

Чижов Сергей Владимирович, к.т.н., заведующий кафедрой «Мосты»,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I, г. Санкт-Петербург

Создательев Михаил Алексеевич, студент факультета «Транспортное
строительство», Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

ПРЕОДОЛЕНИЕ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ БАРЬЕРОВ СЕТЕЙ 5G В МОСТОСТРОЕНИИ НА БАЗЕ ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ EDGE AI И MESH-СЕТЕЙ

Аннотация. Внедрение концепций цифровых двойников на объектах транспортной инфраструктуры требует непрерывной передачи телеметрических данных. Глобальная практика опирается на развертывание широкополосных сетей 5G. Однако для отечественного мостостроения сплошное покрытие удаленных линейных объектов сигналом миллиметрового диапазона экономически и физически нецелесообразно из-за высокого затухания радиоволн в железобетонных конструкциях. В статье обосновывается переход к децентрализованной гибридной топологии. Предлагается архитектура, в которой локальные зоны сотовой связи разгружаются за счет алгоритмов периферийного искусственного интеллекта (Edge AI), установленных непосредственно на строительной технике, а «слепые зоны» компенсируются самоорганизующимися ячеистыми сетями (Mesh). Данная модель обеспечивает автономное предотвращение столкновений механизмов и непрерывность мониторинга при деградации или полном отказе базовой инфраструктуры связи.

Ключевые слова: цифровой двойник, мостостроение, 5G, периферийные вычисления, Edge AI, ячеистые сети, межмашинное взаимодействие, затухание радиосигнала.

Abstract. The implementation of digital twin concepts in transport infrastructure facilities requires the continuous transmission of telemetry data. Global practice relies on the deployment of broadband 5G networks. However, for domestic bridge construction, providing continuous millimeter-wave signal coverage across remote linear infrastructure is economically and physically unfeasible due to the high attenuation of radio waves in reinforced concrete structures. This article justifies the transition to a decentralized hybrid topology. An architecture is proposed wherein local cellular communication zones are offloaded by Edge AI algorithms installed directly on construction equipment, while "blind spots" are compensated for by self-organizing mesh networks. This model ensures autonomous collision avoidance for machinery and continuous monitoring in the event of degradation or complete failure of the core communication infrastructure.

Keywords: digital twin, bridge construction, 5G, edge computing, Edge AI, mesh networks, machine-to-machine communication, radio signal attenuation.

1. Введение Современное мостостроение планомерно смещается в сторону киберфизических производственных систем. Фундаментом этого перехода является технология «цифровых двойников» (Digital Twins), предполагающая непрерывный обмен информацией между физической стройплощадкой и ее виртуальной моделью. Специфика возведения внеклассных мостов характеризуется динамически изменяющимися нагрузками на элементы конструкции в процессе монтажа, что требует миллисекундной точности мониторинга пространственного положения блоков и механизмов. Анализ мирового опыта цифровизации строительного комплекса демонстрирует, что в качестве базового канала передачи данных для подобной ресурсоемкой телеметрии сегодня безоговорочно рассматриваются мобильные сети пятого поколения (5G) [1].

Слепое копирование зарубежной парадигмы сплошного 5G-покрытия в отечественных реалиях сталкивается с критическими инфраструктурными барьерами. Возведение мостовых переходов часто ведется над широкими

водными преградами и в сложных рельефных зонах, значительно удаленных от магистральных линий связи. Параллельно с этим строительная отрасль испытывает кадровый дефицит и недостаток цифровых компетенций у линейного персонала [2]. Следовательно, производственный процесс нуждается в системах «невидимой автоматизации», способных агрегировать пространственные данные и управлять тяжелыми механизмами фоном, без ручного ввода, но при этом не зависящих от идеального качества интернет-соединения. Целью данного исследования является технико-экономическое обоснование перехода от централизованной «облачной» архитектуры связи к децентрализованной модели, базирующейся на симбиозе локального 5G, периферийных вычислений (Edge AI) и ячеистых радиосетей (Mesh).

2. Физико-экономические барьеры развертывания 5G на инфраструктурных объектах Экономическая модель развертывания высокоскоростных сотовых сетей на протяженных инфраструктурных проектах исторически сопряжена с запретительно высокими капитальными затратами. Как показывают исследования организации радиосвязи на масштабных линейных объектах (в частности, на высокоскоростных магистралях и арктических маршрутах), обеспечение бесперебойного покрытия требует сверхплотной установки микробазовых станций (так называемых «малых сот») [3, 4]. Прокладка оптических линий связи и силовых кабелей электропитания к каждой такой соте на строящихся русловых опорах зачастую технически неосуществима, а применение автономных генераторов многократно снижает рентабельность проекта.

Помимо экономики, критическим барьером выступают фундаментальные законы радиофизики. Для обеспечения заявленной пропускной способности 5G задействует сверхвысокие частоты миллиметрового диапазона (28–40 ГГц). На этих частотах возникает экстремальное затухание сигнала в свободном пространстве (FSPL — Free

Space Path Loss), которое математически описывается логарифмической зависимостью:

$$FSPL = 92,4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d)$$

где f — рабочая частота передатчика (ГГц); d — дистанция от излучателя (км).

Согласно данной формуле, чем выше рабочая частота передатчика, тем быстрее рассеивается мощность радиоволны. В условиях открытой строительной площадки критическое падение мощности фиксируется уже на дистанции 50 метров от излучателя.

Ситуация усугубляется специфической материалоемкостью мостовых конструкций. Массивные железобетонные пилоны, стальные балки пролетного строения и густая пространственная арматурная сетка работают как непреодолимый физический экран (клетка Фарадея). Исследования подтверждают, что высокомарочный бетон практически полностью блокирует прохождение радиоволн, а металлические фермы вызывают многократные переотражения, ведущие к фазовым искажениям и потере пакетов данных [5]. В результате строительная техника, перемещающаяся в зону радиотени за опору моста, сталкивается с резким падением скорости обмена данными, что делает дистанционное управление машинами из единого диспетчерского центра небезопасным.

3. Децентрализованная архитектура обработки данных (Edge AI)

Для компенсации физической нестабильности радиоканала необходимо радикально изменить топологию обработки информации: перенести вычислительные мощности из централизованного сервера («облака») непосредственно на борт строительной машины [6]. Данная концепция реализуется посредством технологии периферийных вычислений (Edge AI), при которой инференс алгоритмов машинного зрения осуществляется на защищенном бортовом компьютере крана или буровой установки.

В классической 5G-модели кран, оснащенный массивом камер кругового обзора, должен непрерывно транслировать тяжелые видеопотоки на удаленный сервер для выявления производственных рисков. Архитектура Edge AI исключает этот ресурсоемкий процесс из сетевого контура. Бортовой вычислитель самостоятельно и мгновенно анализирует видеопоток прямо в кабине машиниста, оценивая не только позицию техники, но и, например, амплитуду раскачивания многотонного груза под воздействием ветровых нагрузок.

Сформировав оценку ситуации, система генерирует сверхкомпактный семантический микро-отчет (включающий координаты, вектор движения, распознанный объект и степень угрозы). Вместо сотен мегабайт видео в диспетчерскую отправляется структурированный текстовый пакет размером в несколько килобайт. Для передачи такого микроскопического объема миллиметровый 5G избыточен — пакет гарантированно доставляется даже при жесткой деградации радиоканала или автоматическом переключении на устаревший стандарт 4G (LTE).

Более того, в сценариях экстремальной инфраструктурной изоляции (например, возведение мостовых переходов в таежных или арктических широтах), где внешнее сотовое покрытие отсутствует абсолютно, предложенная архитектура позволяет стройплощадке функционировать в режиме автономного «цифрового анклава». В такой парадигме локальные Edge-вычислители аккумулируют микро-отчеты в защищенном внутреннем буфере, не прерывая своей работы. Координация техники на площадке продолжается в штатном режиме, а синхронизация с глобальной моделью цифрового двойника переходит в асинхронный формат. Обновление центральной базы данных в главном офисе осуществляется пакетно — посредством физического трансфера накопителей (концепция «Data Mule») или во время коротких периодических сеансов спутниковой связи. Это

гарантирует, что при нулевом уровне внешнего покрытия стройка не останавливается.

4. Ячеистые сети (Mesh) и межмашинное взаимодействие в зонах радиотени Несмотря на радикальное сжатие исходящего трафика, на стройплощадке неизбежны сценарии полного отключения от сотовой связи, вызванные работой в глубоких котлованах, экранированием или сбоями на стороне оператора. Для обеспечения бесперебойного производственного цикла в таких условиях сетевая архитектура интегрирует функционал самоорганизующихся ячеистых сетей (Mesh).

Фундаментом данной топологии является прямое межмашинное взаимодействие (M2M — Machine-to-Machine). Специализированные протоколы радиообмена позволяют тяжелой технике передавать пакеты телеметрии напрямую друг другу в выделенном диапазоне, минуя вышки сотового оператора. Каждая строительная машина в такой архитектуре становится не просто потребителем трафика, но и активным ретрансляционным узлом, динамически расширяя зону уверенного покрытия по мере перемещения техники по мостовому переходу. Интероперабельность (способность машин разных брендов обмениваться данными без конфликтов) обеспечивается применением унифицированных отраслевых стандартов цифровой шины.

В качестве практической реализации целесообразно рассмотреть этап сборки пролетного строения. В зоне глубокого радиотеневого кармана синхронно работают тяжелый гусеничный кран и мощная буровая установка. Посредством протокола прямого радиообмена обе единицы техники автономно транслируют в эфир базовые сообщения о своем пространственном положении и статусе работы двигателя с частотой до 10 герц. При инициации поворота башни крана его бортовой Edge AI сопоставляет собственную расчетную траекторию с телеметрией, получаемой напрямую от буровой установки. Алгоритм учитывает не только геометрические координаты, но и

инерционную массу механизмов, рассчитывая точный тормозной путь. Обнаружив риск коллизии противовеса с мачтой буровой, вычислитель крана автономно активирует пропорциональное торможение гидравлических приводов. Ультранизкая задержка прямого M2M-обмена (менее 20 миллисекунд) блокирует развитие аварийной ситуации за доли секунды до физического контакта, при этом глобальная инфраструктура 5G не задействуется вовсе.

5. Заключение Развертывание сплошного инфраструктурного покрытия 5G при строительстве внеклассных мостовых переходов представляет собой экономически нерентабельный и радиофизически нестабильный подход. Слепое следование «облачно-ориентированным» парадигмам ставит производственную и функциональную безопасность объекта в критическую зависимость от качества связи с внешними дата-центрами.

Предложенная гибридная архитектура декомпозирует эту проблему. Периферийные вычисления (Edge AI) берут на себя первичную аналитику данных, сжимая исходящий трафик до компактных микро-отчетов и нивелируя перегрузки базовых станций. В свою очередь, протоколы прямого межмашинного взаимодействия (Mesh) формируют независимый и отказоустойчивый контур безопасности в «слепых зонах». Подобный симбиоз позволяет не только преодолеть инфраструктурные ограничения классических сотовых сетей, но и способствует достижению технологического суверенитета, делая внедрение автономной строительной техники жизнеспособным в самых суровых географических и климатических реалиях отечественного мостостроения.

Список литературы

1. Иваненко И. А., Скоробогатова Т. Н., Чепурко В. В. Мировой опыт цифровизации строительства и возможности его использования в России // Вестник Челябинского государственного университета. – 2025. – № 12(506). – С. 196-207.

2. Проняева Л. И., Рязанский Д. В. Современные тенденции развития строительной отрасли в России и проблемы в ее кадровом обеспечении // Вестник Академии знаний. – 2024. – № 6(65). – С. 1243-1247.
3. Белкин М. Е., Кузиков С. Ю., Сигов А. С. Развитие современной информационно-телекоммуникационной среды в прибрежной зоне арктического и дальневосточного побережий // Сборник трудов. МИРЭА – Российский технологический университет. – 2022. – С. 102.
4. Куценко С. М., Чинаров Д. С. Проблемы организации радиотракта на участке высокоскоростной железнодорожной магистрали // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2025. – № 3(87). – С. 31-39.
5. Тыллануров Ы., Баймухаммедов Д., Мередова Дж., Агамырадов Н. Развитие 5G и 6G сетей: архитектура, ключевые технологии и их влияние на промышленность и повседневную жизнь // Наука через призму времени. – 2025. – № 12(105). – С. 1-4.
6. Никоноров А. В. Архитектура интеграции ИИ в систему управления жизненным циклом строительного объекта на основе цифрового двойника // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2025. – Т. 10. – № 8(58). – С. 89-92.

Literature

1. Ivanenko I.A., Skorobogatova T.N., Chepurko V.V. World experience of construction digitalization and possibilities of its use in Russia // Bulletin of Chelyabinsk State University. 2025. No. 12(506). P. 196-207.

2. Pronyaeva L.I., Ryazanskiy D.V. Modern trends in the development of the construction industry in Russia and problems in its staffing // Bulletin of the Academy of Knowledge. 2024. No. 6(65). P. 1243-1247.
3. Belkin M.E., Kuzikov S.Yu., Sigov A.S. Development of modern information and telecommunication environment in the coastal zone of the Arctic and Far East coasts // Proceedings. MIREA – Russian Technological University. 2022. P. 102.
4. Kutsenko S.M., Chinarov D.S. Problems of organizing a radio path on a section of a high-speed railway line // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2025. No. 3(87). P. 31-39.
5. Tyllanurov Y., Baymukhammedov D., Meredova Dzh., Agamyradov N. Development of 5G and 6G networks: architecture, key technologies and their impact on industry and everyday life // Science through the Prism of Time. 2025. No. 12(105). P. 1-4.
6. Nikonorov A.V. Architecture of AI integration into the life cycle management system of a construction object based on a digital twin // International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency. 2025. Vol. 10. No. 8(58). P. 89-92.