
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.738.5

П.О. ЯКОВИШЕН, С.Є. ТУЖАНСЬКИЙ

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ТЕЛЕМЕДИЧНИХ СИСТЕМ

*Вінницький національний технічний університет 21021, Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна,
E-mail: yakovishen3@gmail.com, slavat@vntu.edu.ua*

Анотація: У роботі запропоновано адаптивний метод передавання даних у інформаційних каналах телемедичних систем, що передбачає динамічне коригування стиснення, оптимізацію маршрутизації та балансування навантаження. Для підтвердження ефективності методу проведено комп'ютерне моделювання, результати якого демонструють підвищення надійності передавання у складних мережових умовах.

Запропонований підхід може підвищити якість функціонування інформаційних каналів телемедичних систем, зокрема для відеоконсультацій, дистанційного моніторингу пацієнтів і передавання діагностичних зображень у реальному часі.

Ключові слова: адаптивне передавання даних, телемедичні системи, інформаційний канал, оптимізація якості обслуговування (QoS).

Abstract: The paper proposes an adaptive data transmission method for information channels in telemedicine systems, which involves dynamic compression adjustment, routing optimization, and load balancing. To validate the effectiveness of the method, computer simulations were conducted, and the results demonstrate improved transmission reliability under challenging network conditions.

The proposed approach can enhance the performance of information channels in telemedicine systems, particularly for video consultations, remote patient monitoring, and real-time transmission of diagnostic images.

Keywords: adaptive data transmission, telemedicine systems, information channel, Quality of Service (QoS) optimization

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-53-63

ВСТУП

Розвиток інфокомунікаційних технологій відкриває нові можливості для телемедицини та інтернету медичних речей (IoMT), зокрема для віддаленого консультування, дистанційного моніторингу стану пацієнтів та оперативного обміну діагностичними даними. Однак ефективність застосування телемедичних систем значною мірою залежить від якості та стабільності передавання даних у відповідних інформаційних каналах [1]. Попередні дослідження, зокрема робота авторів [2], заклали основи для аналізу впливу мережових умов на передавання медичних даних, що стало базою для подальшого розвитку адаптивних методів. Вимоги до сучасних каналів передачі діагностичної інформації, зокрема DICOM зображень, вимагають високої пропускної здатності каналів передавання (від 1 Гбіт/с) [3]. Мінливі характеристики мережового середовища можуть призвести до втрати частини даних, що ускладнить або унеможливить постановку відповідного діагнозу.

Затримка сигналу, обмежена пропускна здатність та втрати пакетів негативно впливають на передачу даних, що є критично важливим для систем, працюючих в реальному часі. Однією з стратегій оптимізації для забезпечення надійності передавання є підхід з перерозподілом навантаження на канали зв'язку без втрат важливої діагностичної інформації.

Одним із ключових напрямів вирішення цієї проблеми є застосування алгоритмів стиснення медичних даних у поєднанні з адаптивним регулюванням параметрів передавання відповідно до змін у мережовому середовищі. Використання ефективних методів стиснення дає змогу зменшити розмір переданих файлів, що прискорює передачу інформації та мінімізує затримку.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Додаткове впровадження механізмів адаптивного керування трафіком дозволяє коригувати якість стиснення, буферизацію та механізми повторної передачі, враховуючи поточний стан мережі [4].

У статті проводиться аналіз сучасних підходів до стиснення медичних даних, оцінюється вплив нестабільного зв'язку на якість передавання та розробляється адаптивний метод, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю передачі та якістю інформації. Для підтвердження ефективності запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання, результати якого демонструють підвищення надійності передавання у складних мережевих умовах.

1. МЕТОДИ СТИСНЕННЯ МЕДИЧНИХ ДАНИХ

Передавання даних у телемедичних системах є складним процесом, що вимагає забезпечення високої швидкості, збереження якості інформації та мінімізації затримок. Діагностичні зображення та відеопотоки потребують значних обсягів пам'яті та пропускну здатності мережі, що створює значне навантаження на канали зв'язку. У зв'язку з цим застосування методів стиснення відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного передавання даних [3].

Методи стиснення дозволяють скорочувати обсяги переданої інформації шляхом зменшення надлишкових даних та/або представлення їх у компактнішому форматі. Вибір алгоритму стиснення визначається типом медичних даних, вимогами до точності їх відновлення та умовами передавання. Основними підходами є стиснення з втратами, що дозволяє досягти суттєвого зменшення розміру файлів, та стиснення без втрат, яке забезпечує повне збереження вихідної інформації.

Стиснення з втратами. Методи стиснення з втратами спрямовані на значне скорочення обсягу переданих даних за рахунок видалення інформації, яка має мінімальний вплив на візуальне або функціональне сприйняття медичних зображень. Цей підхід використовується переважно для стиснення великих діагностичних зображень, таких як комп'ютерна томографія (КТ), магнітно-резонансна томографія (МРТ) та рентгенівські знімки, де можна допустити мінімальні втрати якості без критичних наслідків для діагностики.

Одним із найпопулярніших методів у медицині є JPEG 2000, який використовує дискретне вейвлет-перетворення для покращеного стиснення зображень. На відміну від класичного алгоритму JPEG, що працює на основі дискретного косинусного перетворення, JPEG 2000 забезпечує гнучку компресію та дає змогу регулювати ступінь стиснення, зберігаючи при цьому важливі діагностичні деталі.

Ще одним ефективним методом є SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) – алгоритм, який виконує прогресивне кодування, що дозволяє передавати дані поступово, починаючи з найбільш важливих компонентів. Це дає змогу отримати високий рівень деталізації при зменшеному обсязі даних, що є важливим для телемедичних додатків, де доступ до детальних діагностичних знімків може бути обмеженим через мережеві обмеження.

Попри переваги стиснення з втратами, цей підхід має певні обмеження, оскільки може спричинити артефакти на зображеннях, які в деяких випадках можуть ускладнити аналіз та інтерпретацію діагностичних даних. Тому вибір параметрів стиснення має здійснюватися з урахуванням допустимого рівня втрат інформації.

Стиснення без втрат. У випадках, коли будь-яка втрата даних є неприпустимою, використовуються методи стиснення без втрат. Цей підхід особливо важливий для передавання біомедичних сигналів, зокрема електрокардіограм (ЕКГ), електроенцефалограм (ЕЕГ), ультразвукових досліджень та лабораторних показників, де навіть мінімальне викривлення може змінити діагностичні результати [4].

До найбільш ефективних методів стиснення без втрат належить Huffman coding, який базується на побудові кодового дерева та присвоєнні коротших кодів символам, що зустрічаються частіше. Це дозволяє значно зменшити обсяг файлів без втрати будь-яких даних.

Іншим методом є FLAC (Free Lossless Audio Codec), який використовується для стиснення аудіосигналів без втрати якості. Цей алгоритм добре підходить для передавання біомедичних звукових даних, таких як фонокардіограми, що використовуються для діагностики серцевих шумів та інших кардіологічних відхилень.

На відміну від методів стиснення з втратами, алгоритми без втрат не дозволяють суттєво зменшити розмір даних, проте вони гарантують їхню точність та повне відновлення після декомпресії.

Порівняння методів стиснення. Вибір алгоритму стиснення залежить від типу переданих даних та їхньої важливості для діагностики. Для діагностичних зображень (КТ, МРТ, рентген) застосовується стиснення з втратами, оскільки воно дозволяє суттєво зменшити обсяг файлів без критичних втрат деталей. Для біомедичних сигналів (ЕКГ, ЕЕГ, фонокардіограми) використовується стиснення без втрат,

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

щоб уникнути спотворення важливої медичної інформації. Порівняння методів стиснення медичних даних наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння методів стиснення для медичних даних

Тип даних	Метод стиснення	Алгоритми	Основні переваги	Обмеження
Діагностичні зображення (КТ, МРТ, рентген)	Стиснення з втратами	JPEG 2000, SPIHT	Значне зменшення розміру файлів, висока деталізація	Можливі незначні артефакти
Біомедичні сигнали (ЕКГ, ЕЕГ)	Стиснення без втрат	Huffman coding, FLAC	Повне збереження інформації, точне відновлення	Менше зменшення обсягу даних
Аудіосигнали (фонокардіограми)	Стиснення без втрат	FLAC	Якісне передавання звуку без втрат	Вимагає більше пам'яті, ніж стиснення з втратами

Ефективне стиснення даних є важливим етапом оптимізації телемедичних систем, що дозволяє зменшити навантаження на мережу, покращити швидкість передавання та забезпечити точність діагностики. Стиснення з втратами є оптимальним для передавання великих зображень, тоді як стиснення без втрат необхідне для сигналів, де важлива повна збереженість даних.

Запропоновані методи є основою для подальшого вдосконалення алгоритмів адаптивного передавання даних у телемедичних системах, що буде розглянуто в наступних розділах.

2. ВПЛИВ МЕРЕЖЕВИХ УМОВ НА ЯКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Передавання інформації в телемедичних системах є надзвичайно чутливим процесом до якості мережевого з'єднання. Такі фактори, як мережеві затримки, втрати пакетів і пропускна здатність, можуть суттєво вплинути на швидкість та якість передавання даних, що має критичне значення для діагностичних рішень та оперативного обслуговування пацієнтів. Коливання параметрів зв'язку можуть спричинити затримки в отриманні зображень, переривання відеоконсультацій або спотворення біомедичних сигналів, що, своєю чергою, може вплинути на точність аналізу стану пацієнта.

Для аналізу впливу цих факторів розглянемо основні мережеві параметри, що впливають на стабільність передавання даних у телемедичних системах, та їхній вплив на різні типи медичної інформації.

Мережеві затримки: вплив на передавання медичних даних. Мережева затримка (latency) – це часовий проміжок між відправленням пакета даних і його отриманням. Висока затримка може значно вплинути на якість обслуговування в телемедицині, особливо у випадках, коли необхідний режим реального часу, як-от відеоконсультації, передавання біомедичних сигналів або дистанційне керування медичними пристроями [5].

Основні фактори, що впливають на затримку:

- фізична відстань між відправником і отримувачем. Чим довший маршрут даних через мережеві вузли, тим вища затримка;
- тип мережевого з'єднання. Оптиковолокні мережі забезпечують мінімальні затримки, тоді як мобільні та супутникові з'єднання можуть мати значні часові коливання;
- завантаженість мережі. Високий трафік у пікові години може спричиняти затримки, особливо у спільних каналах зв'язку.

Вплив затримки на телемедичні сервіси:

- відеоконсультації – при затримці понад 150 мс пацієнт і лікар можуть відчувати труднощі у спілкуванні через розсинхронізацію звуку та відео;
- передавання діагностичних зображень – затримки понад 500 мс можуть значно сповільнювати процес отримання результатів КТ або МРТ;
- дистанційна хірургія – для хірургічних роботизованих систем затримка повинна бути меншою за 50 мс, інакше точність рухів лікаря може бути порушена.

Отже, у телемедичних системах важливо враховувати мінімізацію затримок шляхом використання ефективних методів управління трафіком та адаптивних алгоритмів передавання даних.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Втрати пакетів та їхній вплив на медичну інформацію. Втрати пакетів (packet loss) – це ситуація, коли певна частина переданих даних не досягає місця призначення через перевантаження мережі, нестабільний сигнал або помилки в маршрутизації [6].

До основних причин втрат пакетів можна віднести:

- перевантаження мережевих каналів: при високому навантаженні пакети можуть бути відкинуті маршрутизаторами;
- нестабільне бездротове з'єднання: Wi-Fi, LTE та 5G з'єднання можуть страждати від перешкод і втрати сигналу;
- перехід між мережами: при зміні мережевого середовища (наприклад, під час переміщення між Wi-Fi та мобільною мережею) можливі втрати даних.

Вплив втрат пакетів на медичні сервіси:

- відеозв'язок: втрата понад 2-3% пакетів викликає ривки у відео, втрату якості та зависання зображення;
- біомедичні сигнали (ЕКГ, ЕЕГ): навіть 1% втрати може призвести до втрати критичних моментів у записах;
- передавання зображень: втрати понад 5% можуть спричинити артефакти або часткову втрату інформації у медичних знімках.

Для компенсації втрат пакетів використовуються технології Forward Error Correction (FEC), які дозволяють відновлювати втрачені пакети без необхідності повторної передачі.

Вплив пропускної здатності на якість передавання даних. Пропускна здатність (bandwidth) визначає максимальний обсяг даних, що може бути переданий через мережу за певний проміжок часу. Недостатня пропускна здатність є однією з головних причин зниження продуктивності телемедичних систем. В таблиці 2 наведені вимоги до мінімальної швидкості передавання медичних даних, залежно від їх типу та застосування.

Таблиця 2

Вимоги до мінімальної швидкості передачі для різних телемедичних застосувань

Тип сервісу	Мінімальна швидкість (Мбіт/с)
Відеоконсультація (HD-якість)	5
Дистанційний моніторинг життєвих показників	2
Передавання фотографічних зображень	10
Хмарне зберігання та аналіз медичних даних	100
Передавання та аналіз DICOM зображень	1000

Якщо пропускна здатність каналу є нижчою за мінімальні вимоги, можуть виникати проблеми зі швидкістю завантаження даних, що ускладнює діагностичний процес.

Отже, аналіз мережевих умов показав, що якість передавання медичних даних безпосередньо залежить від рівня затримок, втрат пакетів та пропускної здатності мережі. Високі затримки можуть вплинути на відеоконсультації та дистанційне управління медичними пристроями, втрати пакетів викликають артефакти в медичних зображеннях та порушення в біомедичних сигналах, а недостатня пропускна здатність сповільнює процес передавання даних [7].

Для вирішення цих проблем необхідно застосовувати адаптивні алгоритми керування трафіком, які динамічно змінюють параметри передавання залежно від умов мережі.

3. МЕТОД АДАПТИВНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЧНИХ СИСТЕМ

Ефективне передавання даних у телемедичних системах є складним завданням, яке вимагає врахування змінних мережевих умов, мінімізації затримок і втрат пакетів, а також забезпечення високої якості переданої інформації. У цьому розділі детально описано розроблений метод адаптивного передавання даних, який ґрунтується на аналізі стану мережі та динамічному коригуванні параметрів передавання.

Запропонований метод враховує ключові фактори, що впливають на ефективність передавання, зокрема доступну пропускну здатність, рівень втрат пакетів і середню затримку сигналу. Відмінною рисою підходу є динамічна зміна параметрів передавання, що дозволяє адаптувати процес передачі даних до поточних мережевих умов у реальному часі.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Запропонований метод базується на концепції адаптивного управління якістю передавання, що передбачає коригування способу обробки та передачі даних залежно від зміни характеристик мережі. Основними принципами функціонування методу є:

1) моніторинг мережевих параметрів у реальному часі – система постійно оцінює основні показники роботи мережі, включаючи рівень втрат пакетів, пропускну здатність каналу, середню затримку та варіабельність сигналу;

2) адаптивна зміна рівня стиснення – залежно від доступної пропускну здатності система вибирає відповідний рівень компресії медичних даних (низький рівень стиснення при високій пропускну здатності, високий – при обмежених ресурсах);

3) динамічне балансування навантаження між каналами – якщо один канал зв'язку перевантажений або має високі втрати пакетів, система автоматично перемикається на альтернативний канал (Wi-Fi, мобільний зв'язок 4G/5G, дротове з'єднання);

4) оптимізація передавання за допомогою корекції помилок – використання механізмів, таких як Forward Error Correction (FEC), для компенсації втрат без необхідності повторного запиту даних;

5) пріоритезація типів даних – критично важливі біомедичні сигнали (наприклад, ЕКГ, ЕЕГ) отримують вищий пріоритет перед передачею другорядних даних (зображення, відеопотоки меншої важливості).

Блок-схема алгоритму адаптивного передавання даних зображена на рисунку 1.

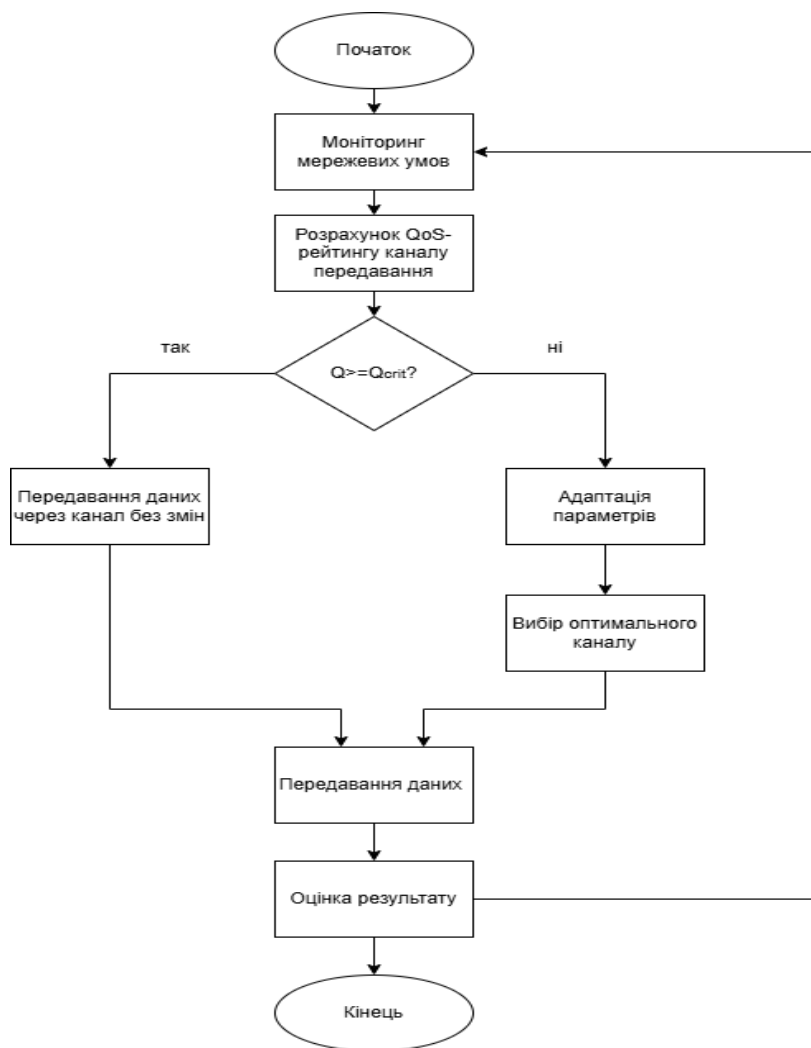


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму адаптивного передавання даних

Для реалізації запропонованого підходу використовується багаторівнева система адаптації, яка подана в таблиці 3.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Таблиця 3

Архітектура методу адаптивного передавання даних

Рівень	Функції
Моніторинг мережі	– вимірювання параметрів зв'язку (затримка, втрати пакетів, пропускна здатність); – оцінка стабільності мережі для прогнозування змін у якості зв'язку.
Аналіз та прийняття рішень	– визначення критичності даних, що передаються; – вибір оптимального рівня стиснення; – рішення про зміну маршрутизації або активування резервного каналу.
Адаптація параметрів	– динамічна зміна алгоритмів компресії; – застосування методів корекції помилок; – балансування навантаження між кількома каналами зв'язку.

Для оцінки ефективності каналів передавання даних у телемедицині запропоновано уніфікований підхід, що враховує ключові мережеві параметри: пропускну здатність (B), затримку (D) та рівень втрат пакетів (L). Оскільки ці величини мають різні одиниці вимірювання, було застосовано нормалізацію параметрів відносно їх максимально припустимих значень у межах конкретного сценарію застосування.

Оцінка якості передавання даних (QoS-рейтинг каналу) здійснюється за формулою 1:

$$Q = \alpha \frac{B}{B_{\max}} - \beta \frac{L}{L_{\max}} - \gamma \frac{D}{D_{\max}}, \quad (1)$$

де B – поточна пропускна здатність каналу (Мбіт/с); L – відсоток втрат пакетів (%); D – середня затримка сигналу (мс); $B_{\max}$, $L_{\max}$ та $D_{\max}$ – граничні (критичні) значення параметрів для поточного сервісу (наприклад, для відеозв'язку або передавання зображень); α , β , γ – узагальнені вагові коефіцієнти, що визначають вплив кожного з факторів, відповідно до специфіки сервісу [8].

Вагові коефіцієнти α , β та γ відіграють ключову роль у визначенні пріоритетності окремих параметрів якості зв'язку залежно від схеми організації телемедицини сервісу. Різні сервіси вимагають різного рівня чутливості до мережевих характеристик, тому коефіцієнти обираються на основі функціональних вимог конкретного виду телемедицини застосування, а саме:

1) Відеоконсультації у режимі реального часу: цей тип зв'язку є найбільш чутливим до затримки. Розсинхронізація звуку та зображення при затримці понад 150 мс створює помітний дискомфорт у комунікації. Разом з тим, втрата окремих пакетів може частково компенсуватись методами буферизації або інтерполяції. Узагальнені вагові коефіцієнти обираються таким чином: $\alpha = 0.3$ (вплив пропускної здатності важливий, але не критичний); $\beta = 0.3$ (втрата даних важлива, але менш значуща за затримку); $\gamma = 0.4$ (пріоритет на мінімальній затримці).

2) Передавання діагностичних зображень (КТ, МРТ). У цьому випадку якість зображення та обсяг переданих даних мають вищий пріоритет, ніж швидкість. Передавання може відбуватись із затримкою в кілька секунд, головне – щоб не було втрат або артефактів. Тому вибір вагових коефіцієнтів відбувається таким чином: $\alpha = 0.5$ (вплив пропускної здатності максимальний при передаванні великих обсягів інформації); $\beta = 0.4$ (втрата навіть частини даних неприпустима); $\gamma = 0.1$ (вплив затримки мінімальний, може бути понад 500 мс).

Оскільки універсальних коефіцієнтів не існує, вони визначаються експертним шляхом (на основі аналізу вимог до сервісу) або отримуються на основі навчання моделей оптимізації, що є перспективним напрямом подальших досліджень.

Отже, запропонований підхід базується на принципах багатокритеріальної оцінки ефективності каналів зв'язку в системах реального часу. Нормалізація параметрів пропускної здатності, втрат пакетів та затримки усуває вплив різних одиниць вимірювання, що дозволяє коректно поєднувати ці фактори в єдиному показнику якості. Використання вагових коефіцієнтів забезпечує можливість адаптації оцінки залежно від специфіки телемедицини застосування, де різні параметри можуть мати різну критичність.

Чим вищий рівень доступної пропускної здатності, тим ефективніше відбувається передавання медичних даних, оскільки більша кількість інформації може бути передана за одиницю часу без втрат якості. Водночас підвищення рівня втрат пакетів або збільшення середньої затримки негативно впливає на якість зв'язку, що може спричинити нестабільність передавання та погіршення діагностичної точності.

Якщо значення Q падає нижче певного критичного порогу Q_{crit} , система автоматично активує механізми коригування. Це може включати збільшення рівня стиснення даних, активацію механізмів

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

виправлення помилок або перемикання на альтернативний канал передавання. Таким чином, система забезпечує безперебійний обмін даними, навіть за умов погіршення якості мережевого з'єднання.

У випадку погіршення мережевих умов система може застосовувати наступні адаптивні механізми, що наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Адаптивна реакція системи на зміни мережевих умов

Сценарій	Мережеві умови	Дії системи
Оптимальні умови	$Q > Q_{crit}$	Передавання без змін, мінімальне стиснення.
Зниження пропускної здатності	$B \downarrow$	Збільшення рівня стиснення даних.
Збільшення втрат пакетів	$L \downarrow$	Активування Forward Error Correction (FEC).
Підвищення затримки	$D \uparrow$	Використання буферизації для компенсації затримок.
Критичний рівень втрат ($Q < Q_{crit}$)	Високі затримки та втрати пакетів	Перемикання на альтернативний канал зв'язку (4G/5G, Wi-Fi).

Зміна рівня стиснення залежить від доступної пропускної здатності, що розраховується за формулою:

$$C = C_{max}(1 - \frac{B_{min}}{B}), \quad (2)$$

де C – поточний рівень стиснення; C_{max} – максимальне можливе стиснення; B_{min} – мінімальна необхідна пропускна здатність для передавання без стиснення; B – поточна доступна пропускна здатність [9].

Якщо B зменшується, система автоматично збільшує ступінь стиснення, щоб забезпечити стабільне передавання.

Запропонований метод дозволяє автоматично перемикатися між доступними каналами зв'язку (Wi-Fi, 4G, 5G) залежно від їхньої якості. Рішення про вибір каналу приймається за правилом, що описується формулою 3:

$$C_{opt} = \arg \max_{i \in N}(Q_i), \quad (3)$$

де C_{opt} – оптимальний канал передавання; Q_i – показник якості для кожного каналу i ; N – набір доступних каналів.

Якщо якість поточного каналу погіршується, алгоритм вибирає альтернативний канал із максимальним значенням Q [10-11].

Для перевірки ефективності запропонованого методу було проведено експериментальне моделювання у середовищі Python. Аналізувалися три рівні якості мережі:

- 1) оптимальні умови – висока пропускна здатність, мінімальні затримки та втрати;
- 2) середня якість зв'язку – помірна затримка (~120 мс), втрати пакетів до 3%;
- 3) поганий зв'язок – значні затримки (> 200 мс), втрати пакетів до 7%.

Порівняння ефективності передавання наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння ефективності передавання

Параметр	Без адаптації	З адаптацією
Середня затримка (мс)	180	90
Втрата пакетів (%)	4.2	1.5
Якість передавання	Нестабільна	Оптимізована

Отже, запропонований метод адаптивного передавання дозволяє динамічно змінювати параметри стиснення, балансувати навантаження між каналами зв'язку та компенсувати втрати пакетів у режимі реального часу. Завдяки використанню математичної моделі, що оцінює якість мережевого каналу, система автоматично коригує спосіб передавання, забезпечуючи стабільність навіть у складних мережевих умовах.

Отримані результати підтверджують, що використання адаптивного алгоритму дозволяє зменшити затримку передавання на 50% та скоротити втрати пакетів у 2-3 рази порівняно з традиційними методами.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

4. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Для оцінки ефективності запропонованого методу адаптивного передавання медичних даних було проведено експериментальне дослідження, яке передбачало імітаційне моделювання різних мережевих умов і аналіз впливу запропонованого підходу на ключові параметри передавання. Основна мета експерименту полягала у порівнянні традиційного способу передавання з адаптивним методом, що дозволяє автоматично коригувати рівень стиснення даних, балансувати навантаження між каналами та мінімізувати втрати інформації при передаванні через нестабільні мережі.

Дослідження виконано у середовищі Python, де було змодельовано три сценарії роботи мережі, що відповідають реальним умовам телемедичних систем.

Технічні характеристики моделювання: використовувалося середовище Python 3.10 із бібліотеками SimPy, NumPy та Matplotlib. Передача даних імітувалася у вигляді 500 пакетів по 10 кБ, що формували діагностичне зображення розміром 5 МБ. Симулювалися типові мережі: Wi-Fi (100 Мбіт/с), LTE (30 Мбіт/с) та 5G (до 200 Мбіт/с). Затримки сигналу залежали від сценарію і становили: 50 мс (стабільне з'єднання), 120 мс (середнє), понад 200 мс (нестабільне). Втрати пакетів моделювалися випадковими подіями з імовірностями 0.5%, 3% та 7% відповідно. Адаптивний алгоритм виконував корекцію параметрів у реальному часі – зміну ступеня стиснення, перемикання каналів на основі QoS-рейтингу та активацію механізмів FEC при досягненні порогу втрат.

У ході експерименту аналізувалися такі показники, як середня затримка передавання, рівень втрат пакетів та загальний час передачі медичних зображень великого розміру.

Експеримент проводився з метою оцінки ефективності запропонованого методу в умовах різної стабільності мережевого з'єднання. Було сформовано три сценарії мережевих умов, які імітують реальні ситуації під час передавання даних у телемедичних системах.

Сценарій 1: Стабільне з'єднання – характеризується високою пропускну здатністю, низьким рівнем втрат пакетів (до 0,5%) та мінімальними затримками сигналу (близько 50 мс).

Сценарій 2: Середня якість зв'язку – моделює мережу з періодичними коливаннями пропускну здатності, збільшенням рівня затримки (120 мс) та втратами пакетів у межах 3%.

Сценарій 3: Нестабільне з'єднання – характеризується значними змінами в мережевому середовищі, високими затримками сигналу (> 200 мс) та суттєвими втратами пакетів (до 7%).

У межах кожного сценарію тестувалися два режими передавання:

1) традиційний підхід – передавання без урахування змін у мережі, коли дані передаються у стандартному режимі без додаткових механізмів коригування;

2) адаптивний метод – застосування запропонованого алгоритму, що передбачає моніторинг параметрів мережі у реальному часі та динамічне коригування рівня стиснення, використання резервних каналів та компенсацію втрат.

Параметри, що оцінюються:

– середня затримка передавання – час між відправленням та отриманням даних, що є критично важливим у режимі реального часу;

– рівень втрат пакетів – відсоток втрачених даних під час передавання, що впливає на точність медичних записів і діагностичних зображень;

– час передачі великого файлу – загальний час, необхідний для повного передавання діагностичних знімків (КТ, МРТ) та біомедичних сигналів.

Аналіз результатів, які представлені в таблиці 6, показав, що використання адаптивного підходу суттєво покращує продуктивність передавання даних у складних мережевих умовах.

Таблиця 6

Вплив адаптивного методу на ефективність передавання даних

Мережевий сценарій	Середня затримка (мс)	Втрати пакетів (%)	Час передачі (с)
Стабільне з'єднання (Wi-Fi, 5G)	50	0.5	2.0
Середня якість зв'язку	120 → 80	3 → 1.2	5.4 → 3.2
Нестабільне з'єднання	200 → 100	7 → 2.5	10.2 → 5.8

Як видно з таблиці 6, у випадку стабільного з'єднання використання адаптивного підходу не дає значного приросту ефективності, оскільки параметри передавання вже знаходяться на оптимальному рівні. Однак при середній якості зв'язку середня затримка зменшилася на 33%, а рівень втрат пакетів –

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

більш ніж у двічі. Найбільші покращення спостерігалися при роботі в нестабільних мережах, де адаптивний алгоритм дозволив зменшити затримку на 50% і втрати пакетів у 3 рази.

На рисунках 2-3 зображені графіки, які відображають зміну затримки передавання даних та вплив застосування адаптованого методу на втрату пакетів відповідно.

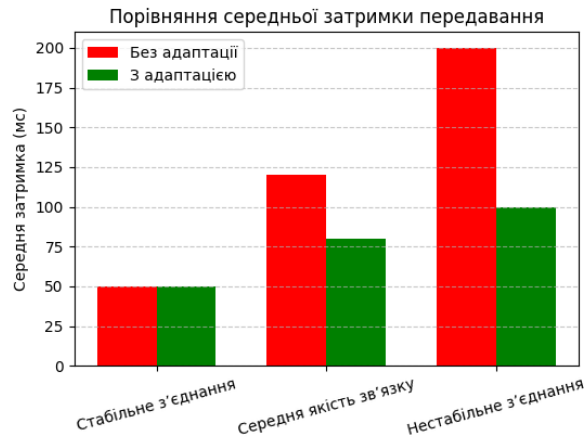


Рисунок 2 – Порівняння середньої затримки передавання медичних даних

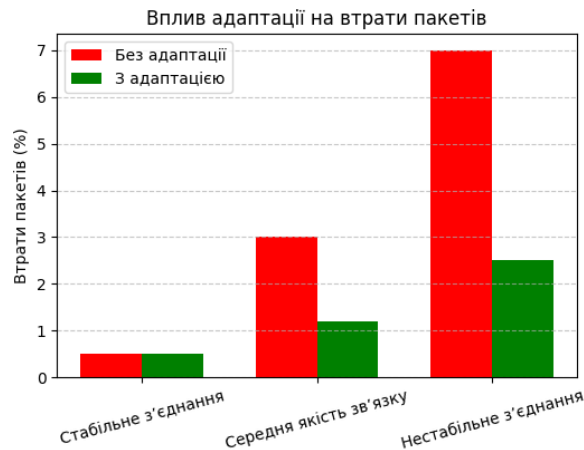


Рисунок 3 – Вплив застосування адаптованого методу на втрати пакетів

Результати дослідження підтвердили ефективність запропонованого підходу у різних умовах надійності мережевого середовища. В умовах стабільного з'єднання покращення продуктивності було незначним, оскільки якість зв'язку вже відповідала вимогам телемедицини. Однак при збільшенні затримки сигналу та втрат пакетів адаптивний метод дозволив суттєво зменшити негативні ефекти нестабільності мережі.

Аналіз показав, що використання адаптивного стиснення, корекції помилок та балансування між кількома каналами зв'язку дозволяє забезпечити стабільне передавання медичних даних у реальному часі за умов змін у мережевому середовищі. Зокрема, метод може бути корисним для систем дистанційного моніторингу стану пацієнтів, відеоконсультацій лікарів і передавання великих діагностичних зображень у хмарні сервери.

Отримані результати демонструють перспективність адаптивного підходу, що дозволяє покращити продуктивність передавання даних та забезпечити більш ефективне використання мережевих каналів телемедицинських систем.

Варто зазначити, що ефективність алгоритму адаптивного регулювання була протестована за умов контрольованих змін мережевих характеристик. У випадках швидких або непередбачуваних змін стану мережі (наприклад, в умовах роумінгу або при різких стрибках навантаження) може знадобитися додаткова оптимізація механізмів адаптації для забезпечення стабільного передавання даних.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВИСНОВКИ

Розвиток телемедицини та ІоМТ вимагає ефективних рішень для передавання даних у реальному часі, особливо в умовах нестабільного мережевого середовища. Проведене імітаційне моделювання підтвердило ефективність адаптивного передавання даних у порівнянні з традиційними методами. Отримані результати свідчать, що застосування запропонованого підходу дозволяє зменшити середню часову затримку, скоротити втрати пакетів, а також оптимізувати час передачі великих діагностичних зображень. В умовах нестабільного мережевого середовища метод є перспективним для використання у віддалених регіонах або при мобільному доступі до телемедичних платформ.

Таким чином, застосування адаптивних алгоритмів передавання даних покращує якість медичних телекомунікаційних сервісів. Застосування методів машинного навчання для покращення прогнозування змін у мережевому середовищі дозволить більш точно коригувати параметри передавання залежно від очікуваних змін у якості зв'язку. Крім того, перспективним напрямом є розширення алгоритмів адаптації для роботи з 5G-мережами та хмарними платформами, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки передавання персональних медичних даних. До того ж, інтеграція новітніх технологій, таких як VCSEL-лазери, може значно підвищити швидкість і стабільність передачі медичних даних завдяки їхній здатності забезпечувати високочастотну модуляцію та низьке енергоспоживання, що особливо актуально для телемедичних систем у реальному часі [12].

Запропонований метод має потенціал для інтеграції в сучасні телемедичні системи, що зробить медичні послуги більш доступними, ефективними та стійкими до змін у мережевому середовищі.

Перспективою подальших досліджень є розширення запропонованого підходу шляхом інтеграції методів машинного навчання для автоматичного налаштування вагових коефіцієнтів залежно від характеру мережевого середовища та типу телемедичного сервісу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування : навчальний посібник / С. М. Злепко [та ін.] / уклад. : С. М. Злепко, С. В. Павлов, Л. Г. Коваль, І. С. Тимчик. Вінниця: ВНТУ, 2011. 133 с.
2. П.О. Яковичен, С.С. Тужанський. Аналіз методів передавання даних в телемедичних системах. Волоконно-оптичні технології в інформаційних (internet, intranet тощо) та енергетичних мережах. 2024. Том 47 № 1. С. 222-232.
3. Craig J., Patterson V. Introduction to the practice of telemedicine. Journal of Telemedicine and Telecare. 2005. Vol. 11, № 1. P. 3–9.
4. Caroline O. Alenoghena, Henry Ohize, Achonu Adejo. Telemedicine: a survey of telecommunication technologies, developments, and challenges. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2023. Vol. 12, № 2. P. 2–38.
5. Оптимізація алгоритмів для стиснення даних в носимих медичних пристроях [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/optimizing-algorithms-for-data-compression-in-wearable-health-devices>
6. Васильківський М. В., Коломієць А. А. Забезпечення якості обслуговування Інтернету медичних речей в мережі стандарту 5G. Наукові праці. 2024. № 5. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-5>
7. Кирик М. І., Андрухів Т. В., Червенець В. В., Плєсканка Н. М. Дослідження буферизації мультимедійного трафіку в мережах передавання даних. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2012. № 738. С. 100-106.
8. Чернець В. В. Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. С. 12–23.
9. Брезіцький С. М. Методи оцінки якості передавання даних у мережах зв'язку з передачею пакетів. Слово науковця. 2024. №5. С. 35-43.
10. Boveiri H. R., Javidan R., Khayami R. Telesurgery QoS improvement over SDN based on a Type-2 fuzzy system and enhanced cuckoo optimization algorithm. International Journal of Communication Systems. 2020. Vol. 33, № 11. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/dac.4426>
11. Антоненко С. А., Катрич В. А., Карпов А. І. Метод оптимального стиснення даних в системах медичного моніторингу. Наукові вісті. 2015. Т. 20, № 5. С. 46-50.
12. Medin M. A. Alrawashdeh, Hennadiy L. Lysenko, Stanislav Ye. Tuzhanskyi, Igor V. Abramchuk, Paweł Komada, Akmaral Tleshova, Gulzat Ziyatbekova. Modeling of operation regimes in coupled-cavity surface-emitting laser with external photon injection. Proceedings Volume 11045, Optical Fibers and Their

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Applications 2018; 110450S (2019). [Електронне джерело]. Режим доступу:
<https://doi.org/10.1117/12.2522107>.

REFERENCES

1. Fundamentals of biomedical radioelectronic apparatus engineering: a textbook / S. M. Zlepko [et al.] / comp.: S. M. Zlepko, S. V. Pavlov, L. G. Koval, I. S. Tymchyk. Vinnytsia: VNTU, 2011. 133 p.
2. P. O. Yakovyshen, S. E. Tuzhansky. Analysis of data transmission methods in telemedical systems. Fiber-optic technologies in information (internet, intranet, etc.) and energy networks. 2024. Volume 47 No. 1. P. 222-232.
3. Craig J., Patterson V. Introduction to the practice of telemedicine. Journal of Telemedicine and Telecare. 2005. Vol. 11, No. 1. P. 3–9.
4. Caroline O. Alenoghena, Henry Ohize, Achonu Adejo. Telemedicine: a survey of telecommunication technologies, developments, and challenges. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2023. Vol. 12, No. 2. P. 2–38.
5. Optimization of algorithms for data compression in wearable medical devices [Electronic resource]. Access mode: <https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/optimizing-algorithms-for-data-compression-in-wearable-health-devices>
6. Vasylykivskyi M. V., Kolomiyets A. A. Ensuring the quality of service of the Internet of Medical Things in the 5G standard network. Scientific Works. 2024. No. 5. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-5>
7. Kyryk M. I., Andrukhiv T. V., Chervenets V. V., Pleskanka N. M. Research on multimedia traffic buffering in data transmission networks. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2012. No. 738. P. 100-106.
8. Chernets V. V. Improving the quality of streaming traffic transmission in multiservice networks. Telecommunications and information technologies. 2016. P. 12–23.
9. Brezitsky S. M. Methods for assessing the quality of data transmission in packet communication networks. Word of a scientist. 2024. No. 5. P. 35-43.
10. Boveiri H. R., Javidan R., Khayami R. Telesurgery QoS improvement over SDN based on a Type-2 fuzzy system and enhanced cuckoo optimization algorithm. International Journal of Communication Systems. 2020. Vol. 33, No. 11. [Electronic source]. Access mode: <https://doi.org/10.1002/dac.4426>
11. Antonenko E. A., Katrich V. A., Karpov A. I. Method of optimal data compression in medical monitoring systems. Naukovi visti. 2015. Vol. 20, No. 5. P. 46-50.
12. Medin M. A. Alrawashdeh, Hennadiy L. Lysenko, Stanislav Ye. Tuzhanskyi, Igor V. Abramchuk, Paweł Komada, Akmaral Tleshova, Gulzat Ziyatbekova. Modeling of operation regimes in coupled-cavity surface-emitting laser with external photon injection. Proceedings Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 110450S (2019). [Electronic source]. Access mode: <https://doi.org/10.1117/12.2522107>.

Надійшла до редакції 20.02.25 р.

ЯКОВИШЕН ПАВЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: yakovishen3@gmail.com

ТУЖАНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ЄВГЕНОВИЧ – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: slavat@vntu.edu.ua

PAVLO YAKOVYSHEN, STANYSLAV TUZHANSKYI

ADAPTIVE DATA TRANSMISSION METHOD IN INFORMATION CHANNELS OF TELEMEDICINE SYSTEMS

Vinnytsia National Technical University 21021, Khmelnytske Shosse 95, Vinnytsia, Ukraine