

Використання периферійних обчислень у телемедицинських системах

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій та зростаючого попиту на дистанційні медичні послуги, телемедицинські системи стали одним з ключових компонентів охорони здоров'я. Одним з основних викликів при реалізації таких систем є забезпечення ефективної, надійної та своєчасної передачі великого обсягу медичних даних, включаючи відеопотоки, біомедичні сигнали та зображення високої роздільної здатності. В роботі розглядається концепція використання технології периферійних (edge) обчислень як інструменту попередньої обробки медичних даних безпосередньо на місці їхнього збору, що дозволяє зменшити навантаження на мережу, підвищити швидкість реагування системи та зменшити затримки під час передавання. Представлено функціональну архітектуру edge-вузла, охарактеризовано його ключові модулі та алгоритми обробки. Результати моделювання демонструють суттєве покращення параметрів якості обслуговування (QoS), зокрема зниження середньої затримки до 50% та зменшення обсягу переданих даних до 60% у порівнянні з централізованими системами..

Ключові слова: телемедицина, периферійні обчислення, передача медичних даних, оптимізація трафіку, QoS, локальна обробка, архітектура edge-систем.

Abstract

In the context of rapid development of digital technologies and increasing demand for remote medical services, telemedicine systems have become a key component of modern healthcare. One of the main challenges in implementing such systems is ensuring the efficient, reliable, and timely transmission of large volumes of medical data, including video streams, biomedical signals, and high-resolution images. This paper explores the concept of utilizing edge computing technologies as a tool for preliminary processing of medical data directly at the point of collection. This approach reduces network load, improves system response speed, and minimizes transmission delays. The proposed extended edge-node architecture is presented, detailing its key modules, interaction with sensors and communication networks, and mechanisms for ensuring resilience under variable network conditions. Simulation results demonstrate significant improvements in Quality of Service (QoS) parameters, including a reduction in average latency by up to 50% and a decrease in transmitted data volume by up to 60% compared to centralized systems.

Keywords: telemedicine, edge computing, medical data transmission, traffic optimization, Quality of Service (QoS), local processing, edge architecture.

Вступ

Телемедицинські платформи забезпечують надання медичних послуг у віддаленому режимі, дозволяючи проводити відеоконсультації, діагностику, моніторинг стану пацієнтів та обмін клінічною інформацією без фізичної присутності лікаря [1]. Проте функціонування таких систем часто супроводжується значними проблемами, пов'язаними з нестабільністю мережевих каналів, високими затримками, втратами пакетів та обмеженнями пропускної здатності. Особливо актуальною ця проблема є у сільських, гірських або віддалених регіонах, де неможливо забезпечити високошвидкісне підключення до мережі. Дослідження науковців ВНТУ [2] показали важливість оптимізації передачі медичних даних, що стало основою для впровадження технології периферійних обчислень (edge computing).

Одним з ефективних рішень є впровадження технології периферійних обчислень (edge computing), що передбачає обробку даних ближче до джерела їхнього виникнення. Це дозволяє зменшити кількість інформації, що передається мережею, знизити затримки, а також забезпечити автономність функціонування систем у разі тимчасової недоступності центрального сервера. Мета даної роботи полягає у дослідженні ефективності використання edge computing у телемедицинських системах та обґрунтуванні доцільності впровадження архітектури попередньої обробки даних [3].

Архітектура системи та функціональні модулі edge-вузла

Запропонована архітектура телемедичної системи з підтримкою периферійних обчислень побудована за модульним принципом та включає кілька взаємопов'язаних рівнів: рівень збору даних, рівень локальної обробки, транспортний рівень, та рівень взаємодії з центральною інфраструктурою. Архітектура є масштабованою, дозволяє інтегрувати нові модулі в режимі реального часу та адаптується до різних телемедичних сценаріїв [3].

1. Рівень збору даних. На цьому рівні розташовані сенсори та пристрої, які здійснюють безперервний моніторинг біофізіологічних параметрів пацієнта: ЕКГ, пульс, температура, сатурація кисню, відеопотік тощо. Дані передаються до edge-вузла через стандартні інтерфейси передачі, включаючи Bluetooth, Wi-Fi або дротові з'єднання.

2. Edge-вузол. Основу архітектури становить edge-модуль, який виконує такі функції:

- Збір та буферизація – безперервний прийом даних із сенсорів з подальшим формуванням пакетів;
- попередня обробка – цифрова фільтрація, згладжування, виявлення аномалій (на основі правил або ML-моделей);
- компресія – адаптивне стиснення даних для зниження обсягу трафіку без втрати критичної інформації;
- пріоритезація – класифікація трафіку за медичною значущістю із встановленням черговості передачі. Класифікація базується на вагових коефіцієнтах, де біомедичні сигнали (наприклад, ЕКГ, сатурація) отримують пріоритет 1, відеопотоки – 2, а службові повідомлення – 3, залежно від критичності для діагностики в реальному часі;
- адаптивна маршрутизація – вибір найкращого каналу для передачі залежно від умов мережі (наприклад, LTE, 5G, Wi-Fi);
- функції безпеки – локальне шифрування, автентифікація пристроїв, контроль доступу до даних [4].

3. Транспортний рівень. Забезпечує передачу оброблених даних до хмарної платформи або лікарської станції з використанням надійних протоколів (MQTT, CoAP, HTTPS).

4. Рівень центрального аналізу. Дані, що надійшли з edge-вузлів, додатково обробляються, зберігаються та візуалізуються через клінічні інтерфейси [5].

Завдяки цій архітектурі, телемедична система отримує здатність працювати в реальному часі, забезпечуючи мінімальні затримки передачі, зменшення навантаження на мережу та підвищену надійність при втраті зв'язку з центральними серверами.

Для перевірки ефективності запропонованої архітектури телемедичної системи з периферійною обробкою було проведено серію комп'ютерних експериментів з використанням мережевого симулятора NS-3 та програмного середовища MATLAB. Метою моделювання було порівняння двох сценаріїв функціонування телемедичної системи: класичного (централізованого) та із застосуванням edge-вузлів. У таблиці 1 узагальнено вихідні умови моделювання, що включають опис сценаріїв, типи даних, параметри мережевого середовища та критерії оцінювання.

Таблиця 1 – Вихідні умови моделювання телемедичної системи з edge-обчисленнями

Категорія	Значення
Сценарії	1) Централізований (без обробки); 2) Edge-модель (з попередньою обробкою)
Типи даних	Відео 720p, ЕКГ (12 каналів), зображення JPEG2000, службові повідомлення
Пропускна здатність	3 Мбіт/с
Затримка каналу	80–300 мс
Ймовірність втрат пакетів	0,5–5%
Метрики оцінки	Затримка (мс), втрати пакетів (%), трафік (МБ/хв), час доставки (с)

Моделювання проводилося з використанням сесій передачі в режимі реального часу (RTSP, MQTT over TLS) із генерацією даних за заздалегідь визначеними інтервалами. Була реалізована симуляційна логіка обробки даних на edge-рівні – з вибором алгоритму стиснення, налаштуванням пріоритету для біомедичних сигналів та застосуванням процедур локальної буферизації в умовах перевантаження каналу.

Нижче наведено фрагмент коду, що ілюструє базову модель передачі трафіку від edge-вузла до центрального сервера з імітацією затримки, пропускної здатності та періодичної генерації даних. Середовище моделювання NS-3.

```
NodeContainer nodes;  
nodes.Create(2); // edge вузол і центральний сервер  
  
PointToPointHelper pointToPoint;  
pointToPoint.SetDeviceAttribute("DataRate", StringValue("3Mbps"));  
pointToPoint.SetChannelAttribute("Delay", StringValue("100ms"));  
  
NetDeviceContainer devices;  
devices = pointToPoint.Install(nodes);  
  
InternetStackHelper stack;  
stack.Install(nodes);  
  
Ipv4AddressHelper address;  
address.SetBase("10.1.1.0", "255.255.255.0");  
Ipv4InterfaceContainer interfaces = address.Assign(devices);  
  
UdpEchoServerHelper echoServer(9);  
ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install(nodes.Get(1));  
serverApps.Start(Seconds(1.0));  
serverApps.Stop(Seconds(10.0));  
  
UdpEchoClientHelper echoClient(interfaces.GetAddress(1), 9);  
echoClient.SetAttribute("MaxPackets", UintegerValue(1000));  
echoClient.SetAttribute("Interval", TimeValue(Seconds(0.05)));  
echoClient.SetAttribute("PacketSize", UintegerValue(1024));  
  
ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install(nodes.Get(0));  
clientApps.Start(Seconds(2.0));  
clientApps.Stop(Seconds(10.0));
```

Результати експерименту подано в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання

Сценарій	Затримка (мс)	Втрата пакетів (%)	Навантаження (МБ/хв)	Час доставки повідомлень (с)
Без edge	280	4.8	115	2.4
3 edge	140	1.6	46	0.8

Як видно з табл. 1 та поданих результатів, використання edge-вузлів дозволило:

- скоротити затримку вдвічі завдяки локальній обробці даних;
- зменшити втрати пакетів майже втричі, за рахунок зменшення загального навантаження;
- забезпечити втричі швидшу доставку критичних повідомлень;
- мінімізувати обсяг даних, що передаються мережею, на понад 60%, без втрати інформативності.

Загалом, результати підтверджують, що архітектура з периферійною обробкою є значно ефективнішою за класичну централізовану модель, особливо в умовах обмеженого або нестабільного мережевого середовища

Висновки

Проведене дослідження підтверджує доцільність використання периферійних обчислень у телемедицинських системах як ефективного засобу зниження мережевого навантаження та підвищення якості сервісу. Розроблена архітектура edge-вузла дозволяє здійснювати попередню обробку даних безпосередньо на місці їхнього збору, забезпечуючи скорочення затримки передачі, зменшення втрат пакетів і покращення швидкості доставки критичної медичної інформації.

Моделювання, проведене в середовищі NS-3 та MATLAB, продемонструвало, що впровадження edge-рішень дозволяє зменшити трафік до 60%, удвічі скоротити затримки та утримати зменшити час доставки ключових повідомлень. Отримані результати свідчать про перспективність подальшої інтеграції edge computing в телемедицинні платформи, зокрема у випадках обмеженої пропускної здатності каналів та необхідності автономної обробки даних.

У подальших дослідженнях планується розробка адаптивних інтелектуальних алгоритмів, які автоматично регулюватимуть параметри обробки і передачі на основі машинного навчання, з урахуванням змінних умов навколишнього середовища та пріоритетності медичних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулик А.Я., Мотигін В.В., Кулик Я.А., Книш Б.П. Телемедицина. Комп'ютерні системи та інформаційні технології. – Вінниця: ВНМУ, 2020. – 293 с.
2. Ярославський Я.І., Павлов С.В., Костюк С.В., Тимчик С.В. (2022). Принципи побудови телемедицинних мереж і систем на основі волоконно-оптичних каналів зв'язку у Вінницькій області. Волоконно-оптичні технології в інформаційних (internet, intranet тощо) та енергетичних мережах, 42(2). [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-84-95>
3. Satyanarayanan M. The Emergence of Edge Computing. [Електронне джерело]. Режим доступу <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
4. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
5. Li, Y., & Li, M. (2022). Edge computing for smart healthcare systems: A comprehensive review. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.12.003>

Яковишен Павло Олександрович - аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, yakovishen3@gmail.com.

Тужанський Станіслав Євгенович – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, slavat@vntu.edu.ua.

Yakovyshen Pavlo Oleksandrovych - Postgraduate student, Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, yakovishen3@gmail.com.

Tuzhanskyi Stanislav Yevhenovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, slavat@vntu.edu.ua.