данные таким образом, что их нельзя изменить без ретроактивного изменения всех последующих блоков. Более того, блокчейн позволяет обеспечить передачу без потери целостности данных. В частности, его можно использовать для хранения предварительно обученных для различных сценариев моделей, что дополнительно повысит точность и сократит время, необходимое для обучения. Кроме того, он позволяет хранить данные, необходимые для обучения моделей цифровых двойников. Например, блокчейн можно использовать для хранения предварительно обученных моделей медицинской визуализации, разработанных различными больницами и медицинскими центрами, а также для накопления дополнительных наборов данных из новых клиник. Таким образом, блокчейн можно рассматривать как надежную платформу управления информацией.

Для запуска алгоритма консенсуса блокчейна в качестве майнеров понадобятся периферийные серверы. Хотя у блокчейна есть определенные преимущества, с ним связано и несколько проблем, к которым относятся масштабируемость, большая задержка, связанная с алгоритмом консенсуса, высокое энергопотребление и проблемы с конфиденциальностью [5]. Как правило, с увеличением количества узлов скорость транзакций блокчейна снижается. Поэтому,

прежде чем использовать его для цифровых двойников 6G, необходимо устранить этот фактор. Алгоритм консенсуса, используемый в блокчейне, становится причиной появления существенной задержки и приводит к значительному потреблению энергии до момента достижения консенсуса. Кроме того, из-за распределенной структуры у него присутствуют проблемы с конфиденциальностью. Каждый узел в цепочке блоков имеет доступ к самим данным транзакций, поэтому может произойти утечка конфиденциальной информации. Чтобы эффективно использовать 6G на базе цифровых двойников, мы должны предложить алгоритмы консенсуса блокчейна, обеспечивающие малую задержку (например, задача византийских генералов, Byzantine fault tolerance) и низкое энергопотребление (например, делегированное доказательство доли, delegated proof of stake).

Масштабируемость и надежность

Ожидаемое в будущем огромное количество устройств 6G побуждает нас разрабатывать масштабируемую и надежную архитектуру на основе цифровых двойников. Однако когда речь идет о внедрении массовых сверхнадежных услуг связи с малой задержкой (mURLLC), цифровые двойники будут создавать проблемы с масштабируемостью и надежностью [2]. Несмотря на то что облачная реализация двойников может уменьшить сложность проектирования и управления, в сетях с большим количеством устройств она будет характеризоваться большой задержкой. Для преодоления этого затруднения можно применить распределенную архитектуру двойников. Использование распределенной архитектуры (периферийных двойников) уменьшает задержку и повышает масштабируемость. Однако система с распределенными цифровыми двойниками сложнее в управлении по сравнению с системами с централизованными двойниками. Централизованный цифровой двойник может иметь больше вычислительной мощности и хранилища, чем распределенные, но при этом и большую задержку. В связи с чем для баланса между вычислительной мощностью, объемом памяти и задержкой мы можем применить гибридный подход, сочетающий функции как централизованных, так и распределенных цифровых двойников. Например, рассмотрим кооперативное эширование для расширенной реальности. Можно использовать периферийные двойники с глубоким обучением с подкреплением и облачный двойник. Обновление периферийных двойников будет осуществляться на основе их собственных данных, а затем эти обновления будут отправляться облачному двойнику. А облачный двойник, в свою очередь, может делиться новыми версиями обновлений со всеми другими периферийными двойниками.

Архитектура 6G на базе цифровых двойников

Мы предлагаем концепцию архитектуры сетей 6G на базе виртуальных двойников, позволяющую использовать ее для различных задач

«Интернета всего». Двойники взаимодействуют с IoE-устройствами и другими двойниками. Далее мы представляем подробное описание компонентов архитектуры системы 6G на базе цифровых двойников и возможности ее применения.

Объекты-двойники

Для эффективного применения беспроводных систем 6G на базе цифровых двойников необходимо определиться с понятием «виртуальный объект-двойник». Объекты-двойники отвечают за оптимизацию, обучение модели машинного обучения и управление данным сервисом 6G. Типичный сервис 6G может использовать один или несколько объектов-двойников. Такие объекты могут создаваться и деинициализироваться динамически, активизируя различные сервисы 6G при поступлении запроса на них [10]. Объект-двойник может быть реализован посредством временных виртуальных машин (transient-based virtual machines, TVM). Объекты-двойники на основе TVM обеспечат проактивную адаптацию ресурсов и их высвобождение после использования. Проактивная адаптация ресурсов обеспечивается с помощью проактивной интеллектуальной аналитики, основанной на новых схемах машинного обучения [3]. После выполнения сервиса ресурсы, назначенные TVM, должны быть высвобождены. Следует отметить, что TVM для конкретного сервиса должна быть изолирована от TVM других сервисов. Кроме того, TVM должна быть отделена от программного обеспечения главного узла. Для эффективной эксплуатации нескольких TVM программное обеспечение главного узла должно беспрепятственно взаимодействовать с ними.

Тенденции в использовании объектов-двойников

Объекты-двойники можно развертывать на конечных устройствах, на периферии либо в облаке. В зависимости от развертывания

мы можем разделить архитектуру цифровых двойников на три категории: периферийные, облачные и объединенные периферийно-облачные (edge-cloud) цифровые двойники (рис. 2). Периферийные объекты-двойники больше подходят для приложений 6G со строгими требованиями к задержке (например, массовая URLLC), тогда как облачные объекты-двойники можно использовать для нетребовательных к задержкам приложений, но предполагающих высокую вычислительную мощность. Между тем периферийно-облачные двойники могут использоваться как периферийные, так и облачные ресурсы, обеспечивая компромисс между задержкой и вычислительной мощностью. Периферийные двойники характеризуются меньшей вычислительной мощностью и меньшим объемом хранилища, чем облачные, тогда как периферийно-облачные двойники обладают преимуществами как облачных (высокой вычислительной мощностью), так и периферийных двойников (мгновенной аналитикой). В качестве примера рассмотрим объединенную интеллектуальную транспортную систему на базе периферийно-облачных двойников. Для управления перегрузкой трафика в сети 6G можно использовать двойников, расположенных в облаке [11], а для передачи сообщений об авариях между беспилотными автомобилями — периферийных двойников из-за необходимости мгновенно сообщать о таких событиях [12]. Сравнение двойников по различным показателям приведено в таблице. Периферийный двойник будет иметь лучшие показатели масштабируемости за счет того, что он имеет меньшую задержку по сравнению с облачными или периферийно-облачными двойниками. При использовании периферийных двойников мы можем добавить больше конечных устройств (пока не достигнем максимального предела обслуживания) без значительного увеличения задержки. Однако облачный двойник имеет низкую масштабируемость из-за роста задержки при увеличении количества устройств. Поэтому в зависимости

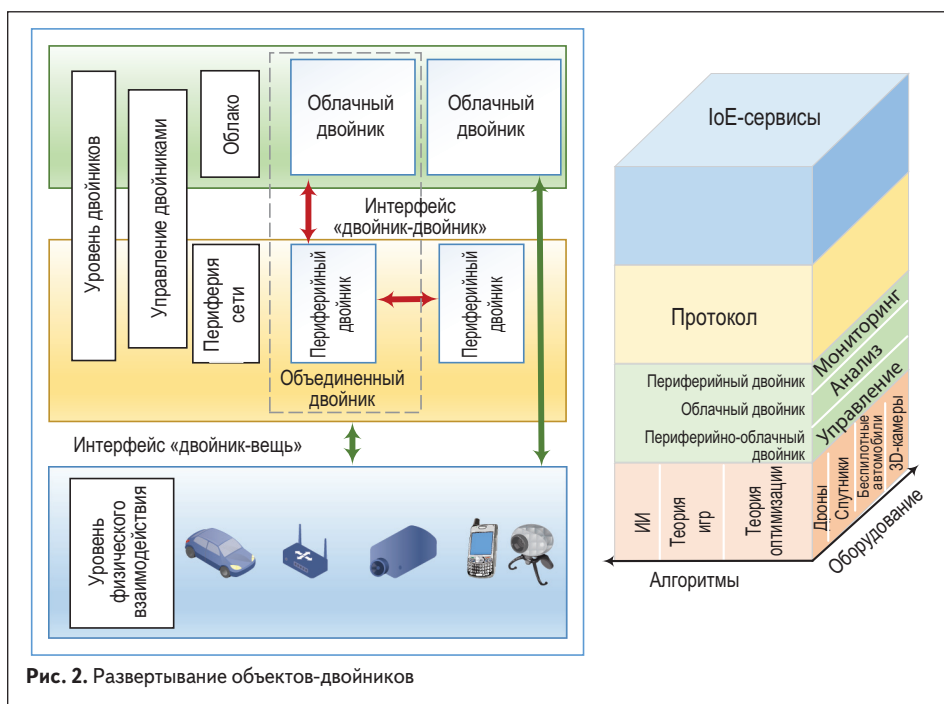


Рис. 2. Развертывание объектов-двойников

Таблица. Сравнение периферийных, облачных и периферийно-облачных двойников

	Описание	Периферийные двойники	Облачные двойники	Периферийно-облачные двойники
Масштабируемость	Масштабируемость влияет на задержку при большом числе подключенных 6G-устройств. Кроме того, добавление новых узлов не должно значительно снижать эффективность системы с точки зрения задержки	Высокая	Самая низкая	Низкая
Задержка	Этот показатель представляет собой общую задержку при предоставлении сервисов 6G	Низкая	Высокая	Средняя
Геораспределение	Этот показатель говорит о географическом распределении объектов-двойников для включения сервисов 6G	Распределенное	Централизованное	Гибридное
Способность к адаптации	Этот показатель относится к динамическому распределению ресурсов цифровых двойников при высокой динамике запросов	Высокая	Низкая	Высокая
Учет контекста	Учет контекста – функция, которая имеет дело со знаниями о местоположении конечных устройств и сетевом трафике	Высокий	Низкий	Средний
Поддержка мобильности	Поддержка мобильных устройств связана со способностью цифровых двойников беспрепятственно обслуживать конечные мобильные устройства	Высокая	Низкая	Средняя
Надежность	Надежность относится к бесперебойной работе сети 6G на базе цифровых двойников в случае отказа одного из объектов-двойников	Самая высокая (для нескольких периферийных двойников)	Самая низкая	Средняя

от характера использования 6G мы должны задействовать подходящий цифровой двойник. Кроме того, способность к быстрой адаптации как у периферийных, так и у периферийно-облачных двойников намного выше, чем у облачных, из-за низкой осведомленности последних о текущей ситуации (меньшего объема информации о динамике периферии сети). Вместе с тем периферийные и периферийно-облачные двойники имеют более высокую поддержку мобильности, нежели облачные, а также располагают большей информацией о динамике сети конечного пользователя и, таким образом, могут эффективнее справиться с мобильностью, чем удаленное облако.

Для слаженного, масштабируемого и надежного взаимодействия необходимы различные

интерфейсы, такие как «двойник-вещь» (twins-to-things), «двойник-двойник» (twin-to-twin) и «двойник-сервис» (twin-to-service). С помощью этих интерфейсов можно добавлять и удалять двойников, предназначенных для конкретных задач, не влияя на работу других двойников [13]. Кроме того, интерфейсы «двойник-объект» позволяют эффективно изолировать IoT-устройства от уровня двойников, тем самым упрощая управление. Для реализации распределенной системы необходим интерфейс «двойник-двойник», обеспечивающий связь между различными двойниками (например, периферийные вычисления автомобилей на основе федеративного обучения [14]). Для реализации распределенных систем можно использовать различные объекты-двойники моделей машинного обучения на периферии сети.

Далее для получения совокупной модели будет использоваться интерфейс «двойник-двойник». Кроме того, интерфейс «двойник-двойник» потребуется и для связи между различными двойниками на разных уровнях (на уровнях облака и периферии).

Работа цифрового двойника

В целом действия двойников можно разделить на два типа: обучение и управление (рис. 3). Для обучения можно использовать распределенное машинное обучение (шаг 1). Затем локальные модели обучения отправляются на уровень двойников для агрегации в майнере блокчейна (шаги 2 и 3). Обновления моделей из блокчейна рассылаются по локальным системам, где в соответствии с ними обновляются локальные модели (этапы 4 и 5).

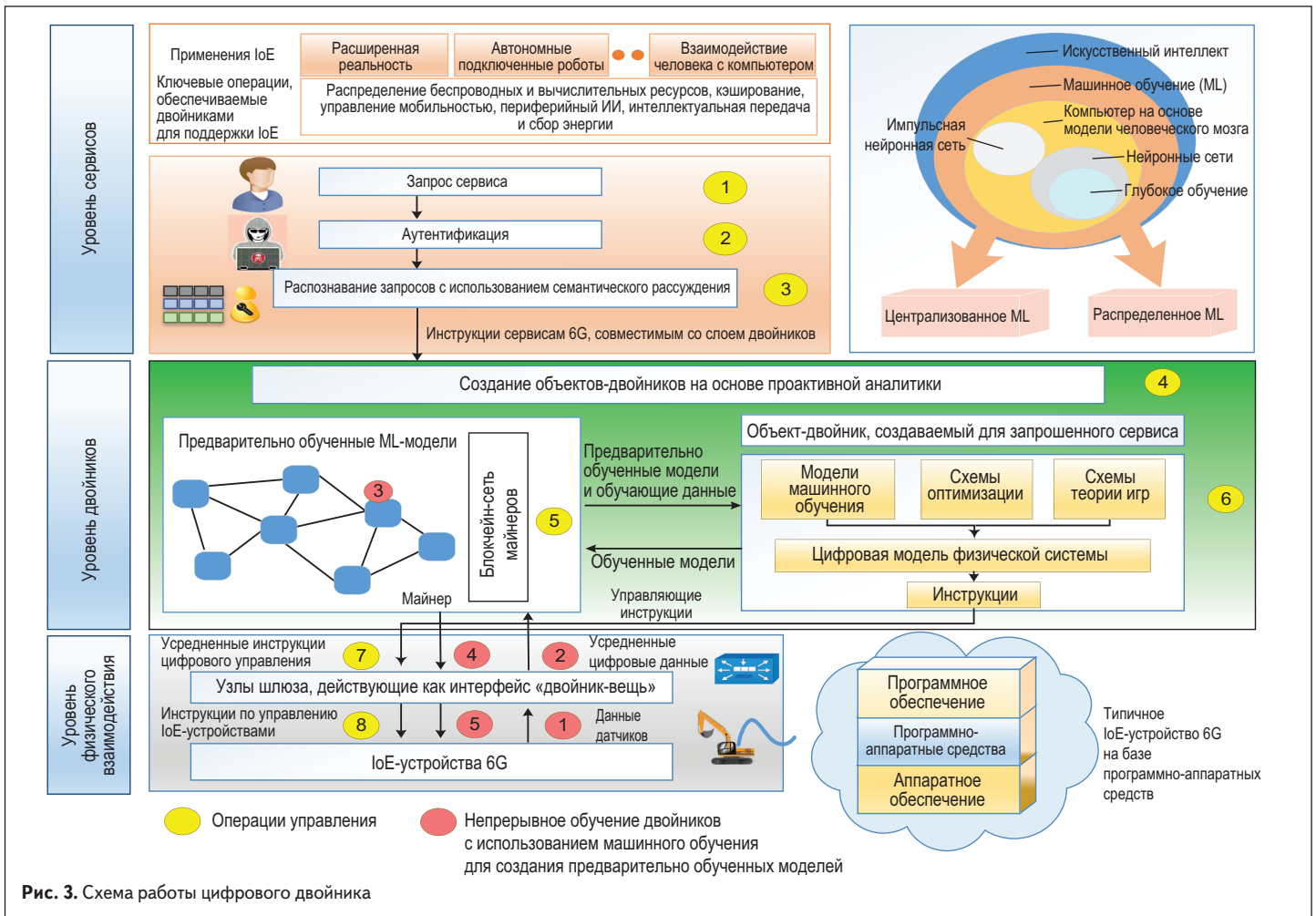


Рис. 3. Схема работы цифрового двойника

Этот итеративный процесс обучения может происходить как синхронно, так и асинхронно. В асинхронном режиме устройство отправляет свою локальную модель только при подключении к майнерам, тогда как в синхронном режиме устройства должны отправлять свои локальные модели майнеру для глобальной агрегации в заранее определенный момент времени. Следовательно, мы должны выбирать способ агрегации в соответствии с условиями подключения. С другой стороны, есть некоторые сценарии, например беспилотные автомобили, когда устройства каждый день могут генерировать до 4000 Гбайт данных, и это необходимо учитывать при обучении. Хотя для таких сценариев можно использовать централизованное машинное обучение, его недостаток состоит в привлечении большого количества коммуникационных ресурсов для передачи данных от конечных устройств на центральный сервер. Решением этой проблемы может стать федеративное обучение, позволяющее постоянно обновлять глобальную модель для повышения ее эффективности.

Теперь объясним работу цифрового двойника в ответ на запрос конечных пользователей сервиса 6G на примере устройства расширенной реальности (XR):

1. Устройство XR запрашивает услугу у базовой станции.
2. В ответ на запрос пользователя в первую очередь происходит его аутентификация.
3. После этого запрос от XR должен быть преобразован с помощью методов семантического разбора в форму, понятную для двойников.
4. Затем в BS создаются двойники на основе TVM и связываются с майнерами блокчейна.
5. Майнеры запускают алгоритм консенсуса блокчейна, обеспечивая надежный обмен данными для работы двойников.
6. Кроме того, майнеры сохраняют данные, необходимые для проактивной аналитики двойников, а также предварительно обученные модели сервиса XR.
7. По запросу сервиса конечным пользователем двойники используют эти предварительно обученные модели (либо используют их непосредственно для мгновенного реагирования на запрос XR, либо выполняют дополнительное обучение для будущего использования).
8. Созданный двойник обслуживает запрашивающее XR-устройство конечного пользователя, обеспечивая эффективную связь и управление вычислительными ресурсами.

Будущие направления

Изолирование сервисов

Использование двойников для выполнения различных задач «Интернета всего» требует эффективного расходования сетевых ресурсов. Чтобы эффективность сервисов IoT, предоставляемых с помощью двойников, не влияла на эффективность других сервисов на основе двойников, необходимо явным образом выделять ресурсы (вычислительные и коммуникационные) этим сервисам. Один из способов — применение выделенного распределения ресурсов, однако это (например, периферийный сервер)

приведет к неэффективному их использованию. Следовательно, мы должны предложить новые схемы оптимизации, которые позволят эффективно использовать ресурсы, разделяя их между многими сервисами на базе двойников и при этом выполняя требования их изоляции.

Управление мобильностью

Конечный пользователь должен непрерывно обслуживаться системой 6G на базе цифровых двойников в течение всего периода оказания услуги. Пользователи мобильных устройств, связанных с двойником, могут испытывать неудобства от прерывания обслуживания из-за выхода за пределы зоны действия точки доступа/базовой станции, связанной с двойником. Один из способов избежать такой ситуации — предоставить конечному пользователю доступ к сервису посредством связи по обратному каналу. Но такой подход вызывает небольшие прерывания сервиса и высокую задержку. Для решения этих проблем можно перенести сервис на новые связанные двойники. Однако миграция сервиса на новые двойники должна основываться на прогнозировании мобильности пользователей, необходимом для упреждающего поиска новых двойников. Следовательно, для определения местоположения новых двойников мы должны предложить эффективные схемы прогнозирования.

Вопросы безопасности цифровых двойников

Типичная система 6G с поддержкой цифровых двойников будет иметь множество элементов — например, конечные устройства, объекты-двойники на основе TVM, коммуникационные интерфейсы. Соответственно, система будет уязвима для различных угроз безопасности. Для успешной работы системы на базе двойников понадобятся эффективные методы анализа атак, позволяющие разработать новые механизмы безопасности. К основным задачам, возникающим в связи с этим, относятся идентификация доказательств атак, получение и сохранение доказательств, а также их представление. Идентификация доказательств является первым этапом, трудно осуществимым из-за большого количества устройств и объема данных, а также мобильности и неоднородности устройств и их программного обеспечения. Помимо идентификации, сбора и сохранения доказательств, существуют проблемы с применением методов анализа. Получение доказательств с устройств затруднено из-за шифрования данных и неоднородности аппаратного и программного обеспечения. Далее, сложности вызывает сохранение доказательств в случаях ограниченной памяти устройств. Одно из возможных решений — сохранение данных в другом месте, например на серверах периферийных вычислений. Последний вопрос заключается в том, как представить данные, чтобы обеспечить их эффективный анализ.

Заключение

В статье мы представили наше видение 6G на базе цифровых двойников и предложили архитектуру системы 6G на их основе. Кроме того, мы обрисовали перспективу будущих исследований и пришли к выводу, что цифровой двойник послужит ключевым средством

предоставления услуг 6G. По нашему мнению, периферийные цифровые двойники обеспечат масштабируемость и надежность ключевых функций за счет использования распределенного развертывания. Мы также сформулировали направления дальнейших исследований, которые позволят реализовать концепцию цифровых двойников в системах 6G. ■

Литература

1. Khan L. U., Yaqoob I., Imran M., Han Z., Hong C. S. 6G wireless systems: A vision, architectural elements, and future directions // IEEE Access. 2020. Vol. 8.
2. Saad W., Bennis M., Chen M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems // IEEE Network. 2020. Vol. 34. No. 3.
3. Kato N., Mao B., Tang F., Kawamoto Y., Liu J. Ten challenges in advancing machine learning technologies toward 6G // IEEE Wireless Communications. 2020. Vol. 27. No. 3.
4. Chaccour C., Soorki M. N., Saad W., Bennis M., Popovski P., Debbah M. Seven defining features of terahertz (thz) wireless systems: A fellowship of communication and sensing. arXiv preprint arXiv:2102.07668, 2021.
5. Yaqoob I., Salah K., Uddin M., Jayaraman R., Omar M., Imran M. Blockchain for digital twins: Recent advances and future research challenges // IEEE Network. 2020. Vol. 34. No. 5.
6. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-Papers OnLine. 2018. Vol. 51. No. 11.
7. Rolle R., Martucci V., Godoy E. Architecture for digital twin implementation focusing on industry 4.0 // IEEE Latin America Transactions. 2020. Vol. 18. No. 5.
8. Wen W., Xu C., Yan F., Wu C., Wang Y., Chen Y., Li H. Terngrad: Ternary gradients to reduce communication in distributed deep learning. Advances in neural information processing systems, 2017.
9. Khan L. U., Saad W., Han Z., Hong C. S. Dispersed federated learning: Vision, taxonomy, and future directions. arXiv preprint arXiv:2008.05189, 2020.
10. Vlachas P., Giaffreda R., Stavroulaki V., Kelaidonis D., Foteinos V., Poullos G., Demestichas P., Somov A., Biswas A. R., Moessner K. Enabling smart cities through a cognitive management framework for the internet of things // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. No. 6.
11. Shengdong M., Zhengxian X., Yixiang T. Intelligent traffic control system based on cloud computing and big data mining // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15. No. 12.
12. Khan L. U., Yaqoob I., Tran N. H., Kazmi S. M. A., Dang T. N., Hong C. S. Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. No. 10.
13. Sha K., Yang T. A., Wei W., Davari S. A survey of edge computing based designs for IoT security // Digital Communications and Networks. 2020. Vol. 6. No. 2.
14. Ye D., Yu R., Pan M., Han Z. Federated learning in vehicular edge computing: A selective model aggregation approach // IEEE Access. 2020. vol. 8.