

УДК 629.5.015

DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.86-101

HIGH-RELIABILITY DATA TRANSMISSION SOFTWARE FOR MARINE UNMANNED VEHICLES

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОНАДІЙНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ МОРСЬКИХ БЕЗПЛОТНИХ ПЛАВАЛЬНИХ АПАРАТІВ

S. Kurdiuk¹, PhD in Eng., Senior Researcher, V. Dremluk¹, Senior Researcher, O. Melnyk², D.Sc., Associate Professor, O. Onishchenko¹, D.Sc., Professor, S. Halahan¹, Senior Researcher, T. Gavrylyuk¹, Junior Researcher

С. Курдюк¹, PhD, ст. наук. співр., В. Дремлюк, ст. наук. співр., О. Мельник², д.т.н., доцент, О. Онищенко¹, д.т.н., професор, С. Галаган¹, ст. наук., співр., Т. Гаврилюк¹, мол. наук. співр.

¹National University "Odesa Maritime Academy"

¹Національний Університет "Одеська Морська Академія"

²Odesa National Maritime University

²Одеський національний морський університет

ABSTRACT

The article examines modern approaches to the development of a highly reliable data transmission system for unmanned underwater vehicles (UUVs). Unlike known solutions, an improved UUV communication algorithm is proposed. This algorithm ensures uninterrupted transmission of video information, telemetry data, and control signals for UUV mechanisms under conditions of significant interference and unstable signals. Special attention is paid to determining the technical requirements for data transmission and calculating the main characteristics of communication channels.

High-speed transmission, data protection, and communication stability in maritime environments are achieved through the proposed algorithm, which includes switching between different communication channels, data compression, and reconfiguring existing, simple equipment. The analysis of existing solutions is presented. A comparison of various types of data transmission systems is provided, highlighting key challenges related to integrating such communication systems into UUVs, which are characterized by limited energy resources.

A conceptual architecture for building a communication system is proposed. It includes the parallel use of hybrid technologies with automatic selection of the optimal transmission technology under specific UUV operating conditions. Practical results are presented, confirming the feasibility of the proposed approach for organizing communication with UUVs in uncertain and unstable operational environments.

An algorithm for the system's channel-switching operation is described. Experimental results show that the developed communication system (video transmission, control data, and telemetry) is effective even in cases where 4 out of 5 data packets are lost while traversing public Internet networks via unstable channels.

Keywords: unmanned underwater vehicles, data transmission system, maritime navigation, hybrid communication technologies, communication stability, delay, packet loss, IP routing, penalty coefficient method, satellite data transmission, LTE, VPN, QoS, QoE.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпілотні плавальні апарати (БПА) стали важливим інструментом для дослідження океанів, моніторингу екологічних змін і виконання пошуково-рятувальних та дослідницьких операцій на морі, для виконання логістичних задач у важкодоступних районах. Їх використання дозволяє виконувати різноманітні і дуже складні технологічні завдання в умовах, де участь людини є небезпечною або неможливою. Завдяки автономності та адаптивності до оточуючого середовища, сучасні БПА відіграють ключову роль у зборі даних у важкодоступних регіонах, включаючи арктичні зони, глибоководні області та райони із високою концентрацією морського трафіку, виконують завдання пошуку вибухонебезпечних об'єктів, розмінування тощо та працюють у інших особливих акваторіях.

Таким чином, БПА плавальні апарати набувають все більшого значення в сучасному світі завдяки їх ефективності при застосуванні у різних галузях економіки, до того ж, часто їх використовують у подвійному призначенні, для виконання специфічних задач.

Сучасні вимоги до БПА охоплюють не лише їхню мобільність, але й здатність до передачі даних у реальному часі, що є критично важливим для оперативного прийняття рішень, при чому ефективна експлуатація БПА значною мірою залежить від стабільності, швидкості й надійності систем передачі даних.

Передача даних у реальному часі є критично важливою для організації процесів управління такими апаратами, для аналізу отриманих від апаратів даних, телеметрії, для прийняття оперативних рішень. Особливу увагу привертає забезпечення стабільного зв'язку в умовах, де традиційні канали передачі даних часто виявляються ненадійними. Атмосферні явища, штучні перепони, глибоководні середовища, сильний вітер, хвилювання, а також інші природні фактори можуть суттєво впливати на якість сигналу, призводячи до його втрат, затримок та обмеження пропускної здатності. Саме це, наприклад, приводить до погрешностей, чи навіть до втрат, при визначенні поточних координат БПА. При великих швидкостях руху надводного БПА, наприклад, у 55 км/г, втрата зв'язку на 3 с приводить до помилок у визначенні його місця, що найменш, у 45 м, що у більшості випадків застосування БПА є неприпустимим і може привести до аварій чи провалу у виконанні технологічного завдання.

Основною проблемою залишається забезпечення передачі великих обсягів інформації, включаючи відеодані, телеметрію та сигнали управління механізмами, саме через обмеження у пропускній здатності й нестабільні канали зв'язку. Існуючі технології передачі даних часто не здатні ефективно працювати за таких умов, що створює значні ризики для виконання місій, покладених на БПА.

Абсолютно до всіх основних типів інформації, що передається БПА (телеметрія, відеодані високої роздільної здатності, моніторинг, сигнали управління окремими механізмами тощо), висуваються окремі вимоги. Але у будь-якому випадку, прийом та передача цих даних вимагає високонадійних і стабільних каналів зв'язку, здатних працювати в умовах значних перешкод, у тому числі, які виникають у водному середовищі. Сучасні БПА працюють в умовах, де якість зв'язку залежить від численних факторів, включаючи не тільки фізичні властивості води і атмосферні явища, а і дистанцію передачі даних та характеристики використовуваних каналів зв'язку. Наприклад, надводні БПА, які за допомогою свого спеціального обладнання виконують глибоководні пошукові місії (бездротові) обмежуються низькою пропускною здатністю акустичних каналів, тоді як оптичні канали зв'язку ефективні лише на малих відстанях і в прозорій воді. Радіохвилі, з іншого боку, швидко затухають у водному середовищі, що обмежує їхнє використання. Таким чином, водне середовище створює значні виклики для розробників систем зв'язку і для якісної навігації. Безумовно, для малих надводних БПА вкрай важливим є забезпечення надійного зв'язку на великих відстанях. Головними викликами у створенні таких важливих для сьогодення систем є наступні:

а) нестабільність каналів зв'язку; морське середовище характеризується сильними перешкодами, включаючи хвилі та солоність води, атмосферні впливи та штучні перешкоди, які суттєво знижують якість сигналу та інколи приводять до його спотворення;

б) потреба у мінімізації затримок сигналів управління і передачі даних; у випадках передавання відео необхідної якості та в умовах слабкої видимості, темряві, передачі телеметрії та сигналів управління, затримка понад 1-2 секунди може призвести до серйозних наслідків, особливо під час виконання рятувальних операцій, під час маневрування та в інших складних технологічних ситуаціях, коли БПА рухається з великою швидкістю;

в) обмеженість енергоресурсів на борту; БПА мають обмежений запас можливостей перетворення та використовуюваного обсягу енергії для надійного забезпечення роботи систем зв'язку, механізмів та виконання інших функцій.

Окрім технічних викликів, актуальною є проблема інтеграції БПА у глобальну мережу зв'язку та захисту даних. Ця проблема включає використання супутникових технологій, радіохвильових каналів та існуючої інфраструктури 4G/5G для забезпечення стабільної передачі даних на великі відстані. Відомо, що супутниковий зв'язок має високу часову затримку (до 600-800 мс), а системи радіозв'язку обмежені у дальності дії, особливо у морському середовищі. Крім того, на системи супутникового зв'язку типу *Starlink* накладені штучні обмеження на відстань використання, комерційні системи досить коштовні і не завжди підтримують необхідні параметри безпеки.

Узагальнена проблема, що порушується у статті, полягає в комплексному аналізі існуючих сучасних систем передачі даних для надводних БПА, у тому числі за допомогою водного середовища, виявленні ключових переваг і недоліків при передачі даних, розробці рекомендацій, алгоритмів і рішень щодо покращення технологій зв'язку з БПА, експериментальному підтвердженні прийнятих рішень.

Ціллю роботи є представлення наукового напрямку розвитку системи зв'язку з БПА з удосконаленим алгоритмом функціонування на нестабільних каналах передачі даних та аналіз досягнутих результатів.

Для досягнення цієї мети дуже важливим є вирішення наступних наукових завдань.

1. Визначити технічні характеристики сучасних систем передачі даних та проаналізувати їхню ефективність у реальних умовах експлуатації.

2. Запропонувати новий алгоритм роботи системи зв'язку, який поєднує переваги різних технологій для забезпечення стабільності та енергетичної ефективності БПА.

3. Експериментально підтвердити запропонований новий алгоритм зв'язку.

Таким чином, розробка ефективної системи передачі даних є вкрай актуальною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню надійності виконання різноманітних місій надводними БПА, підвищенню рівня їхньої адаптивності до змінюваних умов середовища. Саме це дозволить вирішувати важливі практичні завдання у сфері морської безпеки, моніторингу довкілля та проведення наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Загальні методи і принципи зв'язку у безпілотних морських технологіях. Загалом, всі системи передачі даних для безпілотних плавальних апаратів, визначаються, як ключові для сучасних морських технологій. Огляд вільно доступних джерел інформації та літератури свідчить, що основні дослідження у цій сфері зосереджуються на трьох основних і найбільш поширених напрямках: акустичні, оптичні та радіохвильові технології зв'язку та передачі даних [1-5].

Акустичні системи традиційно використовуються для підводного зв'язку завдяки їх здатності працювати на великих дистанціях (до 10 км). Роботи вчених [1] демонструють стабільність функціонування таких систем навіть у складних умовах глибоководного середовища. Основна перевага акустичних технологій – їхня здатність долати перешкоди у водному середовищі. Проте головним обмеженням залишається низька пропускна здатність,

яка рідко перевищує 10 Кбіт/с. Це обмежує використання акустичних систем для передачі великих обсягів телеметричних та моніторингових даних, відео у реальному часі або зображення високої роздільної здатності. Для надводних БПА такий зв'язок суттєво обмежується за різними причинами. Загалом, акустичні системи забезпечують стабільність сигналу на достатньо великих відстанях, тоді як оптичні й радіохвильові канали дозволяють підвищити швидкість передачі у локальних зонах.

Оптичні системи зв'язку у БПА забезпечують значно вищу швидкість передачі (до 1 Гбіт/с) та є ефективними у приповерхневих умовах використання або у прозорій воді. Різні роботи авторів, наприклад [2], свідчать, що оптичні канали є перспективними для локальних місій БПА, де дистанція передачі не перевищує 100 м. Однак, ефективність таких систем знижується у мутній воді або на великих глибинах. Сучасні розробки у сфері лазерного зв'язку спрямовані на подолання цих обмежень, але ця технологія все ще перебуває на стадії тестування. Проте сучасні експерименти, такі як використання "зеленого" лазера, показують позитивні результати у підвищенні дальності передачі даних.

Радіохвильові технології [3] використовуються для передачі даних між БПА та наземними станціями, іншими апаратами. Наприклад, передача даних через водне середовище, де є високе поглинання радіохвиль водою, їх застосування обмежене. Безумовно, використання стандартів *LTE* або *5G* для зв'язку на поверхні, відкриває нові можливості, проте стабільність сигналу залежить від погодних умов і перешкод. Інші роботи також вказують, що застосування наднизьких частот сигналів зв'язку може частково вирішити цю проблему, але це потребує значних енергетичних ресурсів БПА.

Одним із перспективних напрямів є розробка гібридних систем зв'язку, які поєднують акустичні, оптичні та радіохвильові технології. Дослідження демонструють ефективність гібридного зв'язку для передачі даних у різних умовах. Наприклад, дослідження *Kongsberg Maritime* (2020) [4] демонструє, що комбінація акустичних та оптичних каналів дозволяє досягти високої швидкості передачі на коротких дистанціях та стабільності сигналу на великих відстанях. Такий підхід дозволяє адаптувати систему зв'язку до змін у середовищі, зокрема, у мутній воді або при наявності перешкод.

Сучасні дослідження також охоплюють напрямки оптимізації енергоспоживання системами передачі даних. Використання алгоритмів компресії даних і адаптивного управління каналами зв'язку дозволяє суттєво зменшити витрати енергії на передачу інформації. Роботи авторів [5] показують, що інтеграція таких алгоритмів у гібридні системи сприяє продовженню часу автономної роботи БПА на 20-30 %.

Варто зазначити, що технологічні обмеження залишаються актуальними для всіх типів систем зв'язку. Безпілотні місії потребують значних інвестицій у розвиток акустичних і лазерних систем, приповерхневі операції вимагають стабільного, наприклад, супутникового, зв'язку, використання існуючих мереж операторів, що працюють у даному районі виконання місії. Для подолання цих викликів необхідні багаторівневі адаптивні системи передачі даних, здатні швидко адаптуватися до умов навколишнього середовища та забезпечувати баланс між швидкістю передачі, стабільністю сигналу та енергоспоживанням.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що жодна з існуючих технологій не є універсальною для всіх багатогранних умов експлуатації БПА. Розробка інтегрованих рішень, які поєднують переваги різних технологій, залишається пріоритетним завданням у сфері морських досліджень, а найбільш простим і ефективним у використанні остаються супутникові системи і системи мобільних операторів.

Системи зв'язку із віддаленими рухомими об'єктами (дронами) на основі наявних каналів доступу до мережі Інтернет. Із стрімким розвитком швидкостей передачі даних за допомогою інфраструктури мобільних операторів та операторів супутникового зв'язку, все частіше використовуються наявна інфраструктура для керування різноманітними БПЛА, БПА та та іншими типами дронів [6], передача потокового відео через реальні *IP*-мережі, які спочатку не були створені для передачі відео зображення в режимі онлайн [7]. Наприклад, операторам дронів треба отримувати прийнятну якість трансляції відео, яке буде достатньою

для подальшого використання [7, 8]. Якість передачі потокового відео сучасного актуального стандарту кодування *H.265*, також залежить від втрат пакетів передачі даних [9]. На поточний час існують практичні проблеми, коли швидкість передачі даних, пропускна здатність та швидкість каналів передачі даних з рухомого об'єкту фактично обмежена наявними каналами [10, 11]. Для сигналів управління безпілотними апаратами вже робилися дослідження та існують рекомендації щодо параметрів затримки таких сигналів [12]. Відомі перші спроби формалізації та виробітку рекомендацій стосовно затримок сигналів прийнятних для дистанційного керування БПА, (наприклад, вони були задані та описані у стандарті *MIL-F 8785 C*). Дуже важливими є практичні дослідження, які не тільки виконують ці рекомендації з управління БПА але й організують передачу відеоданих з дрону (де об'єм трафіку на порядки вище), отримують практичні результати управління в рамках наявних каналів зв'язку *LTE* та через систему супутникового зв'язку *Starlink*.

В експерименті, який представлено далі в даній статті, розглядаються практичні аспекти створення системи зв'язку із віддаленими рухомими об'єктами (у т. ч. БПА різного типу і призначення), використовуючи наявні канали доступу до мережі Інтернет для одночасної передачі сигналів управління, телеметрії, та трансляції відеозображення з борту БПА. Додатково, в процесі встановлення зв'язку з рухомим об'єктом оцінюється якість стану системи, в межах визначених параметрів зв'язку, які необхідно підтримувати щоб забезпечити зв'язок із рухомим об'єктом в умовах ситуаційної невизначеності [13-15].

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

В інформаційно-комунікаційних мережах існує багато варіантів отримання рішень щодо маршрутизації трафіку [13, 14]. З метою підвищення вірогідності обміну та передачі інформації від/на рухомі об'єкти (у т. ч. БПА), які не мають гарантованих з'єднань із мережею Інтернет або зі станцією керування, зазвичай, в типових маршрутизаторах із декількома зовнішніми *WAN*-каналами, в невеликих мережах, використовуються наступні три рішення (або їх повна сукупність чи обмежена комбінація):

- перенаправлення чи перемикання трафіку з одного інтерфейсу (*WAN*-каналу) на інший, або декілька інших *WAN*-каналів. Це робиться у випадках, якщо працюючий інтерфейс *WAN*-каналу не відгукається або має ознаки розриву зв'язку (мається на увазі фізичний або логічний розрив);

- паралельна (дублююча) багатошляхова передача трафіку даних по декільком *WAN*-каналах;

- розподілена у пропорціях багатошляхова передача трафіку по декількох *WAN*-каналах. Наприклад, 60 % пакетів даних направляються через один інтерфейс (канал), а 40 % направляються у цей час через інший.

Обґрунтуємо використання необхідного обладнання [11-15], за рахунок визначення різних налаштувань так, щоб в результаті отримати найвищі результати (швидкодія, надійність) та визначити налаштування, які врахують та збалансують вплив трьох факторів:

- а) затримка (у передачі даних та відображенні відео);
- б) пропускна здатність (ширина смуги каналу);
- в) доступність каналу зв'язку.

Формалізуємо та оцінимо вхідні дані. Для цього використовуємо наступні види трафіку: передача відео з БПА (2-3 *IP*-камери) у режимі онлайн, передача сигналів управління на БПА, передача телеметрії з БПА. Найбільший трафік передачі відеозображення з *IP*-камер. Трафіки управління та телеметрії мають значно менший об'єм даних відносно об'єму відео-трафіку. Оцінімо пропускну здатність каналів, та впливи на затримку зображення.

Оцінка генерації трафіку від пристроїв в мережу Інтернет. В ході експериментальних досліджень встановлено, що швидкість *Upload* потоку *Starlink* на рухомому об'єкті в режимі *Roaming* (в гарних реальних умовах середовища) від 4-х до 6-ти Мбіт/с. Треба зробити

налаштування таким чином, щоб *Upload* потік від відеокамер, у середньому, був не вище 4 Мбіт/с. Сучасні IP-відеокамери мають роздільну здатність від 2 Мпкс та вище, і формують одночасно декілька потоків передачі відео. Але, у більшості камер, доступні налаштування, що понижують роздільну здатність основного потоку до 1 Мпкс. В ході експериментів встановлено, що прийнятною за якістю для оператора є передача відеозображення з рухомого БПА з частотою кадрів 12, максимум 15 кадрів за секунду із роздільною здатністю від 640×480 до 1280×720 пікселів. Оцінимо трафік, який генерують IP-камери з наступними вхідними параметрами:

- пропускна здатність каналу 3 Мбіт/с;
- за базовими налаштуваннями камер використовуємо алгоритми стиснення відео *H.264* і *H.265*.

Відомо [15], що перевагу за обсягом трафіку краще віддати протоколу стиснення *H.265*, так як він забезпечує більш якісне стиснення. Але у випадках перемикання з каналу на канал визначено, що час відновлення трансляції відео у випадку використання протоколу *H.265* може бути на 1-2 секунди довшим, ніж у випадках використання на камерах протоколу *H.264*. Приймаємо для IP-камер наступні значення.

1. Камера з роздільною здатністю від 1280×720 до 1920×1080. Основний потік 1280×720, 15 fps, *H.265*. Вторинний потік 640×480, 10 кадрів у секунду, *H.265*.

2. Камера з роздільною здатністю 640×480. Основний потік 640×480, 15 fps, *H.265*.

Розрахуємо бітрейти. Для розрахунку бітрейту [18, 19] вважаємо, що значення бітрейту є добутком 3-х параметрів: "Роздільна здатність", "Частота кадрів", "Коефіцієнт стиснення".

Таким чином, приблизні значення бітрейту для протоколу *H.265* [13, 14] наступні: камера 1280×720, 15 кадрів/с - приблизно 0,7 Мбіт/с; камера 640×480, 10 кадрів/с – приблизно 0,3 Мбіт/с; камера 640×480, 15 кадрів/с та текст – приблизно 0,4 Мбіт/с.

Розрахуємо значення потоків для наступного обладнання БПА.

1. Основний потік (2 камери): 1280×720, 15 fps ($0.7 \cdot 2 = 1.4$ Мбіт/с).

2. Вторинний потік (2 камери): 640×480, 10 fps ($0.3 \cdot 2 = 0.6$ Мбіт/с).

3. Основний потік (1 камера): 640×480, 15 кадрів/с, (0.4 Мбіт/с).

Всього: $1.4 + 0.6 + 0.4 = 2.4$ Мбіт/с.

Розрахуємо накладні витрати передачі даних. Використовуємо шифрування (інкапсуляцію) відео-трафіку через тунель *VPN*. Це, дає накладні витрати у діапазоні від 4 до 10 %, у залежності від типу протоколу *VPN*. Враховуємо, що *VPN*-протокол *WireGuard* додає заголовки до кожного пакету даних у розмірі 60-80 байт. Таким чином, при необхідності у розмірі передачі стандартного пакету даних у 1500 байт маємо $(500 - 80) = 1420$ байт, тобто це залишок на корисні дані. Накладні витрати при шифруванні протоколом *WireGuard* дорівнюють $(80/1420) = 0,056 \cdot 100 = 5,6$ %.

Для *VPN* протоколу *OpenVPN* маємо наступне. Заголовок *OpenVPN* - 60-80 байт, заголовок шифрування *AES* – 16 байт, *Message Authentication code* – 16 байт. Всього 112 байт. Тоді $(1500 - 80 - 16 - 16 = 1388$ байт – залишок на корисні дані. Накладні витрати при шифруванні протоколом *WireGuard* дорівнюють $112/1388 = 0,08 \cdot 100 = 8$ %.

Простий варіант створення тунелю без шифрування. Тунель створюємо на базі комбінації протоколів *L2TP + GRE*. Наводимо основні накладні витрати такого варіанту:

– *L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol)*. Заголовок *L2TP*, додає біля 4-12 байт. Заголовок *UDP* додає 8 байт. Заголовок *IP* додає 20 байт;

– *GRE (Generic Routing Encapsulation)*. Заголовок *GRE* додає 24 байта.

Таким чином загальний розмір накладних витрат для *L2TP + GRE* складає, приблизно, 56-64 байта. Залишок на корисні дані становить $(500 - 64) = 436$ байт.

Накладні витрати при тунелюванні за варіантом *L2TP + GRE* дорівнює $(64/436) = 0,147 \cdot 100 = 14,7$ %, а загалом отримуємо швидкість $2.4 \text{ Мбіт/с} \cdot 1,08 = 2,6$ Мбіт/с.

При обраних роздільній здатності та налаштуваннях з трьох *IP*-камер та при використанні протоколу стиснення відео *H.265*, очікуваний загальний сумарний потік передачі буде до трьох Мбіт/с, що й потрібно для вирішенні задачі створення системи.

Якщо використовувати протокол потокового стиснення відеозображення *H.264*, то трафік передачі відео буде приблизно на 30 % більшим, у порівнянні із протоколом *H.265*. В ході експериментів випробувано рекомендації стосовно використання *RTCP*-потіку відеоданих та мінімізацією розміру кешу даних у налаштуваннях медіа-програвача [15]. Недоліком такого варіанту є те, що на практиці, після зміни та перемиканні каналів передачі даних, отримується постійна частина відставання відеозображення.

У табл. 1 наведені стандарти передачі даних мобільних мереж, які присутні в Україні.

Таблиця 1 - Стандарти передачі даних мобільних мереж

Покоління мережі	Стандарти	Базові характеристики	Діапазон реальних швидкостей передачі даних у мережі
2.5G	<i>GPRS</i> , <i>EDGE</i> (2.75G), 1xRTT	Інтернет, обмін медіаповідомленнями, пакетна передача даних	На першій фазі 115 Кбіт/с, на другій – 384 Кбіт/с
3G	<i>WCDMA</i> , <i>CDMA2000</i> , <i>UMTS</i>	Перша широкосмугова мережа, підтримка передачі відеопотоків, вільна передача даних (мультимедіа, текст), Інтернет	Від 2 Мбіт/с до 14 Мбіт/с
3.5G	<i>HSPA</i> , <i>HSDPA</i> , <i>HSPA+</i> (3.75G)	Підвищена швидкість для вхідного і вихідного трафіку Інтернет	Від 14 Мбіт/с до 42 Мбіт/с
4G	<i>WiMAX</i> , <i>LTE</i>	Протокол на базі IP, орієнтація на передачу масивних об'ємів інформації, реальна широкосмугова мобільна мережа	Від 30 Мбіт/с до 800 Мбіт/с

У таблиці 1 вказані зведені дані можливих максимальних швидкостей у різних поколіннях стандартів передачі даних операторів мобільного зв'язку – від *GSM GPRS* до *LTE* [15-17].

Відмінність між технологіями *3G* та *LTE*, стосовно обладнання, є в тому, що в технології *3G* зазвичай використовується фіксована ширина каналу 5 МГц, а в обладнанні, яке побудовано на технологіях *LTE 4G*, підтримуються технології *MIMO*. Саме тому можливо використовувати *Scalable Bandwidth* і організовувати канали передачі смугами у 5, 10, 15 та 20 МГц. Якщо *LTE*-модем підтримує технологію *Channel Aggregation*, тому будуть доступні більш високі швидкості передачі даних. Таким чином, визначаємо, що припустиме використання обладнання, яке працює у стандартах не лише стандарту *4G*, а і у стандартах *3.5G* та навіть і *3G*. Основна проблема, що виявлена в ході використання маршрутизаторів *RUT* полягала у повільному перемиканні з одного типу каналу зв'язку на інший тип каналу зв'язку, та у тому що операційна система маршрутизатора *RUT* “не бачить”, що тунель *WireGuard* до *VPN*-серверу встановлено. Визначено, що промислові виробники – маршрутизатори *Teltonika* серій *RUT200*, *RUT500* мають великий час переустановлення маршрутизації зв'язку передачі даних та відео [16-19]. Через обмеження програмного забезпечення виробника неможливо зменшити період інтервалу перевірки Інтернет з'єднання меншим 30 с.

Наведемо результати дослідження із використанням протоколів динамічної та статичної маршрутизації трафіку даних.

При базових налаштуваннях декількох варіантів маршрутизаторів та *IP*-камер (за замовчуванням та стандартними рекомендаціями по налаштуванню обладнання) є затримка у передачі потокового зображення одночасно з двох *IP*-камер, встановлених на БПА, яка становила від 10 до 40 с у залежності від умов місії.

Оцінимо критичність затримки відео при управлінні БПА, відносно пройденого шляху з постійною швидкістю ($s = v \cdot t$, де s – шлях, м, v – швидкість БПА, м/с, t – час затримки передачі ввідеозображення, с, з реального місцезнаходження апарата). При крейсерській швидкості руху у 40 км/г (11,1 м/с), отримуємо, що за 10 с затримки зв'язку різниця у реальному місцезнаходженні (фактичною позицією) та отриманим з *IP*-камер відеозображенням, більше 100 метрів ($s = 11,1 \text{ м/с} \cdot 10 \text{ с} = 111 \text{ м}$).

Саме тому необхідно суттєво скоротити затримку у передачі відеозображення з БПА, при використаному типі обладнання (див. рис. 1).

Interface	Interface List	Ethernet	EoIP Tunnel	IP Tunnel	GRE Tunnel	VLAN	VXLAN	VRRP	VETH	MACsec	MACVLAN	Bonding	LTE
Name	Type	Actual MTU	L2 MTU	Tx	Rx	Tx Packet (p/s)	Rx Packet (p/s)						
R ether1	Ethernet	1500	1596	13.6 Mbps	8.6 Mbps	1 768	1 433						
ether2	Ethernet	1500	1596	0 bps	0 bps	0	0						
ether3	Ethernet	1500	1596	0 bps	0 bps	0	0						
R l2tp-out1	L2TP Client	1450		0 bps	0 bps	0	0						
R lo	Loopback	65536		0 bps	0 bps	0	0						
R lte1	LTE	1500		0 bps	0 bps	0	0						
R lte2	LTE	1500		8.6 Mbps	9.5 Mbps	1 280	1 393						
X wireguard1	WireGuard	1420		0 bps	0 bps	0	0						
X wireguard2	WireGuard	1420		0 bps	0 bps	0	0						
R wireguard3	WireGuard	1420		7.9 Mbps	411.9 kbps	841	540						

Рис. 1. Приклади значень трафіку передачі даних при неоптимізованих налаштуваннях *IP*-відеокамер

На рис. 1 бачимо значення, які отримані без оптимізації потоку відеозображення з *IP*-камер. Як легко побачити, трафік порту *LAN* досягав 13.6 Мбіт/с по каналу *TX* (відправка) та 8.6 Мбіт/с по каналу *RX* (прийом), а трафік на модемі (інтерфейсі) *Lte2* становив 8.6 Мбіт/с по *TX* та 9.5 Мбіт/с по *RX*. У ході експериментів, також, виявлено, що система *Starlink* на рухомому об'єкті (40 км/г) дає середню швидкістю *Upload* потоку у 4-5 Мбіт/с. Тому треба оцінити можливість [17-21] підналаштувань під ті параметри каналів, що доступні по факту під час виконання місії БПА, тобто зробити налаштування *IP*-камер таким, щоб не перевищувати потік передачі даних у 4 Мбіт/сек.

Експерименти із дослідженням різних протоколів, як динамічної маршрутизації так і статичної маршрутизації трафіку даних, показали що в умовах ситуаційної невизначеності на нестабільних каналах передачі даних для рішення саме конкретної задачі по передачі даних з БПА (відеопотік реального часу з двох *IP*-камер з мінімізацією затримки відеозображення + телеметрія) та передача даних на БПА (керування БПА) показали необхідність створення програмного скрипту [16-23] аналізу поточного становища та оцінки працездатності наявних *WAN*-каналів обраного обладнання.

Сформуємо алгоритм вирішення поставленої задачі на практиці з урахуванням можливостей обладнання за наявності доступного функціоналу та обмежень. У таблиці 2 вказано параметри які можливо використовувати для розробки алгоритму.

Таблиця 2. Доступні параметри та функціонал на маршрутизаторі для використання та/або вимірювань для розробки алгоритму прийняття технічних рішень

№ пп.	Функціонал та/або параметр	Можливість використання у алгоритмі прийняття рішень по застосуванню WAN каналу	Можливість вимірювання чи зчитування поточного значення	Можливість задати значення параметру відносно якого приймати рішення у алгоритмі
1	<i>Ping</i> – затримка у каналі	Так	Так. Розрахункове (формульне) – визначення середнього значення	Так
2	Втрата пакетів	Так	Так. Підрахунок за допомогою формул	Так
3	Доступність інтерфейсу	Так	Так	Так
4	Ваговий коефіцієнт визначення вартості для маршруту через певний фізичний інтерфейс	Так	Так. Можливість зчитування поточного значення	Так
5	Час на прийняття рішення стосовно доступності послуги або функціоналу <i>DT</i> (<i>Decision Time</i>)	Ні	Ні	Так
6	Наявність проходження даних через інтерфейс	Ні	Так	Так
7	Гістерезис (дельта допуску) відхилення отриманих значень	Так. Стосовно команди <i>Ping</i>	Ні. Зчитується значення <i>Ping</i>	Так

На основі складеної таблиці побудуємо алгоритм (рис. 2), який оцінює стан проходження даних через зовнішній WAN-канал маршрутизатора.

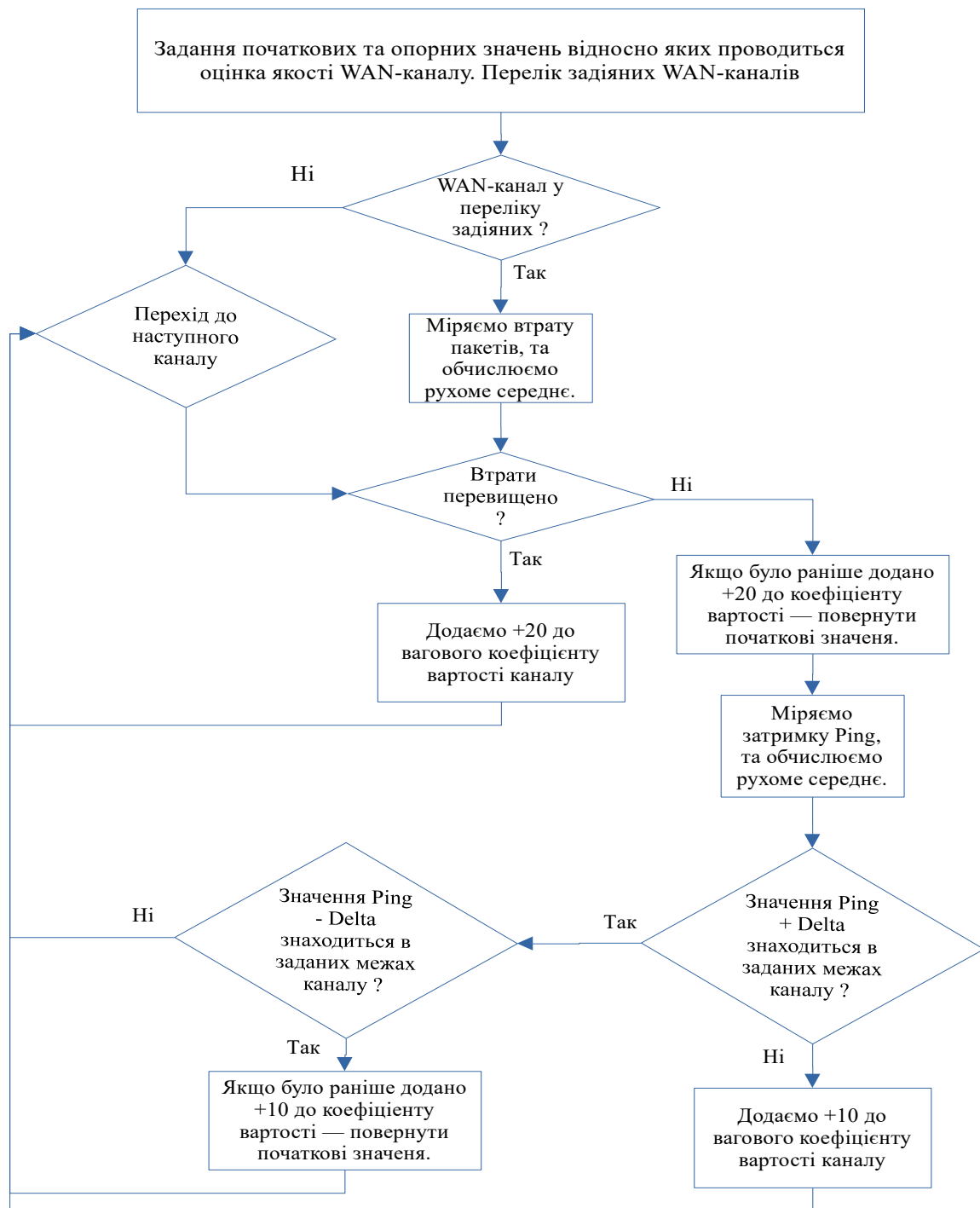


Рисунок 2. Алгоритм прийняття рішень у виборі оптимального каналу для передачі та маршрутизації даних

У алгоритмі задіяні наступні команди та параметри: початковий пріоритет використання WAN-каналу, поточне значення *ping* (затримка проходження сигналу у каналі), середньо збільшене значення *ping*, допустиме короткочасне відхилення від значення *ping*, яке дорівнює *delta-ping* (дельта-допуск) або, загальна кількість пакетів у циклі вимірювання по поточному WAN-каналі, допустима кількість втрат пакетів у WAN-каналі, час періоду блокування одного

із сервісів при виході параметрів всіх доступних каналів за межі допустимих параметрів, включення чи виключення WAN-каналу у цикл вимірювання якості [19-21, 24-26]. Спрощений код для пояснення роботи запропонованого алгоритму виглядає наступним чином.

1. Початкові умови:

- нехай (W_i), це вага маршруту для каналу (i) (де ($i = 1, 2, 3$));
- нехай (P_i), це втрата пакетів даних на каналі (i);
- нехай (L_i), це затримка в каналі (i), виміряна командою *ping*;
- нехай ($P_{\{threshold\}}$), це допустимий поріг втрат пакетів;
- нехай ($L_{\{threshold\}}$), це допустимий поріг затримки.

2. Алгоритм:

- ініціалізація початкових вагових коефіцієнтів (початкової ваги): [$W_1 = 3, W_2 = 4, W_3 = 5$];
- перевірка втрат пакетів: [Якщо $P_i > P_{\{threshold\}}$, { тоді } $W_i = W_i + 20$ { і перейти до наступного каналу }];
- перевірка затримки: [Якщо P_i менше чи дорівнює $P_{\{threshold\}}$, { тоді виміряти } L_i] [Якщо $L_i > L_{\{threshold\}}$, { тоді } $W_i = W_i + 10$];
- перехід до наступного каналу: [Повторити кроки 2 і 3 для всіх i $i = 1, 2, 3$].

3. Приклад побудови системи рівнянь:

Для кожного каналу (i) (де ($i = 1, 2, 3$)):

[$W_i = \begin{cases} W_i + 20, & \text{якщо } P_i > P_{\{threshold\}} \\ W_i, & \text{інакше} \end{cases}$];

[Якщо $P_i \leq P_{\{threshold\}}$, { тоді }];

[$W_i = \begin{cases} W_i + 10, & \text{якщо } L_i > L_{\{threshold\}} \\ W_i, & \text{інакше} \end{cases}$].

Таким чином, початкові вагові коефіцієнти статичної маршрутизації будуть корегуватись у залежності від поточних характеристик каналів, що дає більш ефективне керування маршрутизацією трафіку.

Цей простий алгоритм дозволяє динамічно змінювати вагові коефіцієнти маршрутів в залежності від поточних характеристик каналів, забезпечуючи більш пріоритетне використання каналів з меншими втратами пакетів та затримками.

У повному скрипті ми враховуємо гістерезис (дельта) – значення затримки *ping*, та повертаємо початкові вагові коефіцієнти маршрутизації каналу, якщо канал відповідає вказаним початковим вимогам (по затримці проходження даних та втратам пакетів).

Реалізація запропонованого алгоритму, згідно блок схеми прийняття рішень, зроблена за допомогою програмного скрипту аналізу станів WAN-каналів на базі правил статичної маршрутизації для маршрутизаторів серії *Routerboard* від виробника *MikroTik*.

У запропонованому алгоритмі авторами задіяні наступні методики, реалізація яких використана у повному скрипті.

1. Метод штрафів (*Penalty Method*) [25]. У цьому методі до цільової функції додаються штрафні коефіцієнти порушення обмежень. У разі, якщо втрати пакетів або затримка перевищують допустимі пороги, до ваги маршруту додаються штрафні коефіцієнти.

2. Адаптивні алгоритми (*Adaptive Algorithms*). Ці алгоритми змінюють параметри системи залежно від умов. Пропонований алгоритм адаптує вагові коефіцієнти маршрутів залежно від втрат пакетів та затримки.

3. Лінійне програмування (*Linear Programming*). Лінійне програмування часто використовується для оптимізації маршрутизації у мережах. Пронований алгоритм, хоча не є строго лінійним програмуванням, використовує лінійні зміни ваги залежно від умов.

4. Евристичні методи (*Heuristic Methods*). Евристичні методи часто застосовуються, коли точне рішення складно чи неможливо знайти. Пропонований підхід використовує де-які елементи евристики, оскільки він використовує прості правила для коригування ваги маршрутів.

5. Методи управління якістю обслуговування (*Quality of Service, QoS*). У мережних технологіях *QoS*-методи використовуються для керування пріоритетами трафіку. Пропонований алгоритм нагадує підходи *QoS*, де маршрути з кращими характеристиками набувають більшого пріоритету.

Узагальнені висновки та порівняння, отримані за результатами практичних дослідів з передачі даних, зведені у таблицю 3.

Таблиця 3. Порівняння досягнутих результатів встановлених в ході експериментальних досліджень

№ п/п	Параметр, фактор чи характеристика	Було	Отримано
1	Адміністрування <i>VPN</i> -сервера	Відсутнє (у випадку з сервісом <i>Natachi</i> – можливі тільки стандартні налаштування в межах тарифного пакету)	Є
2	Затримка у передачі відео	20-120 с	1-6 с
3	Середній трафік з <i>IP</i> -камер БПА (потік йде одночасно і на оператора)	8-10 Мбіт/с	3 Мбіт/с
4	Кількість можливих задіяних варіантів <i>VPN</i> -тунелів	1	3
5	Середня затримка у каналі <i>Starlink VPN</i> -сервер – <i>Starlink</i>	200 мс	120 мс
6	Середній час переходу з каналу на канал, з урахуванням переустановлення <i>VPN</i> -тунелю	60 с	20 с
7	Час повернення на пріоритетний канал зв'язку	20 с	1-2 с

Таким чином, можна зробити загальні висновки з проведених удосконалень програмного забезпечення, експериментальних та розрахункових досліджень систем зв'язку з БПА.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Показано, що необхідність безперебійного зв'язку з морськими безпілотними транспортними засобами є вкрай важливим і ключовим. Доведено, що можливо отримання на відносно нестабільних каналах зв'язку передачу відеозображення із середньою затримкою на рівні 1,2-4 с при використанні і оптимізації налаштувань «стандартних» *IP*-відеокамер побутового та промислового (цивільного) призначення, які самі по собі мають затримку у формуванні та передачі відеозображення у 1-1.5 с. Але у випадках, коли всі канали зовнішніх інтерфейсів не працюють, чи не відповідають встановленим критеріям якості зовнішніх каналів, Інтернет-система та скрипти залишаються в очікуванні оновлення зв'язку та працюють на «найбільш» кращому зовнішньому, доступному, *WAN*-каналі. Якщо зв'язку тимчасово немає за всіма каналами, то система запам'ятовує останній "робочий" канал та очікує появлення любого діючого каналу зв'язку.

2. Для отримання мінімальної затримки відеозображення необхідно використовувати програмну модифікацію *IP*-камер, які мають внутрішню затримку формування та передачі відеозображення у 100-120 мс, що раніше вважалось реакцією людського зору. Загальна

затримка у 250-300 мс (120 мс по маршрутизації із шифруванням та 100-120 мс затримка ока) – цілком достатньо для комфортного управління БПА в реальному часі на великій відстані.

3. У випадку побудови маршрутизації за принципом статичної на існуючих загальних Інтернет-протоколах, отримано значення затримки передачі відео- та телеметричних даних із використанням/перебудуванням VPN-тунелювання у 20-25 с і відповідає значенням, які закладені у стандарти при створюванні протоколів маршрутизації. Повернення системи зв'язку БПА на основний пріоритетний WAN-канал у випадках, коли основний канал вже відповідає заданим критеріям по латентності та допустимим втратам пакетів, виконується за проміжок 1-2 секунди. У випадку побудови динамічної маршрутизації на базі комбінації нестандартних та стандартних протоколів та рішень досягнуто час зміни WAN-каналів із перебудуванням VPN-тунелів за 2-3 секунди.

4. При наявності декількох БПА (рою), яким треба забезпечити незалежне паралельне управління, простіше масштабувати використання налаштувань на базі статичної маршрутизації, якщо використовується один VPN-сервер. Якщо треба забезпечити середній час втрати зв'язку управління та відео із БПА при перемиканні нестабільних каналів Інтернет, не більше ніж у 3-5 с, то тоді необхідно використовувати допрацьовану у ході експерименту динамічну маршрутизацію та окремий VPN-сервер під кожний БПА.

5. Експерименти довели, що побудована система зв'язку (передача відеозображення, даних управління та телеметрії на великих відстанях) є ефективна, навіть у випадках, коли є втрати 4-х із 5-ти пакетів даних по проходженню їх через нестабільні канали до публічної мережі Інтернет. Запропонована система інтегрована у БПА, які використовуються для наукових досліджень, моніторингу екологічного стану та виконання рятувальних операцій. Вона також має потенціал для використання у комерційних задачах і задачах подвійного призначення, де потрібен стабільний зв'язок у складних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Chitre M., Shahabudeen S., Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. 2008, Marine Technology Society Journal, 42(1), 103–116. DOI: 10.4031/002533208786861263.
- [2] Farr N., et al. Optical modem technology for seafloor observatories. 2010, Marine Technology Society Journal, 44(3), 98-107. DOI: 10.4031/MTSJ.44.3.2. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4098961>
- [3] Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. 2000, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 25(1), 4-27. DOI: 10.1109/48.820733. <https://ieeexplore.ieee.org/document/820733>
- [4] Kongsberg Maritime. Underwater communication solutions. 2000, Kongsberg official website. <https://www.kongsberg.com/>
- [5] Yasin I., Iftexhar A., Daryoush H., Adnan W. A survey on energy efficiency in underwater wireless communications. Add to Mendeley, 2021, Share. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103295>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804521002885>
- [6] NR Support for UAVs, Jul 06, 2023. <https://www.3gpp.org/technologies/nr-uav>
- [7] Impact of packet loss and delay variation on the quality of real-time video streaming. DOI: [10.1007/s11235-015-0037-2](https://doi.org/10.1007/s11235-015-0037-2)
- [8] QoE prediction model for multimedia services in IP network applying queuing policy. DOI: [10.1109/SPECTS.2014.6879998](https://doi.org/10.1109/SPECTS.2014.6879998)
- [9] Quality of experience enhancement of high efficiency video coding video streaming in wireless packet networks using multiple description coding. DOI: [10.1117/1.JEI.27.1.013028](https://doi.org/10.1117/1.JEI.27.1.013028)

- [10] Taha M., Canovas A., Lloret J. A QoE adaptive management system for high definition video streaming over wireless networks. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 2, pp. 18-27, 1 Feb. 2021. DOI:[10.1007/s11235-020-00741-2](https://doi.org/10.1007/s11235-020-00741-2)
- [11] Kutins A., Brodnevs D. Determination of Delay Parameters in 4G LTE Cellular Mobile Networks. 2022, Conference: Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW). DOI:[10.1109/MTTW56973.2022.9942617](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942617)
- [12] Brodnevs D., Kutins A. Requirements of End-to-End Delays in Remote Control Channel for Remotely Piloted Aerial Systems. 2021, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 2, pp. 18-27, 1 Feb. 2021. DOI:[10.1109/MAES.2020.3039853](https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3039853)
- [13] Волков С., Скачков В., Павлович В., Чепкій В. Інформаційно-ентропійний показник якості стану параметричних систем в багатокритеріальних задачах оцінювання. Матер. конф. "Тенденції розвитку конвергентних мереж: рішення пост-NGN, 4G та 5G". Регіональний семінар МСЕ, Державний університет телекомунікацій, Київ, 17-18 листопада 2016 р. - С. 73-88. https://duikt.edu.ua/uploads/p_1589_60941295.pdf
- [14] Лемешко О., Еременко О., Невзорова О. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. DOI:[10.30837/978-966-659-282-1](https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1)
- [15] H264 Vs H265 – Which Should You Use? [Online]. Available: <https://accsoon.com/explore/h264-vs-h265-which-should-you-use/> [Accessed: Jan. 07, 2025].
- [16] 16. IP Camera Streaming – Full Guide For Beginners Published by Ahmet Oguz Mermerkaya on September 12, 2022. [Online]. Available: <https://antmedia.io/ip-camera-streaming-guide-how-to-setup-an-ip-camera/> [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [17] Марковский А. В., Власенко Г. Н. Забезпечення глобального доступу в Інтернет: реалії, перспективи, завади. Матер. конф. "Тенденції розвитку конвергентних мереж: рішення пост-NGN, 4G та 5G". Регіональний семінар МСЕ, Державний університет телекомунікацій, м. Київ, 17-18 листопада 2016 р. - С. 111-129.
- [18] Starlink Specifications. [Online]. Available: <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1400-28829-70>. [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [19] Miroslav Uhrina, Jaroslav Frnda, Lukas Sevcik, Martin Vaculik. Impact of H.264/AVC and H.265/HEVC compression standards on the video quality for 4K resolution. DOI:[10.15598/aeec.v12i4.1216](https://doi.org/10.15598/aeec.v12i4.1216)
- [20] Avonic official CM70 series latency testing and conclusions. Cameras - Support - Avonic. [Online]. Available: <https://support.avonic.com/support/solutions/articles/80001022187-introduction-to-latency>. [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [21] Климаш Ю. В., Шпур О. М., Кайдан М. В. Комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах. 2018, НУ "Львівська політехніка". <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jun/13512/12.pdf>
- [22] Бітрейт і його місце в відеоспостереженні. [Online]. Available: <http://worldvision.com.ua/articles/bitreyd-i-ego-mesto-v-videonablyudenii>. [Accessed: Jan. 07, 2025].
- [23] IP Camera Bandwidth Calculator: Formula, Example & Tips. <https://reolink.com/blog/ip-camera-bandwidth-calculation/>
- [24] Метод штрафів. Available: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_штрафів [Accessed: Jan. 07, 2025]

- [25] Tutorial. Antmedia. IP-camera. [Online]. Available: <https://antmedia.io/tutorial/> [Accessed: Jan. 07, 2025]

REFERENCES

- [1] Chitre M., Shahabudeen S., Stojanovic M. Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. 2008, Marine Technology Society Journal, 42(1), 103–116. DOI: 10.4031/002533208786861263.
- [2] Farr N., et al. Optical modem technology for seafloor observatories. 2010, Marine Technology Society Journal, 44(3), 98-107. DOI: 10.4031/MTSJ.44.3.2. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4098961>
- [3] Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. 2000, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 25(1), 4-27. DOI: 10.1109/48.820733. <https://ieeexplore.ieee.org/document/820733>
- [4] Kongsberg Maritime. Underwater communication solutions. 2000, Kongsberg official website. <https://www.kongsberg.com/>
- [5] Yasin I., Iftekhar A., Daryoush H., Adnan W. A survey on energy efficiency in underwater wireless communications. Add to Mendeley, 2021, Share. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103295>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804521002885>
- [6] NR Support for UAVs, Jul 06, 2023. <https://www.3gpp.org/technologies/nr-uav>
- [7] Impact of packet loss and delay variation on the quality of real-time video streaming. DOI: [10.1007/s11235-015-0037-2](https://doi.org/10.1007/s11235-015-0037-2)
- [8] QoE prediction model for multimedia services in IP network applying queuing policy. DOI: [10.1109/SPECTS.2014.6879998](https://doi.org/10.1109/SPECTS.2014.6879998)
- [9] Quality of experience enhancement of high efficiency video coding video streaming in wireless packet networks using multiple description coding. DOI: [10.1117/1.JEI.27.1.013028](https://doi.org/10.1117/1.JEI.27.1.013028)
- [10] Taha M., Canovas A., Lloret J. A QoE adaptive management system for high definition video streaming over wireless networks. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 36, no. 2, pp. 18-27, 1 Feb. 2021. DOI: [10.1007/s11235-020-00741-2](https://doi.org/10.1007/s11235-020-00741-2)
- [11] Kutins A., Brodnevs D. Determination of Delay Parameters in 4G LTE Cellular Mobile Networks. 2022, Conference: Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW). DOI: [10.1109/MTTW56973.2022.9942617](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942617)
- [12] Brodnevs D., Kutins A. Requirements of End-to-End Delays in Remote Control Channel for Remotely Piloted Aerial Systems. 2021, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 36, no. 2, pp. 18-27, 1 Feb. 2021. DOI: [10.1109/MAES.2020.3039853](https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3039853)
- [13] Volkov S., Skachkov V., Pavlovych V., Chepkiy V., "Information-Entropy Indicator of Quality of Parametric Systems in Multi-Criteria Evaluation Problems," Materials of the Conference "Trends in the Development of Convergent Networks: Post-NGN, 4G, and 5G Solutions," Regional ITU Seminar, State University of Telecommunications, Kyiv, November 17-18, 2016, pp. 73-88. [Online]. Available: https://duikt.edu.ua/uploads/p_1589_60941295.pdf [in Ukrainian].
- [14] Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O., "Stream Models and Routing Methods in Infocommunication Networks: Fault Tolerance, Security, Scalability," DOI: [10.30837/978-966-659-282-1](https://doi.org/10.30837/978-966-659-282-1) [in Ukrainian].
- [15] H264 Vs H265 – Which Should You Use? [Online]. Available: <https://accsoon.com/explore/h264-vs-h265-which-should-you-use/> [Accessed: Jan. 07, 2025].

- [16] IP Camera Streaming – Full Guide For Beginners Published by Ahmet Oguz Mermerkaya on September 12, 2022. [Online]. Available: <https://antmedia.io/ip-camera-streaming-guide-how-to-setup-an-ip-camera/> [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [17] Markovskyy A. V., Vlasenko H. N., "Ensuring Global Internet Access: Realities, Prospects, Obstacles," Materials of the Conference "Trends in the Development of Convergent Networks: Post-NGN, 4G, and 5G Solutions," Regional ITU Seminar, State University of Telecommunications, Kyiv, November 17-18, 2016, pp. 111-129 [in Ukrainian].
- [18] Starlink Specifications. [Online]. Available: <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1400-28829-70>. [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [19] Miroslav Uhrina, Jaroslav Frnda, Lukas Sevcik, Martin Vaculik. Impact of H.264/AVC and H.265/HEVC compression standards on the video quality for 4K resolution. DOI:10.15598/aeer.v12i4.1216
- [20] Avonic official CM70 series latency testing and conclusions. Cameras - Support - Avonic. [Online]. Available: <https://support.avonic.com/support/solutions/articles/80001022187-introduction-to-latency>. [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [21] Klymash Yu. V., Shpur O. M., Kaidan M. V., "Comprehensive Method for Optimizing Information Flow Routing in Self-Organized Networks," 2018, Lviv Polytechnic National University. [Online]. Available: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jun/13512/12.pdf>. [in Ukrainian].
- [22] Bitrate and its role in video surveillance. [Online]. Available: <http://worldvision.com.ua/articles/bitreyd-i-ego-mesto-v-videonablyudenii>. [Accessed: Jan. 07, 2025] [in Ukrainian].
- [23] IP Camera Bandwidth Calculator: Formula, Example & Tips. <https://reolink.com/blog/ip-camera-bandwidth-calculation/>
- [24] Penalty method. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Penalty_method [Accessed: Jan. 07, 2025]
- [25] Tutorial. Antmedia. IP-camera. [Online]. Available: <https://antmedia.io/tutorial/> [Accessed: Jan. 07, 2025]