

Особливості синхронізації даних у телемедицині системах з розподіленою обробкою даних

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядаються проблеми синхронізації даних у телемедицині системах, побудованих на основі розподіленої обробки даних. Особливу увагу приділено часовій та логічній узгодженості даних, що надходять із незалежних джерел медичної інформації та обробляються на різних обчислювальних рівнях. Проаналізовано чинники, які призводять до порушення синхронізації, зокрема асинхронність сенсорів, нестабільність мережових характеристик та узгодженість станів розподілених вузлів. Наведено класифікацію основних чинників десинхронізації та узагальнено їхній вплив на коректність обробки телемедицині даних у системах реального часу.

Ключові слова: телемедицині системи, розподілена обробка, синхронізація даних, часові мітки, мережові затримки.

Abstract

This work examines the problems of data synchronization in telemedicine systems based on distributed data processing. Particular attention is paid to the temporal and logical consistency of data received from independent medical information sources and processed at different computational levels. The factors that lead to synchronization disruption are analyzed, including sensor asynchrony, instability of network characteristics, and inconsistencies in the states of distributed nodes. A classification of the main desynchronization factors is presented, and their impact on the correctness of telemedical data processing in real-time systems is summarized.

Keywords: telemedicine systems, distributed processing, data synchronization, timestamps, network latency

Вступ

Розвиток телемедицині систем супроводжується переходом від централізованих архітектур до розподілених моделей обробки даних, які поєднують периферійні пристрої збору інформації, локальні обчислювальні вузли та хмарні сервіси. Такий підхід обумовлений зростанням обсягів медичних даних, необхідністю зменшення затримок передавання та підвищенням вимог до масштабованості телемедицині сервісів. У системах дистанційного моніторингу стану пацієнтів, телеметрії та відеоконсультацій розподілена обробка дозволяє виконувати частину обчислень безпосередньо поблизу джерел даних, що зменшує навантаження на мережу та центральні сервери.

Водночас використання розподілених архітектур суттєво ускладнює забезпечення узгодженості телемедицині даних. На відміну від централізованих систем, де всі потоки обробляються в одному обчислювальному центрі, у розподілених телемедицині системах дані одного пацієнта можуть генеруватися та оброблятися незалежними вузлами з різними часовими характеристиками. У таких умовах коректність аналізу стану пацієнта безпосередньо залежить від точності часової та логічної синхронізації даних, що надходять з різних джерел [1].

Особливістю телемедицині застосувань є необхідність обробки гетерогенних потоків даних, таких як біомедицині сигнали, мультимедійні дані та службова інформація, які мають різні вимоги до затримки, точності та надійності передавання. Асинхронність генерації таких даних у поєднанні з нестабільними характеристиками мережі зв'язку створює додаткові труднощі для забезпечення їх узгодженості у часі. Навіть незначні відхилення у часових мітках можуть призводити до порушення причинно-наслідкових зв'язків між подіями, що є критичним для систем медичного моніторингу та підтримки прийняття клінічних рішень.

У телемедицині системах реального часу проблема синхронізації даних виходить за межі класичних задач передавання інформації та охоплює питання узгодження станів у розподілених компонентах системи. Затримки мережі, джиттер та обмеження алгоритмів синхронізації можуть спричинити розбіжності між фактичним станом пацієнта та його відображенням у системі. Це, у свою чергу, знижує достовірність результатів обробки та може негативно впливати на ефективність телемедицині сервісів [2].

У зв'язку з цим актуальним є аналіз проблем синхронізації даних у телемедичних системах з розподіленою обробкою, спрямований на виявлення ключових чинників, що ускладнюють забезпечення часової та логічної узгодженості даних. Такий аналіз є необхідним етапом при проектуванні та оптимізації телемедичних систем і формує основу для подальшого вдосконалення методів передавання та обробки медичної інформації.

Особливості розподіленої обробки телемедичних даних

Розподілена обробка передбачає виконання різних етапів обробки даних на географічно та логічно рознесених вузлах. У телемедичних системах це може включати попередню обробку сигналів безпосередньо на сенсорних пристроях, агрегацію та фільтрацію даних на периферійних вузлах, а також складний аналіз і зберігання у хмарних центрах обробки даних.

Такий підхід знижує затримки та дозволяє адаптувати систему до змінних умов мережі, однак ускладнює узгодження даних у часі. Кожен вузол може мати власне уявлення про поточний стан системи та використовувати різні часові шкали, що призводить до необхідності додаткових механізмів синхронізації [3].

Синхронізація в телемедичних системах при розподіленій обробці даних

Синхронізація в телемедичних системах охоплює два взаємопов'язані аспекти:

- часову синхронізацію, що забезпечує узгодженість часових міток даних, отриманих від різних джерел;
- логічну синхронізацію, яка гарантує узгоджений стан даних у розподілених компонентах системи.

На практиці ці аспекти тісно пов'язані, оскільки порушення часової узгодженості часто призводить до логічних конфліктів під час обробки та аналізу телемедичних даних.

Основні причини десинхронізації при розподіленій обробці даних наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація чинників десинхронізації даних у розподілених ТС

Чинник десинхронізації	Причина виникнення	Вплив на систему
Асинхронність	Незалежні сенсори	Порушення часової узгодженості
Затримки	Нестабільна мережа	Спотворення послідовності
Неузгодженість станів	Розподілена обробка	Некоректні результати
Реальний час	Обмеження алгоритмів	Зростання латентності

Вплив архітектури на синхронізацію

Архітектура телемедичної системи безпосередньо визначає складність і характер задач синхронізації даних. У сучасних технічних рішеннях все частіше застосовуються багаторівневі розподілені архітектури, що включають сенсорний рівень, периферійні обчислювальні вузли та централізовані або хмарні платформи обробки даних. Кожен з цих рівнів має власні часові характеристики, обчислювальні ресурси та мережеві обмеження, що ускладнює забезпечення узгодженості даних.

На сенсорному рівні дані формуються автономними біомедичними пристроями, які, як правило, не мають спільного джерела часу. Навіть при використанні локальної синхронізації похибка часових міток між різними сенсорами зростає з часом через дрейф внутрішніх годинників. Це створює початкову неузгодженість даних, яка передається на наступні рівні системи.

Периферійні обчислювальні вузли (edge-рівень) виконують агрегацію, попередню фільтрацію та аналіз телемедичних даних у режимі, близькому до реального часу. Саме на цьому рівні часто виникає необхідність синхронізації кількох потоків даних, що надходять з різних сенсорів із різними затримками. Додатковим ускладненням є те, що периферійні вузли можуть працювати незалежно один від одного та мати власний локальний час, що призводить до логічної неузгодженості результатів обробки.

На централізованому або хмарному рівні здійснюється довготривале зберігання та комплексна аналітика телемедичних даних. Хоча хмарні платформи мають значні обчислювальні ресурси, вони залежать від мережевих каналів зв'язку, затримки в яких можуть бути змінними. У таких умовах синхронізація даних ускладнюється необхідністю узгодження результатів, отриманих з різних периферійних вузлів, що обробляли дані асинхронно [4].

Приклад структурної схеми архітектури телемедичної системи з розподіленою обробкою інформації зображена на рисунку 1.



Рисунок 1 – Структурна схема телемедичної системи з розподіленою обробкою даних

Таким чином, архітектурна багаторівневність телемедичних систем призводить до появи декількох точок потенційної десинхронізації, кожна з яких може негативно впливати на коректність обробки даних. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до синхронізації, який враховує особливості кожного архітектурного рівня та взаємодію між ними.

Методи зменшення впливу десинхронізації

Зменшення негативного впливу десинхронізації в телемедичних системах з розподіленою обробкою потребує комплексного підходу, який враховує особливості архітектури системи, характеристики мережеских каналів та вимоги телемедичних застосувань до обробки даних у реальному часі. У технічних телемедичних системах застосовуються різні підходи до синхронізації, що реалізуються на різних рівнях — від мережевого до прикладного [5].

На мережевому рівні використовуються механізми часової синхронізації, які дозволяють узгоджувати локальні годинники вузлів системи та зменшувати похибки часових міток. На прикладному рівні застосовуються логічні моделі синхронізації, що забезпечують узгодженість даних без жорсткої прив'язки до глобального часу. Крім того, у розподілених телемедичних системах широко використовуються системні механізми буферизації та агрегації даних, які дозволяють компенсувати нестабільність мережеских затримок за рахунок додаткової обробки.

Кожен з цих підходів має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність його використання залежно від архітектури системи та вимог телемедичного сервісу. Для узагальнення основних характеристик таких підходів та їх порівняння за рівнем реалізації, ефективністю та впливом на затримку обробки в таблиці 2 наведено основні методи удосконалення синхронізації, що застосовуються у розподілених телемедичних системах.

Таблиця 2 – Заходи удосконалення синхронізації в телемедичних системах

Захід	Рівень реалізації	Переваги	Обмеження
Забезпечення часової синхронізації (відповідно IEEE 1588)	Мережевий	Висока точність	Залежність від мережі
Логічна синхронізація	Прикладний	Гнучкість	Обмежена точність
Буферизація	Системний	Зменшення десинхронізації	Додаткова затримка

Висновки

У роботі розглянуто проблеми синхронізації даних у телемедичних системах з розподіленою обробкою інформації. Показано, що використання багаторівневних архітектур ускладнює забезпечення часової та логічної узгодженості телемедичних даних через асинхронність джерел, нестабільність мережеских затримок та неузгодженість станів розподілених вузлів.

Проаналізовано основні чинники, що призводять до порушення синхронізації на різних архітектурних рівнях телемедичної системи, та наведено їх узагальнену класифікацію. Показано,

що прояв проблем синхронізації значною мірою залежить від організації обробки даних та вимог телемедичних сервісів до роботи в режимі реального часу.

Розглянуті підходи до зменшення впливу проблем синхронізації не є універсальними та мають застосовуватись з урахуванням архітектури системи й допустимих затримок обробки. Отримані узагальнення можуть бути використані при проектуванні телемедичних систем і слугувати основою для подальших досліджень у напрямі оптимізації передавання та обробки телемедичних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alenoghena C. O., Odia O. J., Okorogu V. N., et al. Telemedicine: A Survey of Telecommunication Technologies and Challenges. JSAN, 2023. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/jsan12020020>
2. Тужанський С. Є., Яковишен П. О. Аналіз методів передавання даних у телемедичних системах. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2024. № 47(1). С. 222–232. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-222-232>
3. Skorin-Karov L. Analysis of QoS Requirements for e-Health Services. International Journal of Telemedicine and Applications, 2010. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1155/2010/628086>
4. Latre B., Braem B., Moerman I., Blondia C., Demeester P. A Survey on Wireless Body Area Networks. Wireless Networks, Springer, 2011. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11276-010-0252-4>
5. IEEE Standard 1588-2008. Precision Time Protocol. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://standards.ieee.org/standard/1588-2008.htm>

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.