

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Контроль динаміки навантаження, що створює на мережу джерело даних у реальному часі

(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІМІм-19-2
Самарський Р. В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172. Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Омельченко А.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

2021 р.

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

Не містить відомостей, заборонених
до відкритого публікування

Керівник _____ /*А.В.Омельченко*

Студент _____ / *Р.В. Самарський*

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172. Телекомунікації та радіотехніка

Тип програми Освітньо-наукова
(код і повна назва)

Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

« 15 березня » _____ 20 21 р.
(підпис)**ЗАВДАННЯ**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Самарському Руслану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Контроль динаміки навантаження, що створює на мережу джерело даних у реальному часі

затверджена наказом університету від 12 березня 2021 р. № 350 Ст2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25 травня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Розглянути особливості формування трафіку у сучасних мережах. Визначити проблематику, пов'язану з необхідністю забезпечення якості мережесвих відеосервісів. Обґрунтувати необхідність управління динамікою бітової швидкості відео на рівні джерела. Дослідити метод управління бітовою швидкістю відео потоку з забезпеченням оптимальної якості та підходи, спрямовані на підвищення його швидкодії. Виконати розрахунки кількості станів алгоритму для випадку застосування цих методів та без них

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) слайди презентації в форматі Power Point (назва та мета роботи, особливості формування трафіку сучасних мереж, недоліки існуючих методів управління бітовою швидкістю, метод управління бітовою швидкістю на базі прогресивного алгоритму JPEG)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	16.03.21-25.03.21	
2	Закономірності формування трафіку у сучасних мережах	26.03.21-04.04.21	
3	Особливості обігу у мережі пакетів даних трафіку різних типів	05.04.21-15.04.21	
4	Існуючі підходи до забезпечення якості відеосервісів	16.04.21-26.04.21	
5	Аналіз механізмів балансування бітової швидкості відносно змін пропускної здатності мережі	27.04.21-05.05.21	
6	Синтез методу забезпечення оптимальної якості відео сервісів на базі управління бітовою швидкістю у базисі прогресивного алгоритму JPEG	06.05.21-11.05.21	
7	Висновки	12.05.21-13.05.21	
7	Оформлення пояснювальної записки	14.05.21	

Дата видачі завдання 15 березня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Омельченко А.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 28 рис., 3 табл., 22 джерела, 2 додатка

СЕМАНТИЧНА ЗНИЧИМІСТЬ, КОЛІРНА СУБДИСКРЕТИЗАЦІЯ, ПРОГРЕСИВНИЙ JPEG, ТРАНСФОРМАЦІЯ ДКП, ДИНАМІЧНЕ ПРОГРАМУВАННЯ

Об'єкт дослідження – методи контролю бітової швидкості відеотрафіку за рахунок управління параметрами кодування фрагментів відеокадрів за критерієм оптимальності.

Мета роботи – оптимізація вибору параметрів кодування відео потоку на рівні джерела для зменшення завантаженості мережі з одночасним забезпеченням якості надання відеосервісів.

Проведено аналіз існуючих підходів щодо балансування параметрів відеопотоку щодо пропускної здатності мережі за критерієм бітова швидкість/рівень внесеної похибки. Досліджено особливості розглянутих підходів, на базі чого доведено продуктивність концепції, що ґрунтується на управлінні бітовою швидкістю відеоданих з використанням методу динамічного програмування.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 81 p., 28 fig., 3 tabl., 22 sources, 2 app.

SEMANTIC SIGNIFICANCE, COLOR SUBDISCRETIZATION,
PROGRESSIVE JPEG, DCT TRANSFORMER, DYNAMIC PROGRAMMING

The object of research - methods of controlling the bit rate of video traffic by controlling the coding parameters of fragments of video frames by the criterion of optimality.

The purpose of the work is to optimize the choice of video stream encoding parameters at the source level to reduce network congestion while ensuring the quality of video services. The analysis of the existing approaches to balancing the parameters of the video stream in relation to the bandwidth of the network by the criterion of bit rate / level of error is performed. The peculiarities of the considered approaches are investigated, on the basis of which the productivity of the concept based on bit rate control of video data using the method of dynamic programming is proved..

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТРАФІКУ У СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ.....	14
1.1 Характерні риси розвитку сучасних мереж.....	14
1.2 Дослідження неоднорідності трафіку	19
2 ОСОБЛИВОСТІ ОБІГУ У МЕРЕЖІ ПАКЕТІВ ДАНИХ ТРАФІКУ РІЗНИХ ТИПІВ.....	27
2.1 Обґрунтування необхідності забезпечення гарантованої полоси пропускання для відеоданих.....	27
2.2 Обчислення навантаження, що створюється одним джерелом відеоданих на мережу.....	30
2.3 Оцінка потенційних можливостей сучасних технологій доступу щодо можливості передавання відеоданих високих роздільних здатностей.....	32
3 ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВІДЕОСЕРВІСІВ....	35
3.1 Критерії оцінювання якості відеосервісів.....	35
3.1.1 Показники оцінювання якості реконструйованих відеоданих.....	36
3.2 Підходи до забезпечення якості відео сервісів	39
3.2.1 Підхід, що передбачає забезпечення достатнього рівня якості	40
3.2.2 Підхід, що передбачає забезпечення оптимального рівня якості.....	40
3.3 Обґрунтування необхідності змін параметрів компресії відео потоку для забезпечення як достатнього, так і оптимального рівня якості надання сервісів.....	40
3.3.1 Аналіз процесу обробки відеоданих на рівні джерела.....	40
3.3.2 Аналіз умов передавання відеоданих мережею.....	46
3.3.3 Висновки за результатами аналізу процесу обробки відеоданих на рівні джерела	50
4 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІДНОСНО ЗМІН ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖІ.....	52
4.1 Технологія AVR	52
4.2 Технологія SRC (Scalable Rate Control).....	54
4.3 Балансування біткової швидкості відеопотоку на базі прогресивного режиму стиснення JPEG	55

5 СИНТЕЗ МЕТОДУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ВІДЕО СЕРВІСІВ НА БАЗІ УПРАВЛІННЯ БІТОВОЮ ШВИДКІСТЮ У БАЗИСІ ПРОГРЕСИВНОГО АЛГОРИТМУ JPEG.....	59
5.1 Вимоги до методу управління бітовою швидкістю на базі прогресивного алгоритму JPEG	59
5.2 Об'ємний опис трансформанти	60
5.3 Побудова механізму управління бітовою швидкістю (рішення бімінімальної задачі)	61
5.4 Дослідження обчислювальної складності методу управління бітовою швидкістю на базі динамічного програмування	66
5.5 Оптимізація алгоритму управління бітовою швидкістю на базі динамічного програмування шляхом скорочення простору розрахунків	69
ВИСНОВКИ.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	80
ДОДАТОК Б СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- PSNR – (Pulse Signal to Noise Ratio) пікове відношення сигнал/шум;
- ДКП – дискретно-косинусне перетворення;
- MSE – (mean square error) – середньоквадратичне відхилення;
- HD – (high definition) – відео високої роздільної здатності;
- UHD - (high definition) – відео ультра-високої роздільної здатності;
- SD - (small definition) – відео низької роздільної здатності;
- RGB – (red, green, blue) – трьохколірна модель;
- YCrCb – (y, chromatic red, chromatic blue) – яскравісно-хроматична колірна модель;
- ABR – (adaptive bit-rate) – технологія адаптації бітової швидкості відео;
- SRC – (scalable bit rate) – масштабована бітова швидкість – рекомендація щодо контролю бітової швидкості у стандарті MPEG4;
- MPEG4 – стандарт відео кодування;
- AVC – (advanced video coding) – стандарт відео кодування (рекомендація H.264);
- HEVC – (high-efficiency video coding) – стандарт відео кодування (рекомендація H.265).

ВСТУП

Сучасний світ характеризується частковою зміною формату міжособистісних взаємодій у професійному, комерційному та приватному аспектах.

Певний відсоток таких взаємодій здійснюється в інформаційному просторі з використанням тих чи інших мережевих комунікативних технологій та платформ, таких, що забезпечують:

- голосовий зв'язок;
- відео взаємодію;
- обмін текстовими, недійними повідомленнями та файлами;
- надсилання фінансової платіжної та звітної документації;
- керування пристроями та системами у віддаленому режимі;
- одночасне використання усіх означених вище засобів, або їх певну комбінацію.

У загальному випадку, усі зазначені формати комунікацій в інформаційному просторі на сьогоднішній час сформувалися у результаті одного з наступних сценаріїв, а саме:

- шляхом розвитку існуючих інформаціо-комунікаційних сервісів та технологій;
- як результат зростання продуктивності технологічного базису кінцевих та мережевих пристроїв а також систем передавання, тобто, є новими розробками.

Разом з тим, незалежно від сценарію виникнення, розвиток прикладних аспектів мережевих сервісів на базі інформаціо-комунікаційних технологій здійснюється паралельно з:

- удосконаленням апаратного базису мережевих та кінцевих пристроїв;
- виникненням попиту відносно тих чи інших послуг на базі мережі у соціуму;
- ціновою політикою щодо вартості апаратних та програмних засобів а також користування сервісами.

Синхронність розвитку за кожним з трьох зазначених факторів є запорукою сталого постійного розвитку інформаційної інфраструктури та створює умови, у яких:

- мережеві послуги можуть бути доступними для кінцевих користувачів;
- якість надання сервісів буде відповідати заявленому рівневі.

У той же час, нерідко попит на ті чи інші послуги стає суттєво більшим, ніж можливості платформ, на базі яких вони утілюються. У підсумку це спричинює падіння якості надання даних послуг, та веде до необхідності збільшення потужностей мережевих апаратно-програмних платформ та технологій.

Відповідно, виникає попит на імплементацію нових технологічних рішень, що можуть усунути протиріччя між:

- попитом на ті чи інші послуги;
- обмеженістю ресурсів технологічних платформ;
- якістю надаваних послуг.

Сьогоднішній стан розвитку інформаційних та комунікаційних технологій якраз знаходиться на стадії такого протиріччя. Це зумовлюється як попитом на велику кількість мережевих сервісів, що веде до зростання:

- кількості користувачів та послуг, що відносяться до актуального типу;
- навантаження на мережу;

так і темпами росту пропускних здатностей мереж, та обчислювальної потужності апаратних пристроїв, що забезпечують функціонування мережі та її прикладних складових.

Найбільш гострим таке протиріччя є у сфері надання відео сервісів, що на сьогодні генерують понад 8/10 усього мережевого трафіку. Як наслідок цього, частішають випадки мережевих перевантажень що спричинює падіння рівня сервісів.

Для подолання означеного протиріччя підходи, спрямовані на рішення завдання збільшення якості відео сервісів на мережевому рівні є неефективними та обмеженими, так як:

- передбачається управління трафіком шляхом маршрутизації, резервування каналів та потужностей мережі, проте, сумарний рівень навантаження при цьому не змінюється;

- в умовах збільшення кількості високо пріоритетних сервісів механізми класифікації трафіку та обробки «розумних черг» не гарантують вчасного надсилання усіх пакетів найвищого пріоритету.

Таким чином, у зазначених умовах суттєво ефективнішим є підхід, що передбачає скорочення об'ємів відеотрафіку шляхом використання технологій стиснення. Проте, дані технології не дозволяють досягти балансу бітової швидкості відносно пропускної здатності мережі в умовах їх динамічних змін, що є однією з причин перевантажень.

Відтак, підходи, спрямовані на адаптацію бітової швидкості трафіку відео сервісів відносно параметрів мережі є значно ефективнішими порівняно з технологіями кодування. Це і зумовлює актуальність досліджень та розробок у сфері побудови та удосконалення методів управління бітовою швидкістю відео.

1 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТРАФІКУ У СУЧАСНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Характерні риси розвитку сучасних мереж

Характерними особливостями сьогоденної інформаційно-комунікаційної мережі є [1]:

- високий рівень насиченості інформаційних потоків, що транслюються у одиницю часу;
- значна ступінь неоднорідності та складності структури трафіку мережевих даних.

Перша з зазначених особливостей, у свою чергу, є наслідком ряду чинників, а саме (рис.1.1) [2]:

- велика кількість мережевих служб, додатків та сервісів, що використовують одне спільне розподілене середовище;
- широка аудиторія користувачів мережевих послуг;
- значний обсяг кінцевих пристроїв, що використовуються для доступу до мережевих послуг;
- постійна зростаюча бітова швидкість потоків даних.

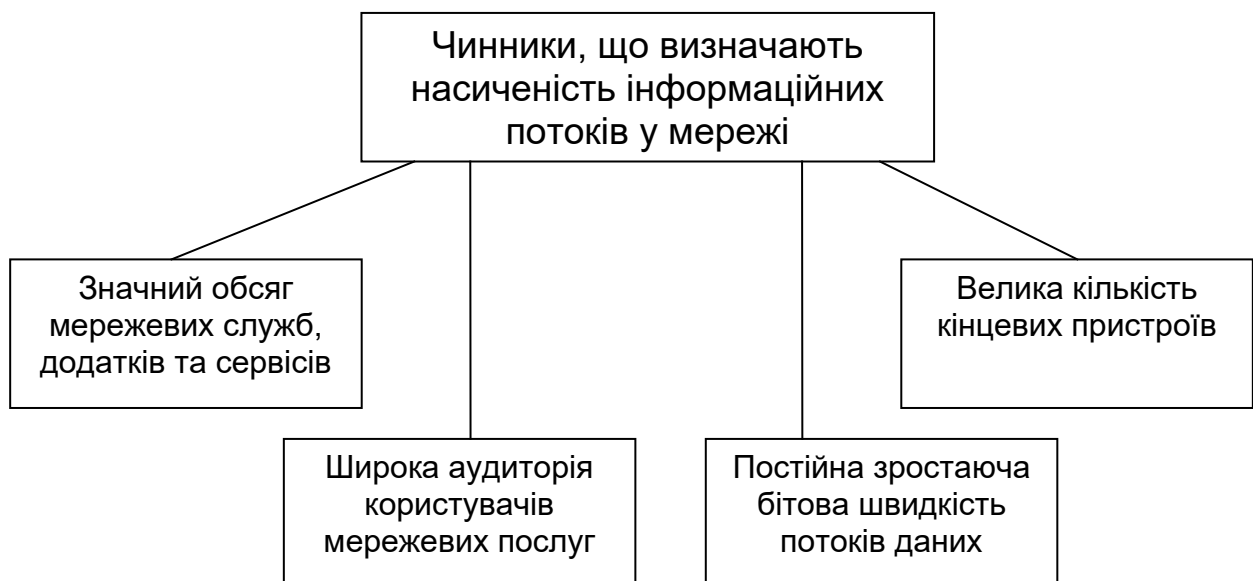


Рисунок 1.1 – Чинники, що визначають високий рівень насиченості інформаційних потоків, що транслюються мережею у одиницю часу

Так, за існуючими сьогодні даними дослідження Cisco, на 2022 рік прогнозується, що на одну особу у світі у середньому буде приходиться щонайменше 4 пристрої, кожен з яких має доступ до мережі [1].

Друга особливість, а саме – неоднорідність та складність трафіку – є наслідком впливу наступних факторів:

- взаємне інтегрування різнотипних сервісів, що різняться між собою бітовими швидкостями та характером даних, які генеруються сервісами;
- суттєва розбіжність бітових швидкостей сервісів на базі інфокомунікаційної мережі;
- застосування систем інтелектуальної обробки пакетів даних;
- одночасна присутність у єдиному потоці даних інформації відкритого класу, інформації, яку було піддано шифруванню та інформації, маскованої з використанням стеганографічних алгоритмів (рис.1.2).

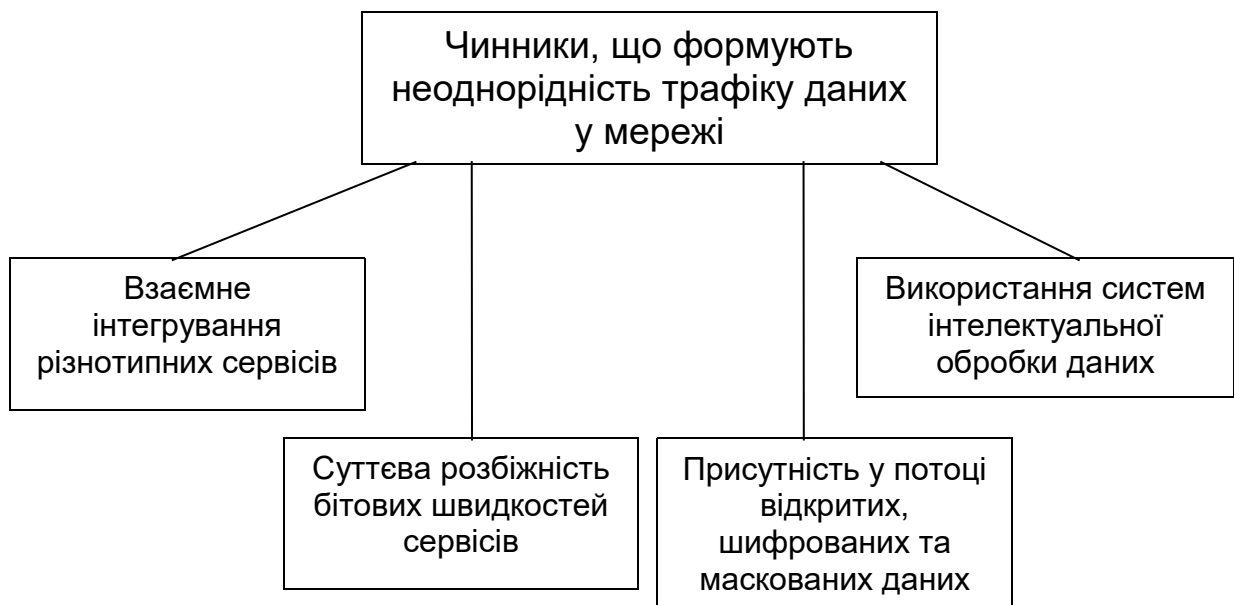


Рисунок 1.2 – Чинники, що визначають неоднорідність трафіку даних, що транслюються мережею у одиницю часу

У загальному випадку може бути виокремлено такі окремі типи трафіку, як:

- трафік аудіо даних;
- трафік службових даних та віддаленого управління;
- відео;
- дані (обмін файлами, веб-серфінг, звернення до БД, тощо).

За існуючими результатами досліджень [1], останнім часом у мережі постійно збільшується частка т.з. «важкого» трафіку, що характеризується високими значеннями бітових швидкостей.

При цьому, найбільшу частину серед трафіку, що відноситься до даного типу, складає відео.

Це зумовлено рядом причин, зокрема:

1) Зростанням просторової роздільної здатності кадрів.

Дана причина, у свою чергу, має місце у наслідок того, що [1-4]:

- збільшується відсоток сервісів та систем на базі інфокомунікаційних мереж, що використовують інтелектуальний аналіз даних, у т.ч. відео.

При цьому, якщо для візуальної оцінки відео сцени може бути достатньо роздільної здатності FullHD (2K) при ПВСШ на рівні 30-35 дБ, то ефективне функціонування систем інтелектуальної обробки потребує суттєво вищих роздільних здатностей для мінімізації ймовірності помилкового розпізнання об'єктів та класифікації даних [2, 3];

- жорсткішають вимоги кінцевих користувачів щодо якості надаваних відео сервісів як наслідок того, що ріст роздільної здатності пристроїв відтворення відео суттєво випереджає можливості мереж щодо трансляції відео, зокрема, хоча б 4K формату.

Так, якщо на 2017 рік формат SD складав близько 23% загального об'єму трафіку відео (рис.1.3), HD, відповідно, 75% а UHD близько 2%, то на 2022 рік (рис.1.4) частка SD становить близько 4,3%, HD – порядку 60,6% а UHD – 35,1%. Тобто, трафік UHD у відсотковому представленні збільшився більш, ніж у 17 разів [1];

2) Розширення діапазону мережевих послуг, які надаються на базі або хоча б з частковим використанням відео. Це стосуються, зокрема:

- відеоблогінгу;
- презентаційних відеоматеріалів;

- сфери зв'язку;
- сервісів VoD;
- відеоспостереження реального часу;
- відеохостингу;
- систем інтерактивного навчання та інформаційних продуктів.

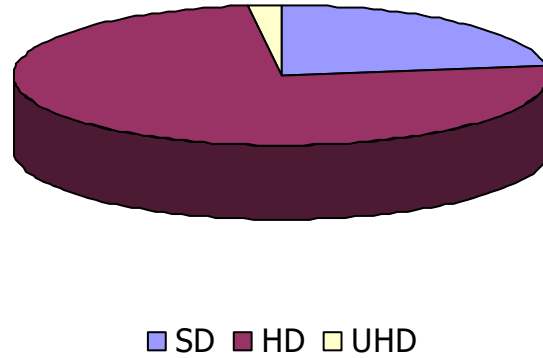


Рисунок 1.3 – Відсоткові частки трафіку відео різних роздільних здатностей на 2017 рік

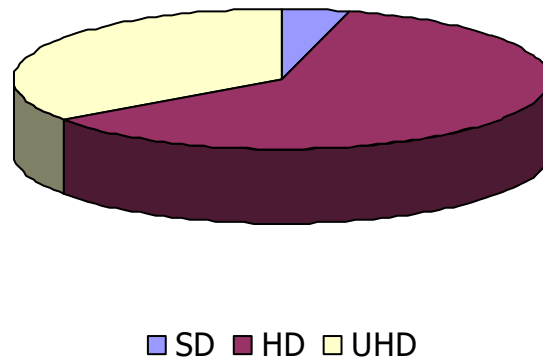


Рисунок 1.4 - Відсоткові частки трафіку відео різних роздільних здатностей на 2022 рік

У підсумку трафік відеоінформаційних сервісів зараз складає понад 80% з усього об'єму мережевих даних та сягає позначки близько 250 ексабайт на місяць (рис.1.5).

Аналіз даного рисунку свідчить про те, що протягом 5 років кількість мережевих відеоданих збільшилася майже у 4,5 разів.

У той же час, зростання середньої пропускної спроможності мережі суттєво запізнюється відносно темпів росту відеотрафіку, як свідчить рис. 1.6.

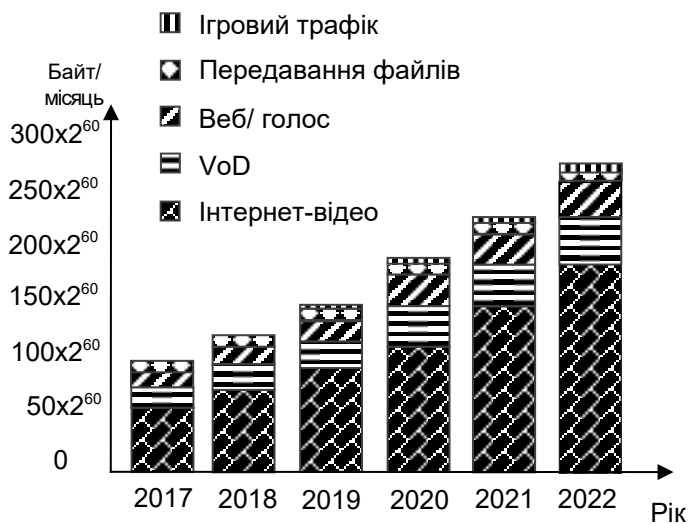


Рисунок 1.5 – Збільшення кількості даних різних типів у мережі з 2017 по 2022 рік (прогноз)

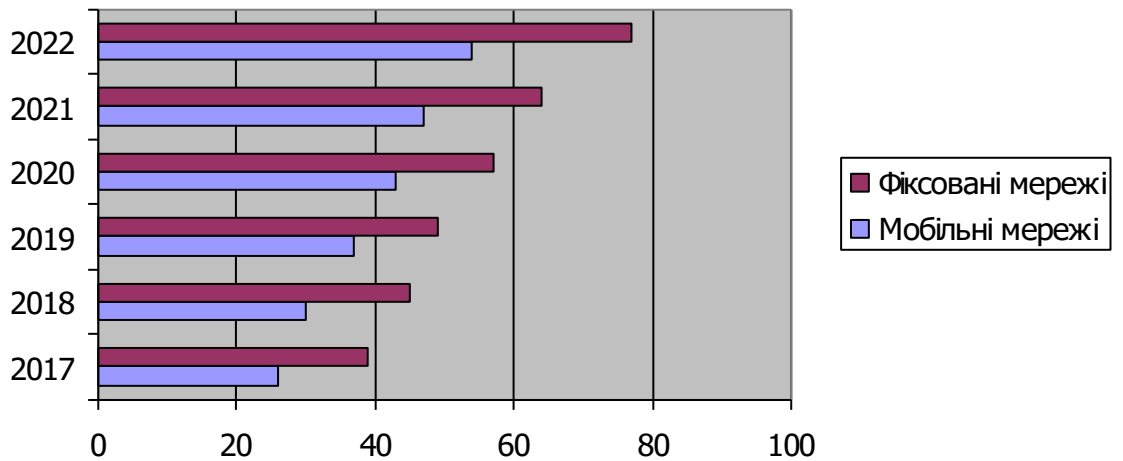


Рисунок 1.6 – Зростання середньої пропускної здатності мереж з 2017 по 2022 рік (прогноз)

Отже, як свідчить аналіз рис.1.5 та 1.6, пропускна здатність мереж за означений період зросла у середньому у 2 рази, тоді як об'єм відеоданих – у 4,5 разів а сумарна кількість даних усіх типів – у 5,5 разів [1].

Таким чином, створюються умови, коли надавання відео сервісів з рівнем якості, як зазначається вимогами QoS, перетворюється на складне завдання а у деяких випадках – взагалі стає практично неможливим.

У свою чергу, неоднорідність трафіку також суттєво впливає на рівень надання відео сервісів.

1.2 Дослідження неоднорідності трафіку

На рис. 1.7 наводиться приклад багатошарової структури неоднорідного єдиного інформаційного потоку. З рис. 1.7 видно, що у його складі присутні дані різних типів та інтенсивностей.

Розглянемо структуру трафіку сучасних мереж більш детально на рівні окремих типів трафіку, як то:

- дані;
- відео;
- аудіотрафік;
- технологічний трафік.

Так, загальна структура трафіку даних з урахуванням наявності відкритого та маскованого сегментів а також різних рівнів пріоритетності наведена рис. 1.8.

У свою чергу, структура трафіку інших типів наводиться рис. 1.9-1.11.

Багатошарова структура даних, зображена рис. 1.8-1.11 створює додаткове навантаження на мережеві та кінцеві пристрої, так як [2, 3-5]:

- інтелектуальна обробка даних потребує додаткових часових та обчислювальних ресурсів;
- виокремлення інформації, отриманої шляхом інтелектуальної обробки з наступною передачею разом з даними, на базі яких вона була отримана, потребує додаткових ресурсів пропускну здатності мережі;
- для коректної локалізації та подальшої обробки маскованих та шифрованих даних, що надсилаються у єдиному розподіленому середовищі з відкритими даними, необхідно задіяти додаткові обчислювальні ресурси;
- системи кіберзахисту на рівні як мережевих пристроїв, так і кінцевих, вносять додаткову затримку обробки трафіку та потребують окремих обчислювальних потужностей.

Як показує аналіз рис. 1.8-1.11, в умовах високої інтегрованості структури потоку даних у мережі обробка пакетів пристроєм комутації перетворюється на досить складне завдання [6].

При цьому, ефективність R функціонування мережі у загальному випадку може бути описана функціоналом:

$$R = \varphi(\alpha_t; \alpha_r; \alpha_{nod}; \alpha_{ts};), \quad (1.1)$$

- де α_t - топологічні особливості мережі;
 α_r - продуктивність алгоритмів маршрутизації;
 α_r - продуктивність мережевих пристроїв;
 α_{ts} - фактор інтегрованості структури потоку даних.

У свою чергу, величина показника α_r продуктивності мережевого пристрою може бути виражена через наступну функціональну залежність:

$$\alpha_r = \varphi(P_{cpu}; W_{in}; \Theta), \quad (1.2)$$

- де P_{cpu} - потужність процесорної системи пристрою;
 W_{in} - внутрішня пропускну здатність шини;

⊖ - конструктивні особливості реалізації на апаратному та програмному рівні, що враховують об'єм та швидкодію ОЗП, раціональність програмного забезпечення, тощо.

Разом з тим, значення α_{ts} фактору інтегрованості структури потоку даних залежить від:

- ширини динамічного діапазону пакетів, надходячих на обробку (середнього розміру $\overline{q_{\text{pack}}}$ пакетів, що оброблюються у одиницю часу);
- кількості n_q пакетів, що передаються в одиницю часу;
- середнього рівня пріоритетності \bar{p} пакетів, що потребують обробки.

Датчики	Технологічні дані систем		Геодані	Показники датчиків		
Відеоспостереження	Технологічні дані	Команди управління		Геодані		
	Аналітика [розпізнання об'єктів] [ідентифікація осіб] [пов'язані дані] [дані про переміщення об'єктів]					
Інтернет речей	Геодані	Показники датчиків	Технологічні дані	Відеодані	Команди управління	
Соціальні мережі	Розміщений матеріал [URL, тип, категорія, теги]		Дані автора публікації	Зв'язані профілі	Дані аналізу матеріалу [характер, семантика, спрямованість]	
Мобільні пристрої	Дані власника	Зв'язані контакти	Геодані	Повідомлення [голос] [текстові дані] [відеодані]		
Інформаційні системи	Тип даних [позиціонування] [пошуковий запит] [розміщення даних]		Розміщені дані [URL, категорія, теги]		Розміщений матеріал [URL, тип, категорія, теги]	Аналітика даних

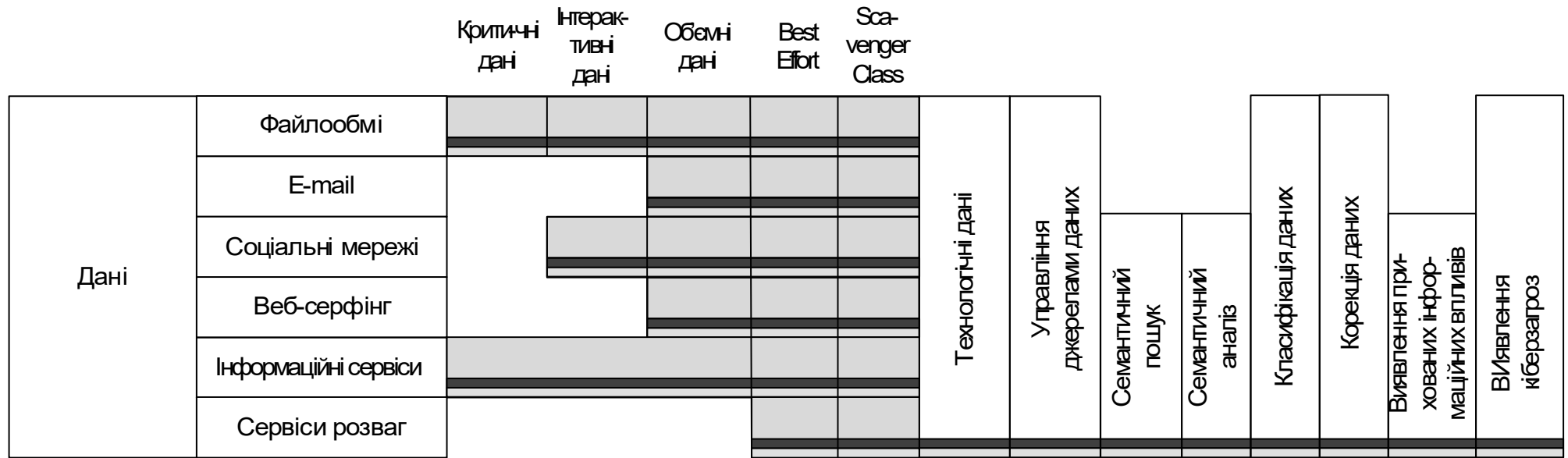


- масковані дані



- шифровані дані

Рисунок 1.7 – Приклад багат шарової структури трафіку





 маскований сегмент даних;
 шифрований сегмент даних

Рисунок 1.8 – Структура трафіку даних з урахуванням наявності відкритого та маскованого сегментів а також різних рівнів пріоритетності

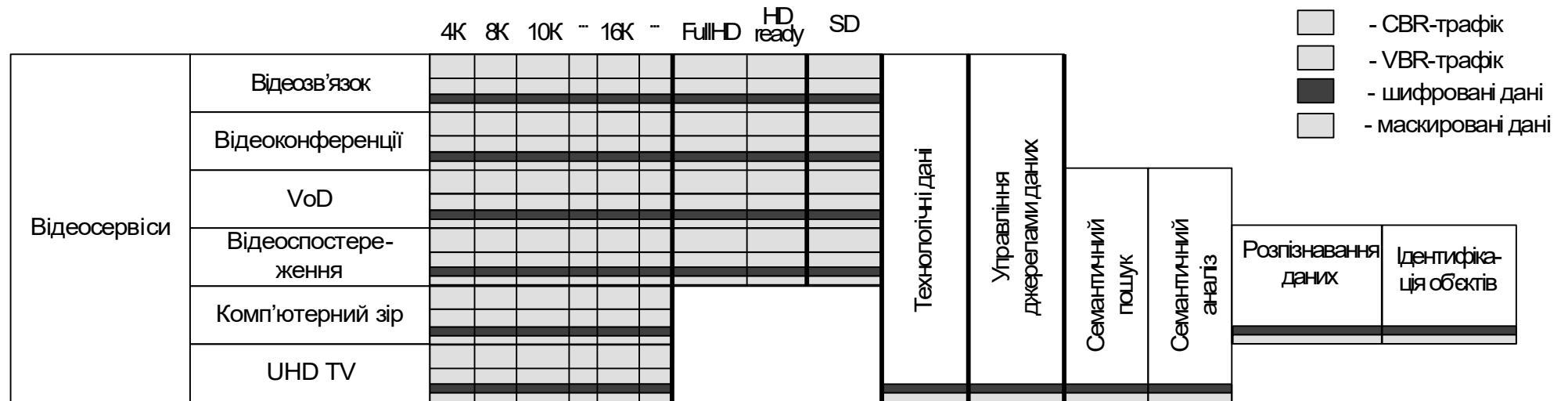






Рисунок 1.9 – Структура трафіку відеоданих з урахуванням наявності відкритого та маскованого сегментів, різної роздільної здатності кадрів а також VBR та CBR-складових

-  - CBR-трафік
-  - VBR-трафік
-  - шифровані дані
-  - маскоровані дані

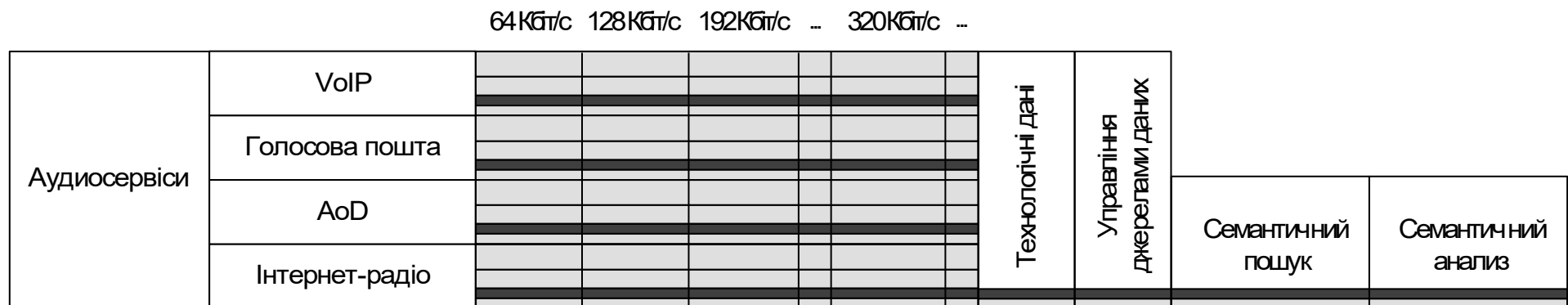


Рисунок 1.10 – Структура аудіотрафіку з урахуванням наявності відкритого та маскованого сегментів а також VBR та CBR-складових

		Критичні дані	Інтерактивні дані	Об'ємні дані	Best Effort	Scavenger Class						
Трафік технологічних систем	Термоконтроль						Технологічні дані	Управління джерелами даних	Класифікація даних	Корегування даних	Виявлення кіберзагроз	Синтаксичний аналіз
	Газовий контроль											
	Сейсмоконтроль											
	Радіологічний контроль											
	Енергоконтроль											
	Контроль позиціонування механізмів											

маскований сегмент даних;

шифрований сегмент даних

Рисунок 1.11 – Структура трафіку технологічних систем з урахуванням наявності відкритого та маскованого сегментів

Це еквівалентно виразу:

$$\alpha_{ts} = f(\overline{q_{\text{pack}}}; n_q; \overline{\rho}). \quad (1.3)$$

Отже, з позиції аналізу інтегрованості структури мережевого трафіку трафіку можна зазначити, що для підвищення ефективності Е функціонування мережі може бути підвищено продуктивність мережевих пристроїв.

Водночас, таке рішення є ірраціональним, яке потребує невиправданих витрат та здатне забезпечити лише часткове збільшення потужності вузлових комутаційних пристроїв, позаяк потужність наявного технологічного базису практично сягнула можливої межі.

У таких умовах для збільшення ефективності функціонування мережі теоретично доцільним є зменшення кількості n_q пакетів, що надходять на обробку [7]. Для того, щоб обґрунтувати чи навпаки – підтвердити даний висновок, далі виконаємо аналіз закономірностей надсилання трафіку різних типів.

2. ОСОБЛИВОСТІ ОБІГУ У МЕРЕЖІ ПАКЕТІВ ДАНИХ ТРАФІКУ РІЗНИХ ТИПІВ

2.1 Обґрунтування необхідності забезпечення гарантованої полоси пропускання для відеоданих

Найбільшою мірою вразливим до зниження якості надання сервісів є високопріоритетний трафік, куди відносяться [8]:

- дані критичного та інтерактивного типів;
- голосовий трафік VoIP;
- технологічний трафік чутливих систем;
- відео інтерактивного типу.

При цьому, ключовими показниками, що відображають якість надання відео сервісів, є:

1. Коефіцієнт втрат пакетів даних θ .
2. Показник затримки надходження пакетів t' .
3. Величина джитеру χ .

За замовчуванням вважається, що якщо виконуються умови, за якими бітова швидкість Q не перевищує пропускну здатності W мережі, тобто:

$$Q \leq W \quad (2.1)$$

тоді можна говорити про те, що вимоги до якості Y сервісів, як зазначено у табл.2.1, забезпечуються на рівні, не нижчому від встановлений Y_{set} , що еквівалентно виразу:

$$Y \geq Y_{set} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1 – Показники, що характеризують якість надання мережевих сервісів за вимогами QoS

Сервіс	Відео інтерактивного типу	Відео потокового типу	VoIP	Трафік даних (інтерактивний та критичний тип)	Технологічний трафік та трафік управління
Величина джитеру χ	Менше, ніж 30мсек	Не встановлено	Менше, ніж 150мсек	→ min	→ min
Показник затримки надходження пакетів t'	Менше, ніж 150мсек	4-5 сек	Менше, ніж 10мсек	→ min	→ min
Коефіцієнт втрат пакетів даних θ	Не більше 1%	Не більше 2%	Менш, ніж 0,25%	→ min	→ min

Разом з тим, в умовах, коли $Q > W$, дотримання основних показників, наведених табл.2.1, не забезпечується.

Звідси виходить, що у ході трансляції трафіку будь-якого типу необхідно забезпечити виконання умов (2.1). При цьому, кожен з зазначених пріоритетних типів трафіку створює різне навантаження на мережу, тобто, потребує різних значень величини Q бітової швидкості. У той же час, стосовно необхідного гарантованого рівня W пропускної здатності мережі вимоги кожного з типів трафіку суттєво різняться:

1. Технологічний трафік та трафік управління потребує одиниць або десятків Кб/сек, що у загальному випадку не може вважатися критичним.

2. Передавання голосу VoIP гарантовано потребує вільної полоси пропускання, що є не меншою, ніж величина бітової швидкості джерела. Зазвичай це не більше 128-256 Кбіт/с.

3. Для даних критичного та інтерактивного типів резервується полоса пропускання, рівна вільному на поточний час значенню $W(t)_{\text{free}}$ пропускної здатності мережі, що наближено може біти визначена як:

$$W_{\text{free}}(t) = W - Q(t)_{\text{busy}} = W - \sum_{i=1}^N Q(t)_{\text{busy}}^{(i)}, \quad (2.3)$$

де $Q(t)_{\text{busy}}$ - сумарне навантаження, що діє на мережу у момент часу t , та складається з множини навантажень N окремих джерел $Q(t)_{\text{busy}}^{(i)}$.

Отже, з аналізу виразу (1.3) можемо сказати, що у загальному випадку для передавання трафіку критичних даних резервується максимально можлива полоса пропускання у вільному на момент часу t діапазоні $W_{\text{free}}(t) = \overline{0}; \overline{W}$.

Таким чином, попри те, що високопріоритетний трафік даних може займати полосу пропускання, рівну номінальному W значенню пропускної здатності, яка забезпечується базовою технологією, відсутні вимоги відносно гарантованого значення бітової швидкості, яка має бути забезпечена.

4. Для відеоданих як інтерактивного так і потокового типів має чітко забезпечуватися виконання умов (2.1), оскільки для відео втрата (або запізнення) певного відсотку пакетів даних веде до неможливості повної або часткової реконструкції даних на боці приймача, як показано рис. 2.1.

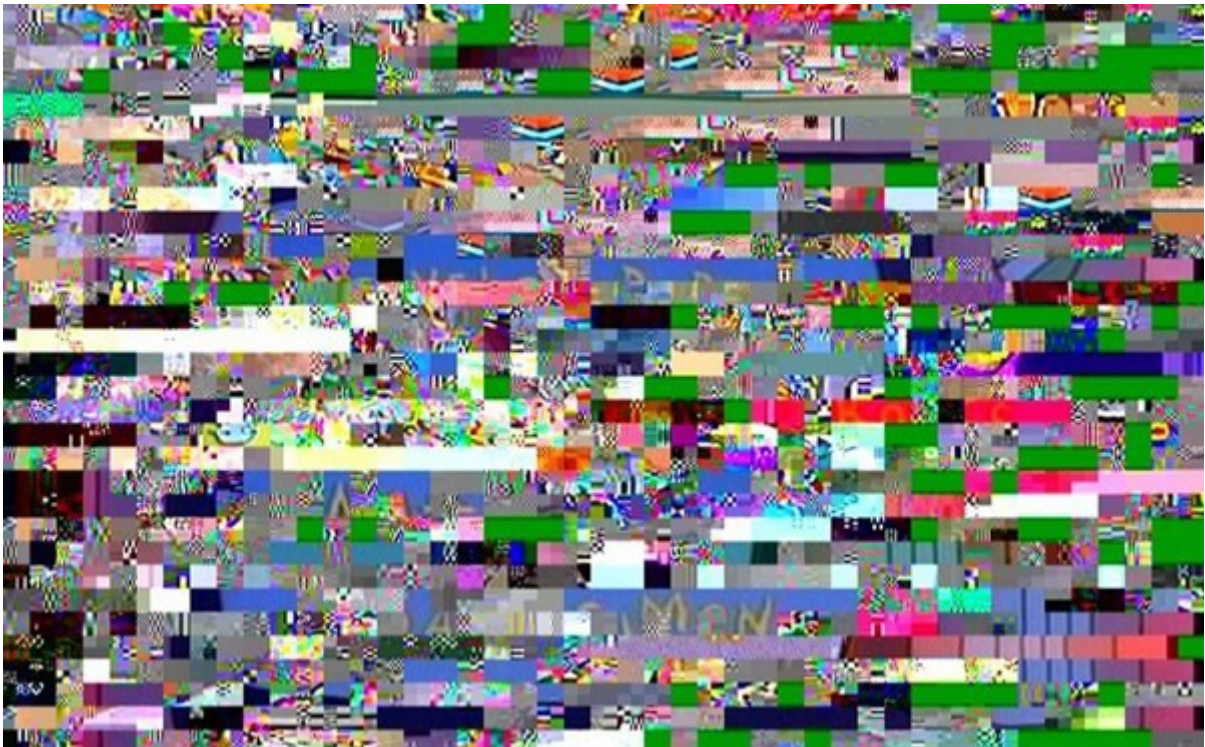


Рисунок 2.1 - Приклад руйнування відеокадру у наслідок часткової втрати пакетів у ході трансляції

Таким чином, відео потребує гарантованої полоси пропускання для забезпечення якості надання сервісів на рівні не нижчому, ніж попередньо встановлений.

Виконаємо оцінку навантаження на мережу, яку здійснює трафік відеоінформаційних джерел, виражену у вигляді бітової швидкості відеопотоку.

2.2 Обчислення навантаження, що створюється одним джерелом відеоданих на мережу

Для початку розглянемо випадок, коли потік відеоданих генерує єдине джерело. Тоді його бітова швидкість Q может бути оцінена на базі відомостей про значення роздільної здатності υ відеокадру, частоти надходження ψ кадрів у одиницю часу та параметрів β кодеку, як [9]:

$$Q = \upsilon \times \beta \times \psi . \quad (2.4)$$

де β - коефіцієнт, що описує ступінь зменшення бітової швидкості відео, кодованого з використанням тих чи інших алгоритмів стиснення.

Для фрактальних алгоритмів ущільнення даних параметр може приймати значення у діапазоні $\beta = \overline{5 - 10; 0,002}$.

Звідси видно, що попри високий потенційний показник скорочення бітової швидкості (у 2000 разів), його величина є нестабільною та у ряді випадків застосування веде навіть до збільшення початкового значення бітової швидкості Q на випадок передавання даних, та зростання розміру відео файлу при зберіганні.

Водночас, для кодеків сімейства MPEG, таких, як H.264/AVC H.265/HEVC показник β може знаходитися у діапазоні $\beta = \overline{0,03; 0,09}$, де $\beta = 0,03$ фігурує у випадках, коли виконується стиснення фрагментів відео з високим рівнем змін сцен, а $\beta = 0,09$ - у випадках кодування відео фрагментів, що містять значний відсоток статичних даних (які не змінюються протягом деякого часового проміжку).

У свою чергу, параметр υ розраховується у мегапікселях за наступним виразом:

$$\upsilon = H \times W \times 10^{-6}, \quad (2.5)$$

де H та W - значення висоти та, відповідно, ширина відеокадру у пікселях.

Таким чином, величина роздільної здатності, як і частота слідування кадрів у потоці, є ключовим параметром, що впливає на бітову швидкість відео.

Користуючись виразами (2.4) та (2.5) можемо розрахувати значення бітових швидкостей Q потоку, що генерується одним відеоінформаційним джерелом. Розраховані значення бітових швидкостей відео для випадків різної роздільної здатності показані діаграмою на рис. 2.2

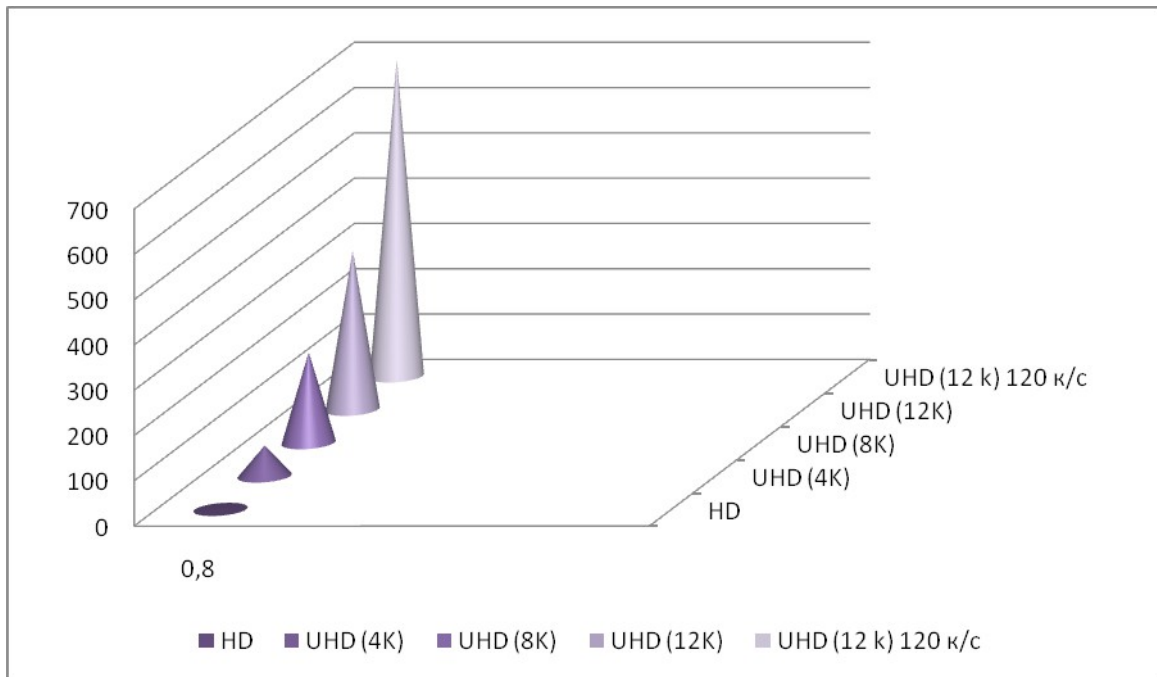


Рисунок 2.2 - Номінали бітових швидкостей відео різних роздільних здатностей та частоти слідування кадрів

Отже, бітова швидкість даних, що генеруються одним відеоінформаційним джерелом, можуть сягати десятків та навіть сотень Мбіт/с.

2.3 Оцінка потенційних можливостей сучасних технологій доступу щодо можливості передавання відеоданих високих роздільних здатностей

Сьогодні найбільш поширеними технологіями доступу у сегменті безпроводних мереж є:

- HSPA/ HSPA+ (3,5G);
- UMTS (3G);
- WiMax2;
- LTE та LTE-A та (4 та 4,5G);
- WiFi.

У свою чергу, серед технологій фіксованого доступу широко застосовуються сьогодні:

- ADSL;
- Fast Ethernet;
- Gigabit Ethernet.

Потенційно можливі значення пропускної здатності, що можуть забезпечуватися даними технологіями, показано рис. 2.3.

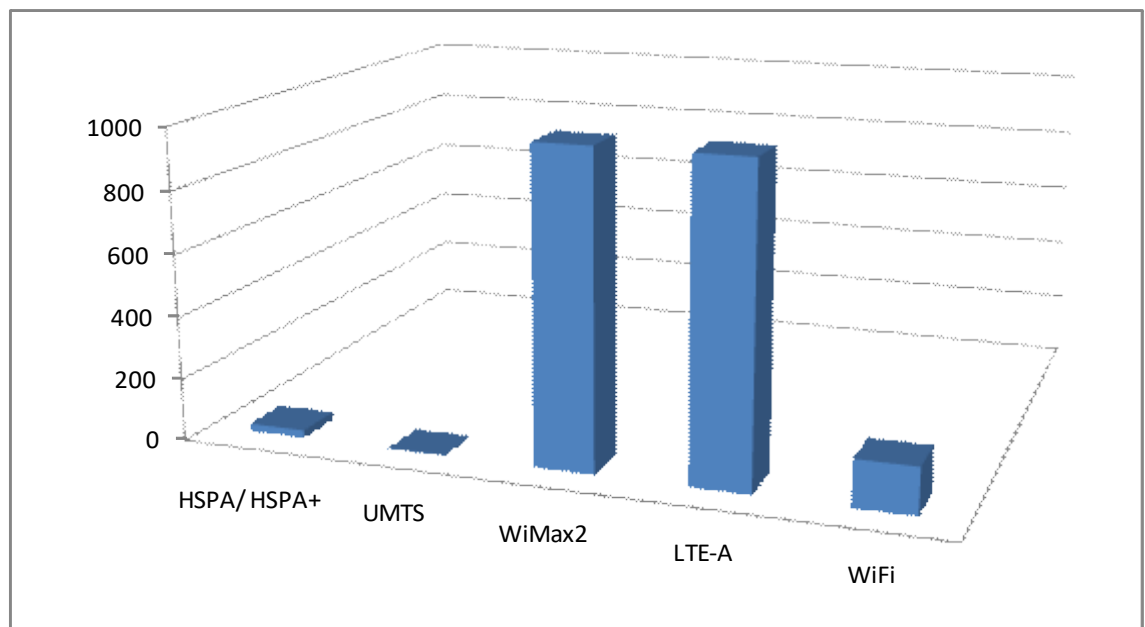


Рисунок 2.3 - Номінали пропускної спроможності поширених технологій доступу

Аналіз рис. 2.2 та рис. 2.3 свідчить, що існуючі можливості технологій передавання даних вже зараз не є достатніми для передавання відеопотоків з забезпеченням належної якості сервісів.

Разом з тим, як видно з рис. 1.8-1.11, відео потік може містити, окрім, власне, відеоряду, службові дані, дані, отримані шляхом застосування алгоритмів інтелектуальної обробки, а також у ряді випадків – аудіоряд. Тобто, загальна бітова швидкість Q_{sum} відеоінформаційного джерела може бути описана на базі виразу [10]:

$$Q_{\text{sum}} = Q_{\text{vid}} + Q_a + Q_{\text{service}} + Q_{\text{ia}}, \quad (2.6)$$

де Q_{vid} - бітова швидкість відеоряду, що визначається за виразом (2.4);
 Q_a - бітова швидкість аудіосупроводу;
 Q_{service} - бітова швидкість службових даних та трафіку управління;
 Q_{ia} - бітова швидкість даних, отриманих у результаті інтелектуального аналізу відеоряду.

Таким чином, оскільки відео складає понад 80% сумарного трафіку, та суттєвий його сегмент є критичним відносно вимог до якості, можна зазначити наступне:

- зменшення обсягу відеоданих, що надходять у мережу, суттєво впливає на загальне навантаження мережі та створює умови для підвищення якості надання сервісів будь-яких типів;
- зменшення кількості даних відео, які транслюються мережею, можливе на рівні представлення, тобто, на рівні кодування кожного окремого джерела;
- оскільки існує прямий зв'язок між якістю відновлених відеоданих та їхньою бітовою швидкістю, тобто:

$$Q_{\text{vid}} \uparrow \rightarrow Y_{\text{vid}} \uparrow, \quad (2.7)$$

необхідно забезпечити компроміс між величинами Q_{vid} та Y_{vid} .

Зроблені висновки відносно необхідності скорочення кількості пакетів, надходячих у мережу, що належать відеосервісам, повністю підтверджують попередні висновки, за результатом аналізу виразів (1.1) – (1.3).

3 ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВІДЕОСЕРВІСІВ

3.1 Критерії оцінювання якості відеосервісів

На боці приймача відеодані, що надходять з мережі, можуть застосовуватися різним чином:

- підлягати безпосередньому перегляду у реальному часі;
- зберігатися для подальшого перегляду;
- оброблятися з використанням інтелектуального аналізу;
- підлягати процедурі демаскування (або стегааналізу) з виявленням прихованих повідомлень, у т.ч. адресованих приймачеві безпосередньо.

У будь-якому з цих випадків важливою є якість Y_{vid} реконструйованих на боці приймача відеоданих, оскільки від цього залежить як їхня візуальна якість, так і ефективність функціонування систем обробки. При цьому, показники якості відеосервісів, а саме - коефіцієнт втрат пакетів даних θ , затримка надходження пакетів t' та джитеру χ впливають на величину Y_{vid} , функціонально може бути зазначено наступним чином [11]:

$$Y_{vid} = f(t'; \theta; \chi; W; Q) \quad (3.1)$$

При цьому, вплив на параметри θ , t' та χ може здійснюватися за рахунок впливу на величину Q_{vid} бітової швидкості відеоряду у відповідності до виразу (2.7).

У свою чергу, значення якості Y_{vid} відновлених відеоданих оцінюється за одним з поширених показників, фізична сутність кожного з яких полягає у відображенні ступеня відмінності між початковими (отриманими з виходу кодера) та реконструйованими даними у точці прийому.

Розглянемо детально найбільш поширені показники якості.

3.1.1 Показники оцінювання якості реконструйованих відеоданих

На сьогоднішній час уніфікованого показника якості, що міг би однаково ефективно застосовуватися у рамках будь-яких сервісів та у будь-яких умовах, не існує.

Це пояснюється тим, що:

- обчислювальне навантаження, що створюється процедурою оцінки якості, та, відповідно, час обчислення, суттєво різняться для різних показників;
- ряд показників можуть не відповідати візуальній якості реконструйованих відеоданих (наприклад, PSNR або MSE) – тобто, показник може свідчити про недостатній рівень якості, тоді, як фактична візуальна якість може бути високою і навпаки;
- деякі показники є ефективними та повністю відповідають рівню візуальній якості лише у певних умовах та залежать від особливостей змісту відеокадрів.

У той же час, доволі часто використовуються показники середньоквадратичного відхилення (СКВ), або middle square error (MSE), та пікового відношення сигнал/шум (ПВСШ), або pulse noise/signal rate (PSNR) [12, 13]. Ці показники набули широкого вжитку у наслідок простоти реалізації алгоритму на низького обчислювального навантаження на реалізуючи систему. Так, СКВ обчислюється як:

$$M = \frac{1}{HW} \sqrt{\sum_{x=1, y=1}^{H, W} (\eta(x, y) \times \eta'(x, y))^2}, \quad (3.2)$$

де $\eta(x, y)$ та $\eta'(x, y)$ - відповідно, вихідний та реконструйований пікселі відеокадру.

Відповідність показника СКВ суттєво залежить від змістових особливостей кадру. Тобто, за цим критерієм кадр може мати суттєві значення СКВ (вважатися зруйнованим) у випадку, коли при декодуванні має місце незначна зміна рівня яскравості порядку 3-6 5%.

У той же час, візуальні зміни такого кадру будуть непомітні (наприклад, опції яскравості моніторів дозволяють виконувати варіювання цієї величини у набагато більшому діапазоні).

Разом з тим, на випадок кадрів, що містять у результаті декодування різкі перепади кольорів окремих пікселів, або ділянки втрачених даних, будуть вважатися "незначно зміненими".

На базі показника СКВ обчислюється величина ПКСШ, як показує наступний вираз:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{255^2 HW}{\sum_{x,y} (\eta(x,y) - \eta'(x,y))^2} \quad (3.3)$$

За фізичною сутністю, перевагами та недоліками даний показник майже повністю є схожим з СКВ.

Ключовою відмінністю є логарифмічне відображення результатів, що у випадку широкого діапазону значень є більш зручним, ніж у випадку лінійної шкали.

На відміну від СКВ та ПКСШ, показник найбільшого відхилення від оригіналу є зручно простішим у розрахунках, а саме:

$$\Delta E = |\eta(x,y) - \eta'(x,y)| \quad (3.4)$$

Цей показник може застосовуватися лише у певних умовах, зокрема, при виявленні ділянок відмінностей при порівнянні зображень. Це пояснюється надто високою чутливістю методу до зміни окремих пікселів зображення. Тобто, при несуттєвому відхиленні від оригіналу згідно даного показника зображення буде класифіковане як таке, що майже повністю зруйноване.

До ряду показників оцінювання якості реконструйованих відеокадрів, що майже завжди відповідають візуальним оцінкам якості, належать [4, 9]:

- показник крос-кореляції;
- показник вірності зображення IFR (image fidelity rank);
- показник структурної подібності SSIM (structural similarity).

Тут значення показника крос-кореляції визначається як:

$$\Omega_{cc} = \frac{\sum_{x=1,y=1}^{H,W} (\eta(x,y) \times \eta'(x,y))}{\sum_{x=1,y=1}^{H,W} (\eta(x,y))^2}. \quad (3.5)$$

У свою чергу, значення показника відрості зображення обчислюється на базі виразу:

$$\Omega_{if} = \frac{\sum_{x=1,y=1}^{H,W} (\eta(x,y) - \eta'(x,y))}{\sum_{x=1,y=1}^{H,W} (\eta(x,y))^2}. \quad (3.6)$$

Якщо у більшості сучасних системах передавання відеотрафіку (відеозв'язок, відео конференції, відео на затип та ін.) на сьогодні відповідність рівня візуальної якості до об'єктивних оцінок поки що не є критичною (що дозволяє використовувати показники СКВ та ПВСШ), то для застосування систем інтелектуального аналізу і обробки дані показники якості не є прийнятними.

Окрім цього, для ряду спеціалізованих застосунків необхідно забезпечити відповідність оцінок за візуальним показником і об'єктивних оцінок. Це справедливо для:

- систем віддаленого (дистанційного) зондування;
- систем біометрії високої та надвисокої чіткості;
- так званої “телемедицина” або “відеомедицина”.

У таких системах застосовуються показники вірності зображення, структурної подібності або крос-кореляції.

Хоча сучасний технологічний базис у програмній та апаратній площинах реалізації обчислювальної інфраструктури більшою мірою орієнтований на використання показників ПВСШ та СКВ, поширеність застосування альтернативних показників оцінки тут пояснюється рядом причин, а саме:

- означені спеціалізовані системи було розроблено та введено у дію значно пізніше існуючих традиційних систем, що продовжують застосовувати показники PSNR та MSE;

- оскільки суттєва частка спецсистем функціонують локально, відповідно, їх обчислювальні потужності характеризуються значним ресурсом, який може бути спрямовано на обробку даних з використанням більш складних алгоритмів.

3.2 Підходи до забезпечення якості відео сервісів

На сьогодні, з огляду на умови (2.1) та (2.2), існують такі підходи до забезпечення якості відео сервісів, як:

- підхід, що передбачає забезпечення достатнього рівня якості;
- підхід, що орієнтується на надання максимально можливого рівня якості в існуючих умовах функціонування відеосервісу.

Розглянемо кожен з підходів окремо.

3.2.1 Підхід, що передбачає забезпечення достатнього рівня якості

У рамках даного підходу необхідно, щоб рівень якості Y_{vid} був не нижчим, ніж попередньо встановлений за згодою між провайдером сервісу та користувачем сервісу, тобто, таким, як показує вираз (2.2) [14].

При цьому, на базі співвідношень (2.1), (2.2) та (2.7) може бути сформовано загальні вимоги до забезпечення достатнього рівня якості, що еквівалентно виразу:

$$Y_{vid} \geq Y_{vid}^{(set)} \mid Q_{vid} \leq W(t) , \quad (3.7)$$

де $Y_{vid}^{(set)}$ - деякий встановлений рівень якості реконструйованих відеоданих за одним з показників, поданих виразами (3.2) – (3.6);

$W(t)$ - пропускна здатність мережі у момент часу t .

Тобто, передбачається, що бітова швидкість відеоряду буде не вищою, ніж поточна величина $W(t)$ пропускної здатності мережі.

3.2.2 Підхід, що передбачає забезпечення оптимального рівня якості

На відміну від розглянутого підходу, орієнтованого на підтримку достатнього рівня якості відеоданих, реконструйованих на боці приймача,

даний підхід передбачає, що у наявних умовах передавання (завантаженість мережі, вплив сторонніх завад, стан працездатності вузлових пристроїв тощо) якість відеоряду має бути забезпечено на максимально можливому рівні [14].

При цьому навантаження, що створюється на мережу відеоінформаційним джерелом, має бути щонайменшим можливим у поточних умовах.

Це може бути подано наступним співвідношенням:

$$Y_{\text{vid}} \rightarrow \max | Q_{\text{vid}} \rightarrow \min. \quad (3.8)$$

Тобто, у цьому випадку має місце необхідність вирішення мінімаксного завдання.

3.3 Обґрунтування необхідності змін параметрів компресії відео потоку для забезпечення як достатнього, так і оптимального рівня якості надання сервісів

Виконаємо загальну оцінку складності дотримання вимог до забезпечення достатнього рівня якості відеоданих.

Для цього попередньо виконаємо аналіз процесу обробки відеоданих на рівні джерела.

3.3.1 Аналіз процесу обробки відеоданих на рівні джерела

У переважній більшості випадків така обробка здійснюється на базі однієї з технологій кодування, що належать сімейству MPEG. Незважаючи на суттєві функціональні відмінності та можливості технологій з базису MPEG, зокрема, таких, як MPEG-2, MPEG-4 Part 10, H.264/AVC та H.265/HEVC, їхня загальна архітектурна реалізація не має значних розбіжностей. Це дозволяє виконати загальну оцінку алгоритму MPEG, без необхідності фокусування на конкретній технології [11, 15, 16].

Так, у рамках передбачено кодування як міжкадрових залежностей, так і компресію кожного кадру окремо. Для цього застосовується алгоритм JPEG, у який внесено незначні модифікації [7, 16, 17].

Базові етапи обробки відеокадрів у рамках алгоритму JPEG зображує схема на рис. 3.1

Перший етап компресії на базі JPEG передбачає операції починається з етапу препроцесингу, що містить у собі такі операції, як:

- зміна колірної моделі;
- сегментація кадру.

При цьому, колірний опис пікселів вихідного зображення зображення змінюється з його композитного формату на яскравісно-хроматичний (ICT - Irreversible Color Transform) [15, 17], або колірно-різницевий.

Сенс такого перетворення полягає у тому, що початковий кадр, що використовує палітру RGB, конвертується у простір опису YCrCb, де Y – компонента яскравості, відповідно, компоненти Cr і Cb - хроматична синя та хроматична червона (chromatic blue, chromatic red).

Оскільки людський зір значною мірою здатен реагувати на зміни градацій яскравості і суттєво менш значно – на зміни колірних відтінків – формат YCrCb дозволяє виконувати маніпуляції відносно компоненти Cr і Cb, у т.ч. пригнічуючи їх, залишаючи при цьому незмінними компоненти Y.

Означений етап компресії готує дані для зміни формату колірної субдискретизації на наступному етапові.

У ході цього етапу кільком компонентам Y ставляться у відповідність ряд хроматичних компонент.

Так, вихідний формат (4:4:4) колірної субдистретизації передбачає, що одній компоненті Y відповідає пара компонент Cr та Cb. Водночас, застосування інших форматів, зокрема, таких, як (4:2:2), або (4:1:1), (4:2:1) змінює кількість хроматичних компонент, у наслідок чого колірний опис пікселя зазнає назворотніх змін.

За рахунок цього на даному етапі обробки зменшується кількість біт для колірного опису кадру. У такий спосіб може буди скорочено до 75% даних про колірність кадру (у моделі 4:1:1).

Отже, зазначений етап кодування сприяє ефективному зменшенню початкового об'єму даних.

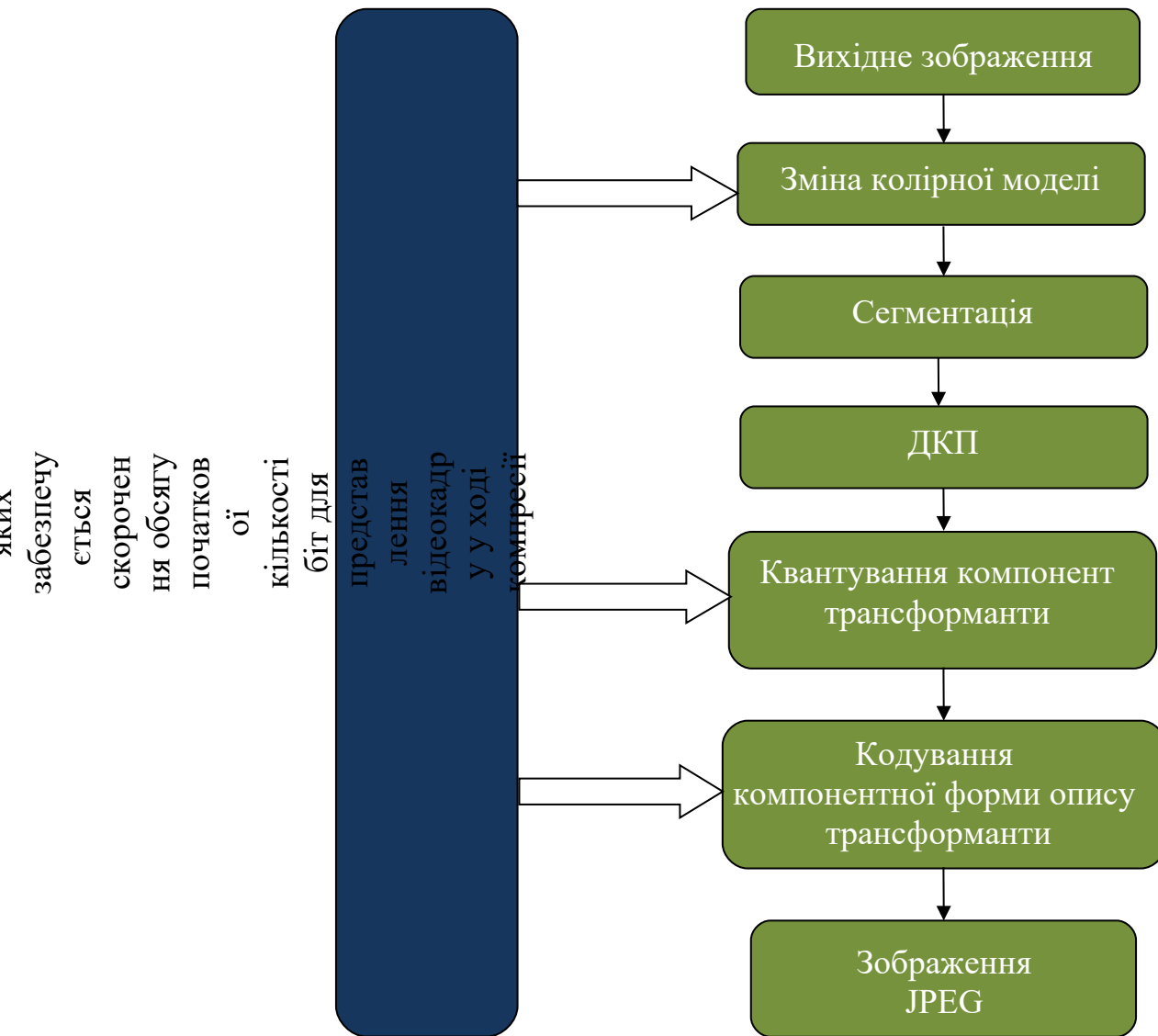


Рисунок 3.1 - Загальна схема обробки за алгоритмом JPEG з зазначенням етапів, на яких досягається зменшення початкового обсягу біт

Рис.3.2 містить схему зміни формату колірної субдискретизації для прикладу 4 пікселів.

Після того, як для кадру обрано необхідний формат колірної субдискретизації, здійснюється його сегментація на блоки 8x8.

Далі на базі кожного з них формуються три робочі матриці дискретного косинусного перетворення (ДКП), які містять для опису компонент у спектральному описі по 8 біт.

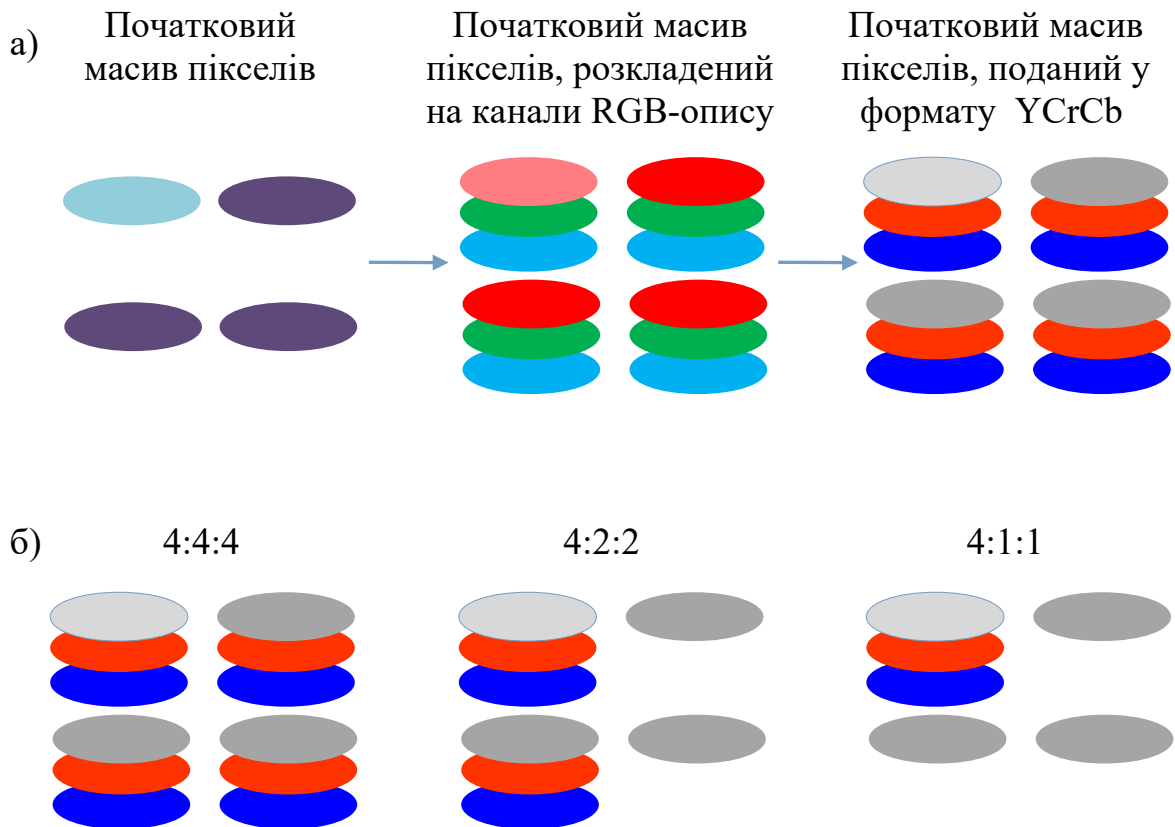


Рисунок 3.2 – Схема зміни колірної моделі (а) та різні формати колірної субдискретизації (б)

Дані матриці формуються шляхом відповідного ортогонального перетворення блоків $V_{i,j}^{(k)}$ кадру, за результатами чого формується множина трансформант $V'_{i,j}^{(k)}$ дискретно-косинусного перетворення [3], де i та j – координати блоку (трансформанти) у кадрі, k – індекс кадру у потоці. Далі кожен з блоків, відповідно, описується не просторовими одиницями $\eta(t)_{x,y}$ (пікселями), а частотними компонентами $\eta'(t)_{x,y}$, де t – індекс трансформанти у кадрі, x та y – координати компоненти у трансформанті.

Алгоритм JPEG, що виконує ДКП відносно сегментів 8×8 пікселів, використовує головна особливість ДКП-перетворення, за якою найбільш енергомісткі частотні компоненти локалізуються у зоні низьких частот.

Береться до уваги те, що значення високочастотних компонент, або компонент середньої частотності будуть суттєво нижчими порівняно з НЧ-компонентами.

Сам процес ДКП не скорочує об'єм даних для опису блоку $V_{i,j}^{(k)}$ кадру. Його завданням є перерозподіл та групування компонент $\eta'(\ell)_{x,y}$ по частотним групам, інакше кажучи – підготовка даних до наступного етапу обробки – квантування.

У свою чергу, процедура квантування передбачає поелементне ділення компонент $\eta'(\ell)_{x,y}$ трансформанти $V_{i,j}^{(k)}$ на відповідні коефіцієнти з матриці квантування (рис.3.3). Як видно з прикладу, наведеного рис.3.3, для НЧ-області (верхній лівий кут) застосовуються найменші величини коефіцієнтів квантування, відповідно, НЧ-компоненти пригнічуються найменше.

Разом з тим, зі збільшенням частоти компонент (по міру руху у напрямку правого нижнього кута) коефіцієнти квантування збільшуються, і для ВЧ-компонент вони є найбільшими.

Таким чином, у результаті квантування у зонах ВЧ та частково – середньо частотній зоні виникає велика кількість компонент, величини яких є незначними.

Для того, щоб більш ефективно скоротити обсяг даних у результаті квантування, виконується округлення компонент за наступним правилом:

$$\eta'(\ell)_{x,y} := 0 \mid \eta'(\ell)_{x,y} \leq \eta'(\ell)_{x,y}^{(th)}, \quad (3.9)$$

де $\eta'(\ell)_{x,y}^{(th)}$ - деяке встановлене порогове значення компоненти.

У результаті виконання процедури округлення у зонах ВЧ та СЧ-компонент утворюється велика кількість нульових елементів.

Етап квантування найбільше сприяє скороченню обсягу початкових даних для опису трансформанти $V_{i,j}^{(k)}$.

При цьому далі, на етапі лінеаризації компонент, з двовимірного масиву компонент формується вектор, де ланцюжки нульових елементів, отримані у наслідок округлення, подаються у більш компактній формі за

рахунок RLE-опису, при якому рядок однотипних елементів замінюється парою значень:

[символ] [кількість повторів].

Таке представлення даних сприяє більш продуктивному кодуванню даних без втрат на останньому етапі JPEG-компресії.

На даному етапі отриманий вектор десяткових значень компактно поданих компонент підлягає статистичному кодуванню (арифметичному, або кодуванню за Хафманом).

3	5	7	9	11	13	15	17
5	7	9	11	13	15	17	19
7	9	11	13	15	17	19	21
9	11	13	15	17	19	21	23
11	13	15	17	19	21	23	25
13	15	17	19	21	23	25	27
15	17	19	21	23	25	27	29
17	19	21	23	25	27	29	31

Рисунок 3.3 – Приклад матриці квантування з фактором якості 2.

Таким чином, у результаті розгляду базового алгоритму ущільнення даних, що використовуються для опису відеокадру на рівні блоків $B_{i,j}^{(k)}$ з використанням базису JPEG, можна зробити наступні висновки:

- алгоритм передбачає 3 технологічні етапи обробки, на кожному з яких здійснюється зменшення кількості даних – зміна формату колірної субдискретизації, квантування та кодування компонентної форми опису трансформант;
- у процесі компресії усі параметри кодеку встановлюються до початку процесу обробки даних;
- найбільшою мірою зменшенню кількості біт для опису трансформант сприяє квантування.

3.3.2 Аналіз умов передавання відеоданих мережею

Як попередньо було зазначено, трафік сучасних мереж характеризується суттєвим рівнем неоднорідності та високою динамікою. У підсумку доступний обсяг $W_{\text{free}}(t)$ полоси пропускання при тому, що базова технологія забезпечує пропускну здатність на рівні W , не гарантується, оскільки $W_{\text{free}}(t) = \text{var}$, що демонструє наступна функціональна залежність:

$$W_{\text{free}}(t) = \varphi(V_{\text{tr}}; \Delta W(t)_{\text{ns}}; W(t)_{\text{busy}}), \quad (3.10)$$

де V_{tr} - швидкість обробки трафіку на мережевих вузлах, для якої справедливо $V_{\text{tr}} = \text{var}$ у т.ч. як наслідок складності трафіку;

$\Delta W(t)_{\text{ns}}$ - значення, на яку зменшується пропускну здатність мережі у наслідок впливу сторонніх завад, $\Delta W(t)_{\text{ns}} = \text{var}$;

$W(t)_{\text{busy}}$ - навантаження на мережу, що постійно змінюється у часі.

Отже, величина $W_{\text{free}}(t)$ буде змінюватися у часі.

Дані розглянемо, яким чином формується величина $Q(t)_{\text{vid}}$ бітової швидкості відео [7, 16].

У загальному випадку існує 2 режими функціонування відео інформаційного джерела, у ході яких здійснюється:

- генерування відеоданих з постійною $Q(t)_{\text{vid}}$ бітовою швидкістю, або CBR (constant bit rate)-режим (рис.3.4);
- генерування відеоданих зі змінною $Q(t)_{\text{vid}}$ бітовою швидкістю, або VBR (variable bit rate)-режим (рис.3.5).

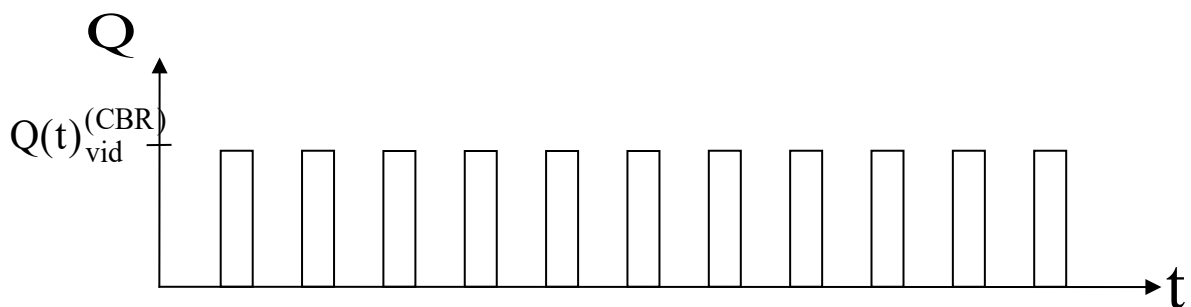


Рисунок 3.4 – Приклад CBR-відеотрафіку

Для CBR-відеотрафіку забезпечення бітової швидкості на одному рівні досягається шляхом:

- задання пікового значення бітової швидкості трафіку пакетів (peak cell rate, PCR) з наступним їх передаванням з встановленим фіксованим значенням бітової швидкості;
- додавання до потоку даних, що генеруються кодером, т.з. «заповнюючих пакетів».

У першому випадку сумарне навантаження $Q(t)_{\text{busy}}$ на мережу може бути прогнозованим. Відповідно, це дає змогу:

- резервування мережевих ресурсів з їх залученням у процес обробки при зростанні навантаження та, навпаки, виведення їх у резерв при падінні навантаження;
- урахувувати навантаження при динамічній побудові маршрутних таблиць таким чином, щоб навантаження рівномірно розподілялося у мережі.

Отже, таким чином суттєво зменшується ймовірність мережевих колізій, що, безумовно, є перевагою даного підходу.

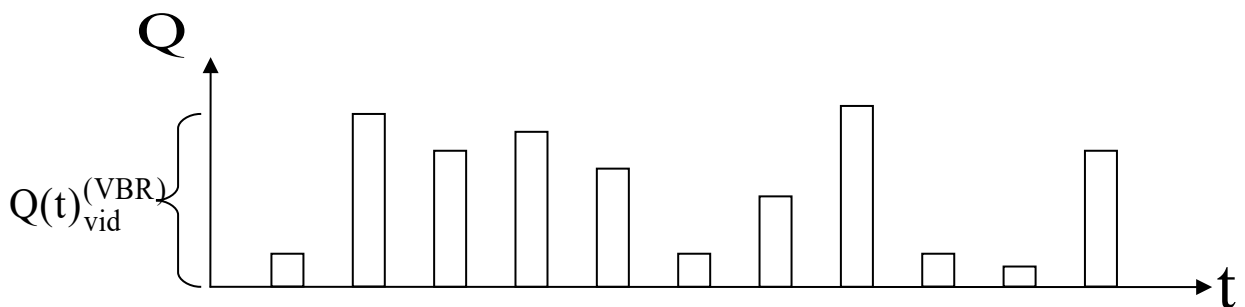


Рисунок 3.5 – Приклад VBR-відеотрафіку

З іншого боку, CBR-підхід до формування відеотрафіку має також ряд суттєвих недоліків, а саме:

- трафік, бітова швидкість якого перевищує PCR, будет відкидатися на рівні мережевих вузлів;

- трафік бітова швидкість якого нижче зарезервованої, не буде задовольняти додатки за рівнем затримки t доставки пакетів;

Означені недоліки є справедливими, у сутності, для усіх типів трафіку також.

Разом з тим, ще один суттєвий недолік СBR-підходу саме для відео полягає у наступному:

- відеокадри, що формують потік, початково несуть у собі різну кількість біт як наслідок змін особливостей їхнього змісту у часі;

- схема MPEG-обробки передбачає формування потоку на базі груп кадрів (рис.3.6), у яких кадрам І-типу відповідає найбільша кількість біт, дещо нижча – Р-кадрам та найменша – В-кадрам, тобто вже за рахунок цього величина $Q(t)_{\text{busy}}$ може суттєво змінюватися у часі.

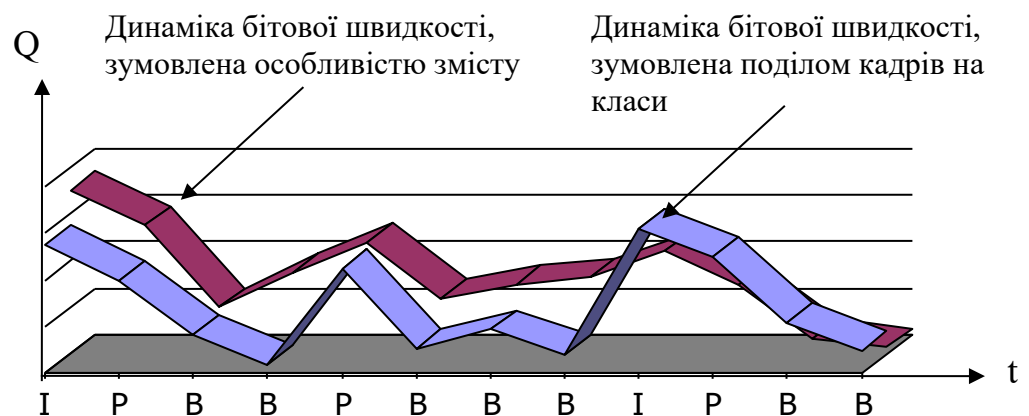


Рисунок 3.6 – Динаміка у часі бітової швидкості відео у наслідок змін особливостей змісту та поділом кадрів на класи у схемі MPEG

Таким чином, як видно з аналізу рис. 3.6, застосування СBR для кодування відео веде до того, що:

- для ряду ділянок відео трафіку, що для передавання з рівнем якості не нижчим, ніж вимагають умови (2.2), потребують бітової швидкості $Q_{\text{vid}}(t)$ на рівні:

$$Q_{\text{vid}}(t) > \text{PCR}, \quad (3.11)$$

якість не буде забезпечено, оскільки у зазначених умовах CBR-кодування співвідношення (3.11) не буде задовольнятися;

- для надсилання ділянок відеотрафіку, яким відповідає бітова швидкість, що є суттєво нижчою PCR, буде виділятися рівень бітової швидкості занадто високий порівняно з тим, що необхідний для забезпечення належного рівня якості.

Отже, певним ділянкам відео в умовах CBR-кодування відповідає недостатня кількість біт для того, щоб забезпечити їхнє реконструювання з належним рівнем якості, водночас, для деяких інших виділяється надмірна кількість біт. Тобто, має місце нераціональний розподіл бітової швидкості.

У свою чергу, VBR-підхід дозволяє урахувати динаміку змін бітової швидкості відео викликану як особливостями змісту відео сцен, так і особливостями формування потоку у базисі MPEG.

Разом з тим, змінна бітова швидкість створює пульсуючий характер навантаження на мережу, що створює передумови до виникнення перевантажень та мережевих колізій.

Виявлені переваги та недоліки CBR та VBR-підходів до кодування ілюструє табл. 3.1.

Таблиця 3. 1 – Переваги та недоліки CBR та VBR-підходів до кодування відео

	CBR	VBR
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> - можливість прогнозування навантаження; - мінімізація ймовірності колізій 	<ul style="list-style-type: none"> - вища, порівняно з CBR, якість відновлених відеоданих; - раціональний розподіл бітової швидкості у межах потоку
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> - нераціональний розподіл бітової швидкості у рамках відео потоку; - потенційно нижча якість реконструйованих відеоданих; - нераціональне використання пропускної здатності мережі 	<ul style="list-style-type: none"> - вища ймовірність виникнення колізій

У підсумку, з огляду на перелічені недоліки та переваги, найчастіше використовується VBR-підхід як такий, що потенційно здатен забезпечити якість відеосервісів на належному рівні.

У той же час, динаміка пропускної здатності мережі (як показано виразом 3.10), та бітової швидкості відеопотоку (як ілюструє схема на рис.3.6) задається факторами, що є між собою незалежними. Тобто, характер змін бітової швидкості відео $Q_{vid}(t)$ та доступної пропускної здатності $W_{free}(t)$ не співпадає, що створює умови, у яких гарантування якості відеосервісів буде неможливим.

3.3.3 Висновки за результатами аналізу процесу обробки відеоданих на рівні джерела

За результатами розгляду процесів обробки відео на боці джерела та особливостей надсилання відеотрафіку виявлено, що:

- технології стиснення відео дозволяють скоротити бітову швидкість потоку, орієнтуючись на параметри кодування, що встановлюються зазвичай попередньо;
- у рамках існуючих технологій стиснення відео присутній ряд механізмів, що сприяє зміні підсумкової бітової швидкості відеопотоку;
- динаміка бітової швидкості відео має пульсуючий характер, як і пропускна здатність мережі, при цьому, амплітуда та закон змін цих величин є не співпадаючим.

Отже, може бути зазначено, що:

- існує необхідність підлаштування бітової швидкості відео до поточного значення пропускної здатності для забезпечення якості надання відеосервісів, як задано умовами (3.7) та (3.8);
- підходи на базі використання технологій кодування не забезпечують повною мірою досягнення балансу між величинами $Q_{vid}(t)$ та $W_{free}(t)$.

Таким чином, для того, щоб створити умови, у яких може забезпечуватися якість надання відеосервісів як на достатньому, так і на оптимальному рівнях, необхідно у процесі кодування змінювати його параметри для балансування бітової швидкості відносно змін пропускної здатності мережі.

4 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІДНОСНО ЗМІН ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖІ

4.1 Технологія ABR

Розглянемо, яким чином можна забезпечити зміну бітової швидкості $Q_{\text{vid}}(t)$ відео в умовах змін величини доступної пропускної здатності $W_{\text{free}}(t)$.

Сьогодні на базі HTTP протоколу реалізовано технологію ABR (adaptive bit rate), що широко використовується, зокрема, компанією Google у рамках надання доступу до відеохостингу YouTube, та іншими аналогічними платформами [18].

У рамках ABR передбачається, що початково існує єдине джерело Ψ відеоданих (відео файл, або пристрій відеофіксації).

Далі, наявний відеоінформаційний ресурс підлягає кодуванню з певною сіткою ξ роздільних здатностей (або певним кроком якості). Зрозуміло, що інтенсивність кожного ξ -го потоку Ψ_{ξ} , отриманого на базі джерела Ψ , буде різною.

За результатами цього формується деяка множина з ξ прошарків (layers) відеоданих, кожен з яких відповідає потокові з певним рівнем $Q_{\text{vid}}(t)$ бітової швидкості.

Далі, кожен прошарок сегментується на Ξ окремих ділянок у часі $\tau_i^{(\xi)}$, де ξ - індекс потоку джерела Ψ , i - індекс часової ділянки у рамках ξ -го потоку Ψ_{ξ} джерела Ψ , $\Xi = \overline{1; \Theta}$.

Схематично таке перетворення може бути зображено, як показує рис. 4.1.

Далі, у процесі звернення приймача до джерела відеоінформації, початково встановлюється найнижчий рівень $Q_{\text{vid}}^{(\ominus)}(t)$, що відповідає мінімальній роздільній здатності (або найнижчій якості $Y_{\text{vid}}^{(\ominus)}(t)$) відеопотоку.

У наступний часовий інтервал $(t+1)$ приймачеві надсилається відео потік зі швидкістю $Y_{\text{vid}}^{(\ominus)}(t)$. Далі, якщо $Q_{\text{vid}}^{(\ominus)}(t+1) \leq W_{\text{free}}(t+1)$, на інтервалі

$(t+2)$ величину бітової швидкості буде збільшено до $Q_{\text{vid}}^{(\Theta-1)}(t+2)$, що відповідає попередньому крокові градації якості відео. При цьому, часовий здійснюється запит часового інтервалу $(t+2)$ відео відповідного прошарку якості.

У подальшому для кожного наступного часового інтервалу бітова швидкість збільшується шляхом звернення до відповідних часових ділянок відповідних прошарків, доти, поки виконується умова $Q_{\text{vid}}^{(\Theta)}(t) \leq W_{\text{free}}(t)$. Інакше далі виконується зворотній процес.

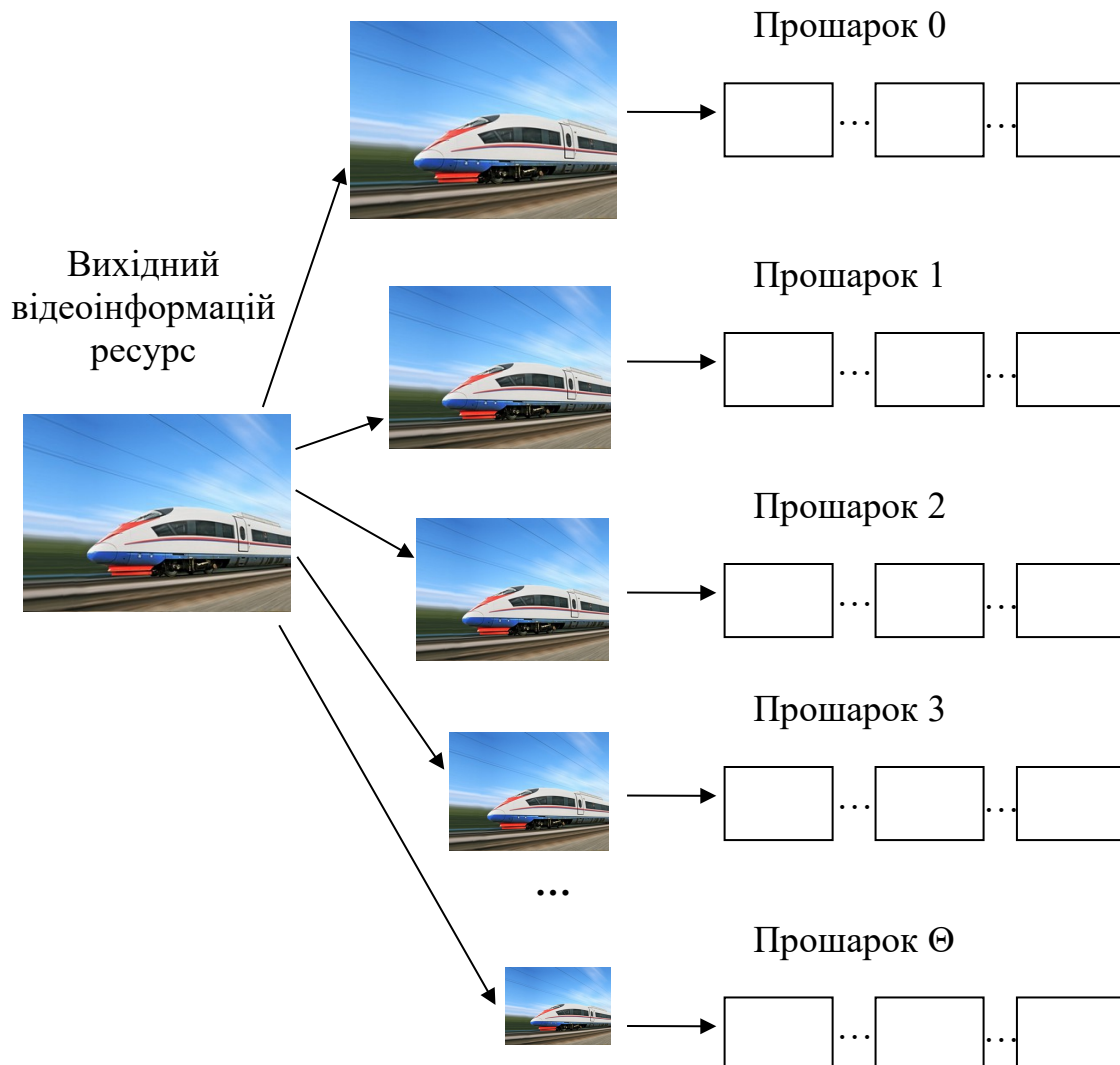


Рисунок 4.1 – Схема формування прошарків відеоданих у рамках ABR

Розглянута технологія дозволяє забезпечувати сталу трансляцію відеопотоку в умовах постійних змін величин $Q_{\text{vid}}(t)$ та $W_{\text{free}}(t)$, що, безумовно є її перевагою.

Одночасно з цим, ABR має цілу низку суттєвих недоліків, що обмежують її використання некритичними системами надання відеосервісів. Це такі недоліки, як:

- якість $Y_{\text{vid}}(t)$ відновлених відеоданих не забезпечується. У процесі трансляції відео здійснюється виключно звернення до прошарків з іншою бітовою швидкістю, без компенсації внесених помилок;
- на сьогодні не існує стандартизованої сітки роздільних здатностей, які встановлюються виробниками обладнання та розробниками програмних платформ. Відтак – існує необхідність зберігати (генерувати) велику кількість Θ прошарків якості;
- зберігання великої кількості прошарків якості веде до нераціонального використання пристроїв зберігання даних;
- генерування великої кількості прошарків якості у реальному часі (для пристроїв відеофіксації) потребує суттєвих обчислювальних потужностей, що звужує застосовуваність технології лише високопродуктивними системами і унеможлиблює використання ABR для інших.

З огляду на виявлені недоліки, значно ефективним є підхід, що використовує управління опціями кодування для механізмів обробки кадрів, як було показано рис. 3.1

4.2 Технологія SRC (Scalable Rate Control)

Дана технологія [16] є складовою частиною MPEG 4 та являє собою стандартизоване рішення.

У рамках SRC процес адаптації бітової швидкості $Q_{\text{vid}}(t)$ відеотрафіку забезпечується на базі управління зміною кроку λ квантування у ході передавання відеоданих.

Це, у свою чергу, дозволяє досягти змін величини бітової швидкості відеопотоку, який підлягає обробці та надсиланню у мережу.

Технологія використовує 2 рівні кодування, а саме:

- кодування кадрів;
- кодування макроблоків.

При цьому передбачається, що обраний крок λ квантування не змінюється для макроблоку та, відповідно, кадру. У таких умовах внесена у ході квантування помилка впливає на усі структурні складники відеопотоку, для яких обрано крок λ .

У свою чергу, обробка відеопотоку на рівні кодування кадрів на базі SRC здійснюється для невеликих розмірів буферу передавача при відносно високих бітових швидкостях відео, що приблизно є не нижчими, ніж генерує джерело з роздільною здатністю HD-ready. Разом з тим, обробка на рівні кодування макроблоків виконується для низьких бітових швидкостей з великим розміром буферу.

Тобто, у випадку зміни діапазону швидкості гнучке налаштування змін кроку λ квантування технологією не передбачено. За рахунок цього може вноситися значний рівень помилки

У підсумку, SRC властиві такі ключові недоліки, як:

- недосконалість механізму змін кроку квантування у процесі управління бітовою швидкістю;
- за рахунок використання виключно механізму квантування забезпечити необхідне співвідношення бітова швидкість/якість занадто складно та потребує великої кількості ітерацій, що сповільнює процес та вносить суттєві рівні часової затримки;
- технологія є ефективною виключно для випадку, коли бітова швидкість оброблюваного потоку на має значного динамічного діапазону.

4.3 Балансування бітової швидкості відеопотоку на базі прогресивного режиму стиснення JPEG

Базова схема (baseline) JPEG-обробки, як показано рис. 3.1, розглядає відеокадр E_j потоку як єдиний об'єкт. Натомість у прогресивному режимі (progressive) кадр E_j являє собою сукупність деякої кількості \cup сканів ε_i , тобто [17]:

$$E_j = \prod_{i=1}^{\nu} \varepsilon_i, \quad (4.1)$$

де ν - кількість сканів, що залежить від опцій прогресивного режиму та схеми обробки кадру.

При цьому, передбачається наявність таких схем обробки, як:

- частотна вибірка (spectral selection);
- ітеративного наближення (successive approximation).

Схема частотної вибірки виконує поділ усієї множини компонент $\eta'(\ell)_{x,y}$ трансформанти $B'_{i,j}^{(k)}$ на V частотних зон, як показано рис.4.2.

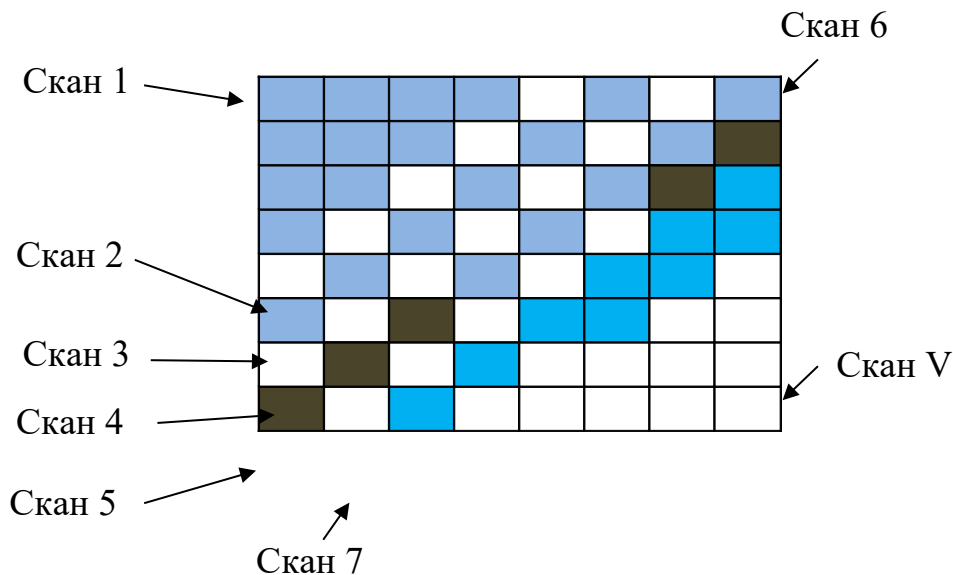


Рисунок 4.2 – Схема формування трансформанти $B'_{i,j}^{(k)}$ з V частотних зон

При цьому, кожна з зон містить певну кількість компонент.

У свою чергу, схема ітеративного наближення використовує розгляд компонент трансформанти у двійковому описі. При цьому скан формують один або M двійкових розрядів десяткового опису компоненти $\eta'(\ell)_{x,y}$, як показано рис.4.3.

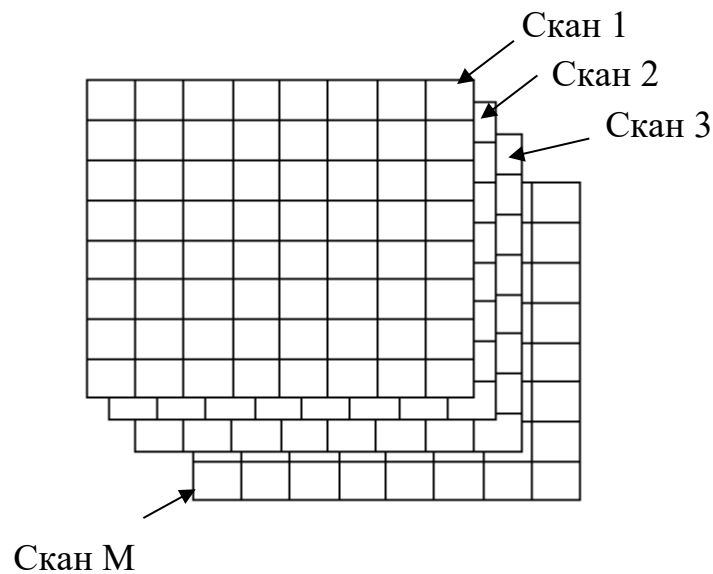


Рисунок 4.3 – Схема формування трансформанти $B_{i,j}^{(k)}$ з M сканів, кожен з яких відповідає розряду двійкового опису компонент $\eta'(t)_{x,y}$

Обидві схеми забезпечують зниження бітової швидкості $Q_{vid}(t)$ шляхом скорочення кількості ν сканів, що формують підсумковий кадр. Одночасно з цим, зменшується якість $Y_{vid}(t)$ реконструйованих відеоданих. При цьому, візуально характер внесених викривлень кадру для випадків схем spectral selection та ітеративного наближення буде відмінним.

Така функціональна залежність між значенням ν та величиною $Q_{vid}(t)$ ілюструє наступне співвідношення:

$$Q_{vid}(t) = f(\nu), \nu \uparrow \rightarrow \begin{cases} Q_{vid}(t) \uparrow \\ Y_{vid}(t) \uparrow \end{cases} \quad (4.2)$$

Тобто, маніпуляція кількістю ν сканів для опису трансформанти $B_{i,j}^{(k)}$ кадру E_j забезпечує як зниження бітової швидкості усього кадру, так і сприяє локалізації внесеної шляхом відсічення деякої кількості сканів помилки D у межах окремих трансформант, не впливаючи на якість усього кадру, як це відбувається у випадку застосування SRC.

До того ж, скан ε_i теоретично може містити досить значну кількість біт, що дозволяє суттєво змінювати рівень бітової швидкості у реальному часі при передаванні відео.

Разом з тим, підхід, що передбачає балансування бітової швидкості відеопотоку на базі прогресивного режиму стиснення JPEG, обмежується відсутністю ефективних механізмів контролю внесеної помилки. Це пояснюється тим, що:

- у загальному випадку усіченню підлягають скани, що відповідають ВЧ компонентам (для схеми частотної вибірки), або молодшим розрядам компонент (для ітеративного наближення);

- розподіл потужності (найбільш інформативних структурних складників) у рамках трансформант має випадковий характер, зокрема, може міститися як у ВЧ, так і НЧ-зонах, старших або молодших компонентах, хоча статистично найбільш інформативними вважаються старші оряди двійкового опису та НЧ-компоненти.

Таким чином, у ході усічення сканів може вноситися неконтрольована помилка, що не гарантує якості надання відео сервісів.

У той же час, принципи формування трансформант, прийняті у прогресивному режимі JPEG, теоретично дозволяють забезпечити ефективну адаптацію бітової швидкості відео з пропускнуою здатністю мережі, одночасно з дотриманням якості як за критерієм достатності, так і оптимальності.

5. СИНТЕЗ МЕТОДУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ВІДЕО СЕРВІСІВ НА БАЗІ УПРАВЛІННЯ БІТОВОЮ ШВИДКІСТЮ У БАЗИСІ ПРОГРЕСИВНОГО АЛГОРИТМУ JPEG

Для того, щоб забезпечити виконання умов (3.8), тобто, вирішити бімінімальне завдання, необхідно усунути недоліки підходу по управлінню бітОВОЮ швидкістю відео, що побудований на базі прогресивного алгоритму JPEG.

Іншими словами, необхідно налагодити процес виключення найменш інформативних сканів ε_i з опису трансформанти.

5.1. Вимоги до методу управління бітОВОЮ швидкістю на базі прогресивного алгоритму JPEG

Оскільки мова йде про надання мережевих відео сервісів, відповідно, обробка та управління бітОВОЮ швидкістю $Q_{\text{vid}}(t)$ має здійснюватися у реальному масштабі часу, відповідно, внесена на етапі управління затримка t_{proc} має мінімізуватися.

Водночас, за умовою бімінімального завдання (вираз (3.8)) необхідно забезпечити одночасно мінімізацію як бітОВОЇ швидкості, так і рівня D внесеної помилки.

Отже, тоді необхідно створити умови для раціонального розподілу бітОВОЇ швидкості не лише у межах кадру E_j , але і у межах трансформант $B_{i,j}^{(k)}$.

Тоді, по-перше, вираз (3.8) для бімінімального завдання буде уточнено та подано у вигляді:

$$\begin{cases} Y_{\text{vid}} \rightarrow \max | Q_{\text{vid}} \rightarrow \min \\ t_{\text{proc}} \rightarrow \min \end{cases} \quad (5.1)$$

По-друге, раціональний розподіл бітОВОЇ швидкості досягається у випадку, коли крок зміни бітОВОЇ швидкості буде:

- гнучким, тобто, зможе змінюватися у ході управління;

- міститиме обсяг біт, достатній для суттєвої зміни бітової швидкості за мінімальний час.

Такі умови відповідають використанню схеми ітераційного наближення прогресивного алгоритму JPEG з кроком скану $\varepsilon_i=1$.

5.2 Об'ємний опис трансформанти

Бітова швидкість $Q_{E_j}(t)$ кадру E_j , сформованого K трансформантами $V_{i,j}^{(k)}$, являє собою суму внесків бітових швидкостей $Q_{i,j}^{(k)}(t)$ окремих трансформант.

У свою чергу, кожна трансформанта $V_{i,j}^{(k)}$ формується певною кількістю сканів, кожен з яких в умовах $\varepsilon_i=1$ відповідає сукупності біт одного розряду (двовимірному двійковому масиву $b(\alpha)_j^{(k)}$ α -го розряду).

Тобто, це еквівалентно співвідношенню:

$$Q_{E_j}(t) = \sum_{k=1}^K Q_{i,j}^{(k)}(t) = \sum_{\alpha=1}^M \sum_{k=1}^K Q(\alpha)_j^{(k)}, \quad (5.2)$$

де $Q(\alpha)_j^{(k)}$ - бітова швидкість двовимірного двійкового масиву α -го розряду k -ї трансформанти j -го кадру;

M – кількість розрядів для опису трансформанти $V_{i,j}^{(k)}$;

K – кількість трансформант, що формують кадр.

Інакше кажучи, на базі двійкових описів усіх компонент $\eta'(t)_{x,y}$ трансформанта може бути представлена як об'ємна структурна одиниця відеопотоку (рис.5.1).

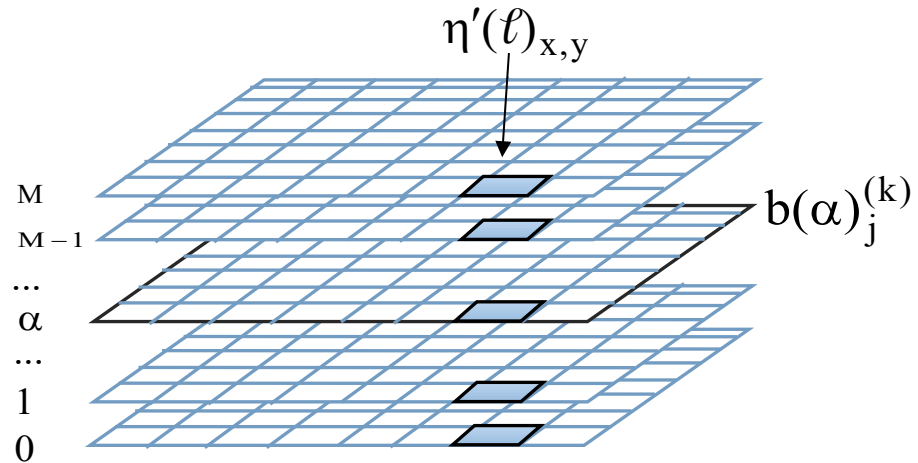


Рисунок 5.1 – Опис трансформанти у вигляді об’ємної структурної одиниці відео потоку, сформованої M двовимірними двійковими масивами

У розглянутій на рис.5.1 об’ємній структурі, яку являє собою трансформанта $V'_{i,j}^{(k)}$, M -й прошарок формують старші біти двійкового опису компонент $\eta'(\ell)_{x,y}$. У свою чергу, нижній прошарок утворюють молодші біти. Таким чином, об’ємний опис трансформанти дає змогу наглядно розглянути процес управління бітовою швидкістю, що базується на маніпулюванні кількістю двовимірних двійкових масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ для її опису.

5.3 Побудова механізму управління бітовою швидкістю (рішення бімінімальної задачі)

Маємо кадр E_j , до складу якого входять K трансформантами $V'_{i,j}^{(k)}$, кожна з яких представлена M двовимірними двійковими масивами $b(\alpha)_j^{(k)}$ відповідно до кількості розрядів, задіяних для опису її компонент $\eta'(\ell)_{x,y}$. Також існує обмеження на пропускну здатність мережі $W_{free}(t)$. Це дає змогу розглядами процес управління бітовою швидкістю у вигляді K -етапного процесу вироблення рішень. Відповідно до цього, математична реалізація механізму управління бітовою швидкістю може бути здійснена на базі

методу динамічного програмування [19-21], оскільки даний обчислювальний інструментарій дозволяє:

- орієнтуватися на вироблення оптимального рішення для максимізації (мінімізації) цільової функції;
- розглядати процес обчислення як сукупність етапів, на кожному з яких здійснюється пошук субоптимального (оптимального для поточного етапу) рішення;
- у ході вироблення рішень для забезпечення належного рівня цільової функції орієнтуватися на рівень обмежень, що накладаються на процес обчислення;
- за рахунок розподілу загальної процедури обчислення на ряд етапів зменшити обчислювальне навантаження.

При цьому, цільовою функцією є бітова швидкість $Q_{E_j}(t)$ кадру, обмеження на процес обчислення – рівень помилки D , що вноситься у процесі управління.

Загальна процедура управління, як передбачає метод динамічного управління, для кадру E_j , сформованого K трансформант, міститиме, відповідно, K кроків. Обчислення параметрів оптимального управління C_{opt} при цьому здійснюється послідовно.

Тут під терміном оптимальне управління C_{opt} будемо мати на увазі процес обчислення множини двовимірних двійкових масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ для трансформанти кадру, а саме - їхньої кількості α та способу розміщення P (placement) у межах трансформанти, при якому умова (5.1), задовольняється.

У свою чергу, приймаючи до уваги адитивний характер оптимальних управлінь, вироблених на проміжних етапах обчислень, вираз, що описує оптимальне управління для кадру, буде наступним:

$$C_{opt} = \prod_{k=1}^K C_{opt}^{(k)} \quad (5.3)$$

де $C_{\text{opt}}^{(k)}$ - оптимальне управління на k -му кроці, що може бути описане як $C_{\text{opt}}^{(k)} = \phi(\alpha, p)$.

Відповідно, керуючись властивістю (5.3) динамічного програмування, спочатку розглянемо процес формування оптимального управління для однієї трансформанти $Q'_{i,j}^{(k)}$.

Означений процес передбачає перевірку усіх можливих комбінацій величин $Q'_{i,j}^{(k)}(t)$ бітових швидкостей та значень D помилки для усіх K трансформант, що утворюються різною кількістю α двовимірних двійкових масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$, які при цьому їх формують.

При цьому, на кожному k -му кроці побудова управління (вибір величин α та p) здійснюється таким чином, щоб сукупно з розрахованими оптимальними управліннями для послідуєчих трансформант (починаючи з $(k+1)$ -ї), досягалася мінімізації цільової функції $Q'_{i,j}^{(k)}(t)$ разом з мінімізацією обмежень D згідно з (5.1) [20].

Тобто, на кожному з K етапів управління має бути обчислено аргумент функції $Q'_{i,j}^{(k)}(t) = f(C_{\text{opt}}^{(k)})$, здатний мінімізувати величини $Q'_{i,j}^{(k)}(t)$ та D .

У загальному вигляді такий процес може бути подано наступним виразом:

$$Q'_{i,j}^{(k)}(t) = f(Q'_{i,j}^{(k-1)}(t), C_{\text{opt}}^{(k)}) = \min Q'_{i,j}^{(k)}(t), \quad (5.4)$$

де $Q'_{i,j}^{(k-1)}(t)$ - значення, яке цільова функція приймає на передуючому етапі управління.

У ході подальшого формування оптимального управління $C_{\text{opt}} = \{C_{\text{opt}}^{(k+1)}, \dots, C_{\text{opt}}^{(K)}\}$ згідно з (5.4) на наступних $(K - k + 1)$ кроках розраховується величина $Q'_{i,j}^{(\text{opt})}(t) = \min Q'_{i,j}(t)$, що визначається виключно попереднім значенням величини $Q'_{i,j}^{(k-1)}(t)$, тобто:

$$Q'_{i,j}{}^{(\text{opt})}(t)(Q'_{i,j}{}^{(k-1),\text{opt}}(t)) = \min_{C_k} f(Q'_{i,j}{}^{(k-1)}, C_k) = f(Q'_{i,j}{}^{(k-1)}, C_{\text{opt}}^{(k)}), \quad (5.5)$$

де $Q'_{i,j}{}^{(\text{opt})}(t)(Q'_{i,j}{}^{(k-1),\text{opt}}(t))$ - умовний мінімум, який досягається за рахунок застосування субоптимального (оптимальної для локального етапу) управління на етапі $k-1$.

Фізична умовний мінімум являє собою обчислену комбінацію кількості α та способу розміщення P множини двовимірних двійкових масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$, яким у підсумку відповідає мінімальна бітова швидкість за умов мінімального значення D помилки на поточному етапі управління.

Згідно з принципом оптимальності Белмана, що лежить в основі динамічного програмування (рис.5.2), у ході кожного k -го етапу формування загального управління, локальне рішення C_k генеруються таким чином, щоб у поєднанні з локальними рішеннями, згенерованими у ході усіх наступних $(K-1+k)$ етапів (у т.ч. включаючи k -й), досягалася мінімізація підсумкового значення цільової функції [20, 21].

Аналітично дана процедура вироблення рішень ілюструється наступним виразом:

$$Q'_{E_j}{}^{(\text{opt})}(t)(Q'^{(\alpha-1)}) = \min_{U_\alpha} \{f_\alpha(Q'^{(\alpha-1)}, C_{\alpha-1})\},$$

$$Q'_{E_j}{}^{(k),\text{opt}}(t)(Q'_{E_j}{}^{(k-1)}(t)) = \min_{U_k} \left\{ f_k(Q'_{E_j}{}^{(k-1)}(t)) + Q'_{E_j}{}^{(k+1),\text{opt}}(t)(Q'_{E_j}{}^{(k)}) \right\}, \quad (5.6)$$

де C_k - управління (вироблене рішення) на k -му етапі;

$Q'^{(\alpha-1)}$ - величина бітової швидкості, яку формують $(\alpha-1)$ трансформант;

$Q'_{E_j}{}^{(k)}$ - значення цільової функції на k -му етапі;

f_k - показник ефективності прийняття рішення для k -го етапу, що визначається значенням цільової функції на передуючому кроці, а також згенерованого рішення (обраного управління) C_k для цього етапу.

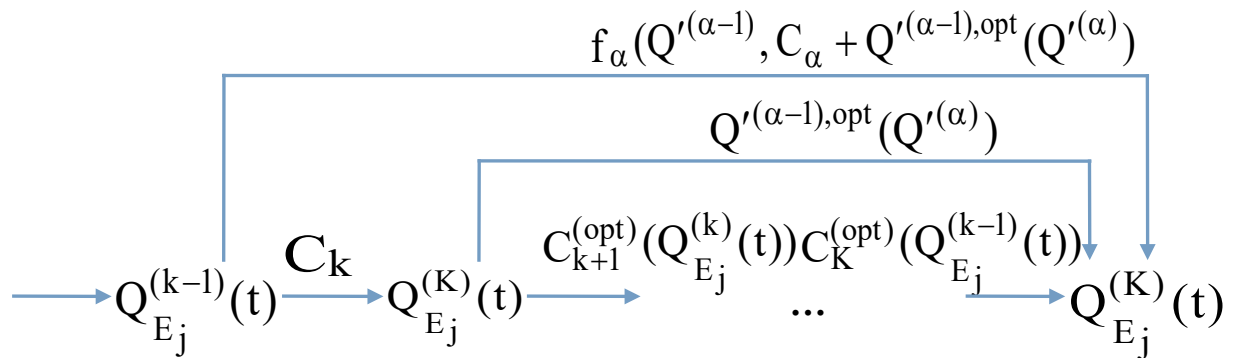


Рисунок 5.2 – Ілюстрація використання принципу оптимальності Белмана для побудови процесу управління бітовою швидкістю відеоданих

Розглянемо особливості процесу вибору оптимального управління для рішення бімінімального завдання. На рис. 5.3 зображено схему обробки відеокадру, до складку якого входять 3 трансформанти, на базі динамічного програмування.

Після того, як обчислено усю множину $Q_{Ej}^{(K)}(t)$ значень бітових швидкостей кадру, та значень внесеної помилки, побудова оптимального управління потребує виконання ряду операцій, а саме [19]:

1. Виключення з розгляду управлінь (точок на схемі 5.3), за результатами яких виникає комбінація швидкість/похибка, яка спричинює переповнення вихідного буфера передавача.

2. Виключення з розгляду управлінь, що ведуть до появи комбінацій швидкість/похибка, яким відповідають однакові значення мінімальної помилки D_{min} , окрім таких, що відповідають найменшим значенням $Q_{Ej}^{(K)}(t)$.

3. Виключення з розгляду управлінь, що ведуть до появи комбінацій швидкість/похибка з однаковими величинами $Q_{Ej}^{(K)}(t)$, окрім таких, яким відповідає мінімальна помилка D_{min} .

Очевидно, що швидкодія синтезованого таким чином механізму управління C бітовою швидкістю відео суттєво залежить від таких параметрів відеоряду, що надходить на обробку, як:

- роздільна здатність кадру;
- кількості розрядів M для опису сегментів кадру.

5.4 Дослідження обчислювальної складності методу управління бітовою швидкістю на базі динамічного програмування

Для того, щоб розглянутий метод управління можливо було реалізувати в існуючому апаратно-програмному технологічному базисі, у рамках неспеціалізованих систем, необхідно здійснити оцінку обчислювального навантаження у ході його роботи.

Так, для кадру E_j , який формується K трансформантами $V_{i,j}^{(k)}$, які описується M двовимірними двійковими масивами $b(\alpha)_j^{(k)}$, кількість станів Φ алгоритму (множина варіантів вибору двовимірних двійкових масивів) розраховується наступним чином:

$$\Phi = (2^M)^K \quad (5.7)$$

Вираз (5.7) є справедливим з тих міркувань, що:

- рішення відносно застосування чи ігнорування двійкового масиву $b(\alpha)_j^{(k)}$ для опису трансформанти відповідає бінарний символ, який, відповідно, приймає 2 значення - "1" у випадку використання масиву $b(\alpha)_j^{(k)}$ та "0", якщо масив не буде задіяно. Отже, така залежність являє собою випадок розміщення з повтореннями з K елементів по M , тобто - A_K^M [22].

- у межах M -розміщення $\{a_1, a_2 \dots a_K\}$ елемент a_1 з множини Φ , яка містить θ елементів, може бути вибрано θ способами, елемент a_2 - відповідно також θ способами, також, аналогічним чином, елемент a_M - θ способами. Тоді за правилом обчислення добутку отримуємо: $A_\theta^M = \theta^M$.

Звідси виходить, що, кількість можливих комбінацій вибору масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ для трансформанти буде рівним 2^M . Таким же чином, для випадку двох трансформант $\Phi = (2^M)^2$, а для K трансформант - $\Phi = (2^M)^K$.

На базі виразу (5.7) виконаємо розрахунки можливої кількості станів алгоритму у ході управління бітовою швидкістю кадрів з роздільною здатністю FullHD і HD-ready. Умовимося, що для опису кадрів задіяно 8 розрядів, що є традиційним для MPEG.

Результати розрахунків наведено табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Кількість станів Φ алгоритму управління бітовою швидкістю для кадрів роздільної здатності FullHD та HD-ready

Формат	Розмір кадру	Кількість розрядів (кількість масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
HD-ready	1280× 720	1	2^{14400}	4^{14400}	8^{14400}	16^{14400}	32^{14400}	64^{14400}	128^{14400}
FullHD	1920× 1080	1	2^{32400}	4^{32400}	8^{32400}	16^{32400}	32^{32400}	64^{32400}	128^{32400}

Аналіз таблиці 5.1 свідчить про те, що з огляду на значення розрахованих величин Φ розглянутий метод управління бітовою швидкістю на базі існуючих сьогодні неспеціалізованих апаратно-програмних платформ бути реалізованим не може, так як умова щодо функціонування у реальному часі (вираз 5.1) не виконується.

Таким чином, для можливості реалізації методу необхідно зменшити ймовірну кількість станів алгоритму.

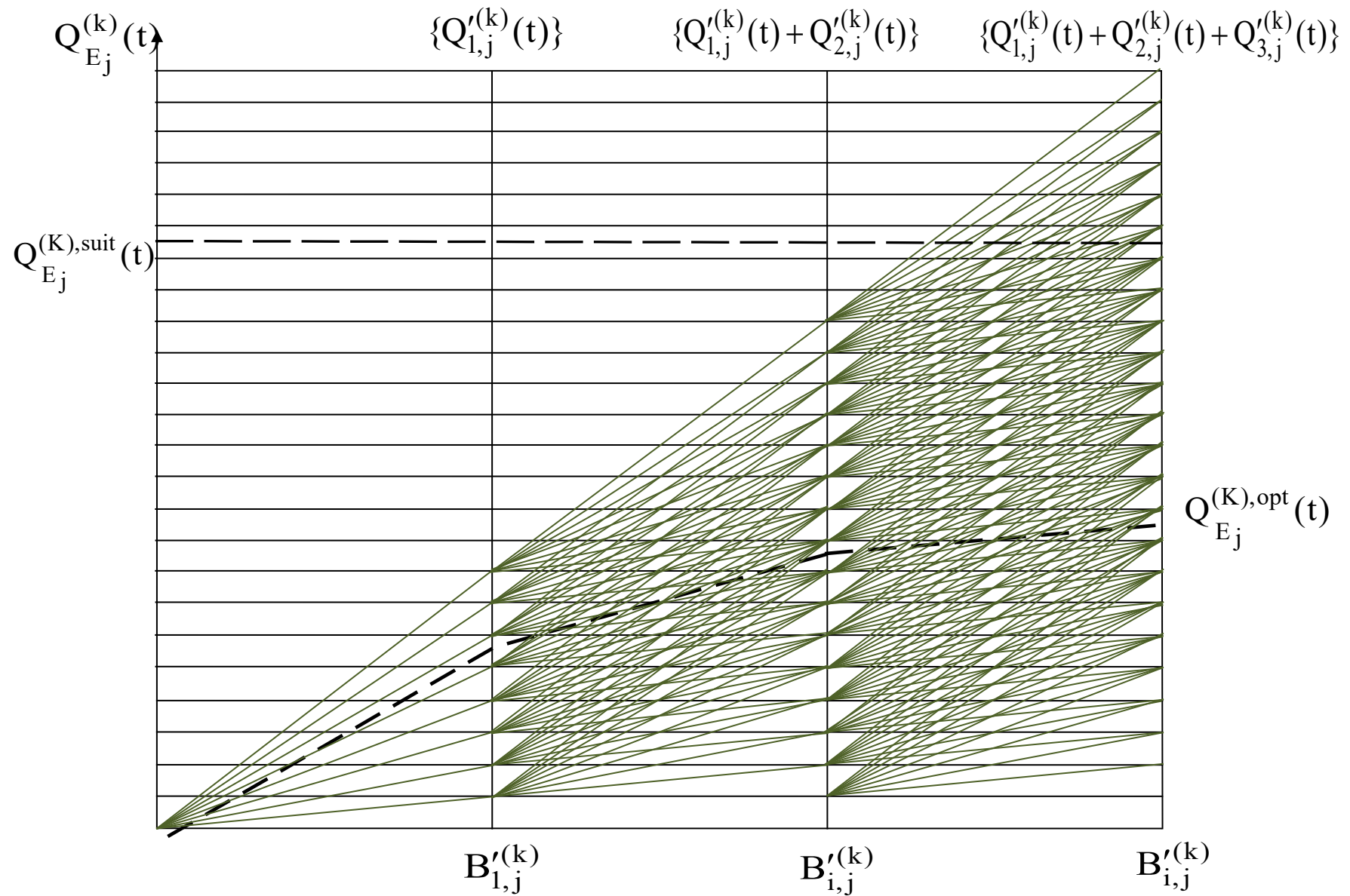


Рисунок 5.3 – Приклад побудови оптимального управління для кадру, сформованого 3 трансформантами, за методом динамічного програмування

На рис. 5.3 $\{Q'_{1,j}(t)\}^{(k)}$ - множина бітових швидкостей у ході обробки однієї трансформанти $V'_{1,j}(t)^{(k)}$, яка відповідає кількості Φ станів алгоритму на відповідному етапі управління.

Аналогічним чином, $\{Q'_{1,j}(t) + Q'_{2,j}(t)\}^{(k)}$ та $\{Q'_{1,j}(t) + Q'_{2,j}(t) + Q'_{3,j}(t)\}^{(k)}$ - множина бітових швидкостей у ході обробки двох та трьох трансформант.

При цьому, $Q_{E_j}^{(K),suit}(t)$ - порогова бітова швидкість, що веде до переповнення буферу, $Q_{E_j}^{(K),opt}(t)$ - визначена оптимальна бітова швидкість, пунктирна лініє схематично демонструє кількість застосованих масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ для опису кожної з трансформант, а саме:

- $V'_{1,j}(t)^{(k)}$ - 6 масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$;
- $V'_{2,j}(t)^{(k)}$ - 7 масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$;
- $V'_{3,j}(t)^{(k)}$ - 1 масив $b(\alpha)_j^{(k)}$.

5.5 Оптимізація алгоритму управління бітовою швидкістю на базі динамічного програмування шляхом скорочення простору розрахунків

Одним з підходів, спрямованих на зменшення кількості станів Φ алгоритму є пошук подібних фрагментів у межах кадру E_j , для чого початковий кадр ділиться на множину $\{E_j^{(s)}\}$ субкадрів [14].

Такий поділ може бути здійснено як за напрямком рядків, так і стовпців (рис. 5.4).

При цьому, крок \mathcal{Q} поділу вихідного кадру може визначатися:

- наявною обчислювальною спроможністю G платформи;
- роздільною здатністю NW кадру;
- необхідним рівнем δ балансу між бітовою швидкістю $Q_{E_j}^{(k)}(t)$

кадру, рівнем D помилки та швидкодією алгоритму.

Тобто, функціональна залежність між кроком \mathcal{Q} поділу вихідного

кадру на субкадри, та означеними параметрами може бути подана наступним співвідношенням:

$$\mathfrak{S} = f(G; HW; \delta), \quad (5.8)$$

де рівень δ балансу між величинами $Q_{E_j}^{(k)}(t)$, D та t_{proc} визначається на базі наступної системи співвідношень:

$$\begin{cases} \delta \uparrow \rightarrow \mathfrak{S} \downarrow | D \downarrow \& t_{\text{proc}} \uparrow; \\ \delta \downarrow \rightarrow \mathfrak{S} \uparrow | D \uparrow \& t_{\text{proc}} \downarrow; \\ \delta \downarrow \rightarrow \mathfrak{S} \uparrow | D_{\text{const}} \& t_{\text{proc}} \uparrow. \end{cases} \quad (5.9)$$

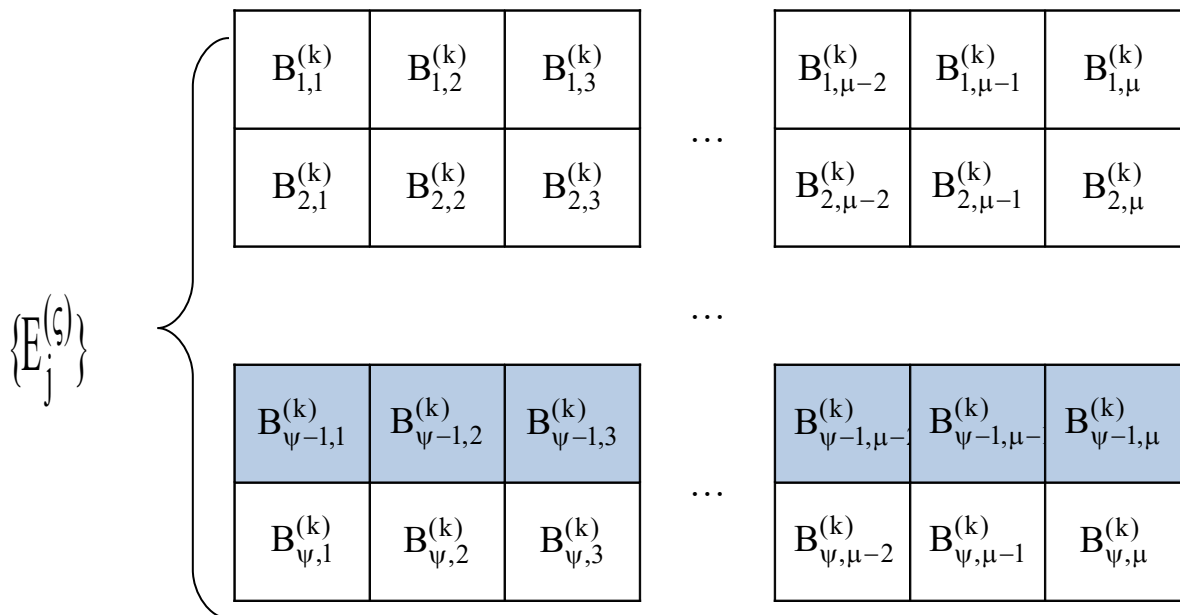


Рисунок 5.4 – Виділення підкадрів F_{sub} у структурі початкового кадру у напрямку рядків

Після того, як вихідний кадр поділено на субкадри $E_j^{(s)}$, відносно кожного з них застосовується процедура виявлення подібних фрагментів $B_{i,j}^{(k)}$

субкадру. За результатами цього субкадр $E_j^{(s)}$ сегментується за однією, чи рядом якісних ознак.

У найпростішому випадку такою якісною ознакою може бути показник структурної подібності S_{str} фрагментів субкадру на рівні просторового або спектрального опису.

Дана ознака є найбільш доцільною в умовах необхідності прискорення роботи алгоритму як така, що відрізняється простотою реалізації та не потребує складних обчислень.

Процедура виявлення структурної подібності фрагментів субкадру базується на порівнянні найбільшої $\gamma(B'_{i,j}^{(k)})_{max}$ та найменшої $\gamma(B'_{i,j}^{(k)})_{min}$ довжин серій двійкових елементів, які було виявлено у межах α -го масиву $b(\alpha)_j^{(k)}$ i -ї та $(i+1)$ -ї трансформант субкадру, що у загальному вигляді демонструє наступний вираз:

$$S_{str} = (|\Delta\gamma_{max}^{(\alpha,i,j)}|; |\Delta\gamma_{min}^{(\alpha,i,j)}|), \quad (5.10)$$

де $|\Delta\gamma_{max}^{(\alpha,i,j)}|$ - різниця між максимальними довжинами серій двійкових елементів, виявлених у структурі k -х масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ i -ї та $(i+1)$ -ї трансформант субкадру, що визначається як

$$|\Delta\gamma_{max}^{(\alpha,i,j)}| = |\gamma(B'_{i,j}^{(k)})_{max} - \gamma(B'_{i+1,j}^{(k)})_{max}|,$$

$|\Delta\gamma_{min}^{(\alpha,i,j)}|$ - різниця між мінімальними довжинами серій двійкових елементів, виявлених у структурі k -х масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ i -ї та $(i+1)$ -ї трансформант субкадру, яка обчислюється за виразом

$$|\Delta\gamma_{min}^{(\alpha,i,j)}| = |\gamma(B'_{i,j}^{(k)})_{min} - \gamma(B'_{i+1,j}^{(k)})_{min}|.$$

Виявлення довжин $\gamma(B'_{i,j}^{(k)})$ двійкових серій здійснюється по кожному з масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$, з M -го до наймолодшого розрядів двійкового опису трансформанти, починаючи з двійкового елементу з координатами $(1,1)$ що

відповідає DC-компоненті. При цьому сканування елементів масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$ виконується за зигзаг-алгоритмом, стандартизованим для JPEG.

За результатами визначення величин S_{str} приймається рішення про ймовірну подібність трансформант $V'_{i,j}^{(k)}$ та $V'_{i+1,j}^{(k)}$, якщо абсолютна різниця значень пар величин $|\Delta\gamma_{\max}^{(k,i,j)}|$ та $|\Delta\gamma_{\min}^{(k,i,j)}|$ не перевищує деяке порогове значення $\Delta\gamma$ [8].

Для структурно подібних трансформант $V'_{i,j}^{(k)}$ та $V'_{i+1,j}^{(k)}$ буде застосовано однакову стратегію управління. Отже, таким чином величину Φ може бути зменшено.

Розглянутий підхід до скорочення кількості станів Φ алгоритму, та відповідно, збільшення його швидкодії, на прикладі кадру FullHD дозволяє:

1. Для найгіршого випадку, коли не виявлено жодної пари подібних трансформант, виключно за рахунок розбиття кадру на субкадри, що мають розмір рядка початкового кадру, забезпечити скорочення обсягу кількості станів Φ алгоритму (множини ймовірних управлінь) з 128^{32400} до 128^{240} , інакше кажучи, у 128^{32160} разів, а, отже, суттєво скоротити час обробки;
2. На той випадок, коли у межах субкадру половина трансформант визнана подібними за структурною ознакою S_{str} , що еквівалентно зменшенню субкадру до $1/2$ рядка вихідного кадру, кількість станів Φ алгоритму скорочується до 128^{120} , тобто, у 128^{32280} разів.

Окрім цього, поділ кадру E_j на множину $\{E_j^{(s)}\}$ субкадрів дозволяє організувати управління бітовою швидкістю кадру на базі ряду паралельних процесів, кожен з яких використовує суттєво нижчий ресурс обчислювальної потужності, ніж загальний процес для усього кадру.

Окрім пошуку структурно подібних фрагментів у межах субкадрів, для зменшення простору пошуку оптимальних управлінь може бути застосовано алгоритм, що використовує диференціацію трансформант за ознакою $V'_{i,j}^{(k)}$ інформативності.

Для прикладу розглянемо відеокадр (рис. 5.5).

Тут виділена зона А відповідає сукупності $\{B_{inf}\}$ фрагментів $V_{i,j}^{(k)}$, що належать кадру E_j , які мають найвищу семантичну значимість, тобто, є найбільш інформативними. З огляду на це, до даних фрагментів апріорі застосовується управління C_k , до потенційно не вносить значних рівнів помилки D , тим самим забезпечуючи цілісність інформативних ділянок реконструйованих відеоданих.

У контексті методу управління бітовою швидкістю відео потоку на базі динамічного програмування це означає, що до фрагментів, що формують множину $\{B_{inf}\}$, може бути застосовано єдине управління C_k , що веде до скорочення кількості станів Φ алгоритму.

Разом з тим, відносно фрагментів, що не належать до $\{B_{inf}\}$, але є подібними за показником $V_{i,j}^{(k)}$, також застосовується єдина модель управління.



Рисунок 5.5 – Приклад відеокадру, що містить фрагменти, які суттєво різняться за рівнем семантичної значимості

Для визначення рівню $V_{i,j}^{(k)}$ семантичної значимості виконується обчислення суми значень $\overline{\eta'(\ell)_{x,y}}$ елементів усередненого динамічного діапазону десяткових значень $\eta'(\ell)_{x,y}$ компонент яскравісної складової [13, 14]. У ході даної процедури фіксується найбільше значення компоненти $\eta'(\ell)_{x,y}^{(\max)}$, для якої розраховується ймовірна середня величина, тобто:

$$\overline{\eta'(\ell)_{x,y}} = \frac{\eta'(\ell)_{x,y}^{(\max)}}{2} \quad (5.11)$$

Інакше кажучи, якщо $\eta'(\ell)_{x,y}^{(\max)} = 255$, відповідно, $\overline{\eta'(\ell)_{x,y}} = 128$.

Далі, для визначеної величини $\overline{\eta'(\ell)_{x,y}}$ встановлюються межі динамічного діапазону усереднених значень компонент. Так, верхня межа обчислюється на базі наступного виразу:

$$\overline{\eta'(\ell)_{x,y}^{(\text{top})}} = \overline{\eta'(\ell)_{x,y}} + \omega \overline{\eta'(\ell)_{x,y}}, \quad (5.12)$$

де ω - коефіцієнт, що залежить від особливостей змісту відеокадру.

Аналогічно з (5.12) розраховується нижня межа, а саме:

$$\overline{\eta'(\ell)_{x,y}^{(\text{bottom})}} = \overline{\eta'(\ell)_{x,y}} - \omega \overline{\eta'(\ell)_{x,y}}, \quad (5.13)$$

На базі виразів (5.12) та (5.13), обчислюється величина $V_{i,j}^{(k)}$ за наступним співвідношенням:

$$V_{i,j}^{(k)} = \sum (\overline{\eta'(\ell)_{x,y}} | (\eta'(\ell)_{x,y} \in [\overline{\eta'(\ell)_{x,y}^{(\text{top})}}; \overline{\eta'(\ell)_{x,y}^{(\text{bottom})}}]) \quad (5.14)$$

За результатами визначення $\overline{V_{i,j}^{(k)}}$ уся множина трансформант $B_{i,j}^{(k)}$ може бути групована відповідно до різних рівнів градації значень $V_{i,j}^{(k)}$, які їм відповідають.

Таких рівнів градації може бути декілька.

При цьому, для трансформант, яким відповідають найвищі рівні градації $V_{i,j}^{(k)}$, застосовується спільне управління C_k , що не веде до усичення жодного масиву $b(\alpha)_j^{(k)}$. Відповідно, з пониженням $V_{i,j}^{(k)}$ зростає кількість масивів, $b(\alpha)_j^{(k)}$, що підлягають виключенню у ході управління. За рахунок цього величина Φ скорочується.

Розглянемо приклад, коли діапазон значень $V_{i,j}^{(k)}$ отриманих для субкадру, умовно ділиться на три рівні за діапазоном значень $V_{i,j}^{(k)}$.

При цьому:

- трансформанти, для яких $V_{i,j}^{(k)}$ найвищі, надсилаються з незмінною кількістю утворюючих їх масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$;
- трансформанти середнього рівня градації $V_{i,j}^{(k)}$ підлягають процедурі усичення масивів $b(\alpha)_j^{(k)}$, що відповідають 5 молодшим розрядам їх двійкового опису;
- трансформанти нижнього рівня виключаються з розгляду та не беруть участі у процесі побудови управлінь для субкадру.

Використо розрахунок продуктивності розглянутого підходу до скорочення Φ .

Для цього припустимо, що:

- 33% трансформант віднесено до нижчого рівня градації значень $V_{i,j}^{(k)}$;
- 33% трансформант визнано як такі, що належать середньому рівню;
- 50% трансформант першого та другого рівня градацій $V_{i,j}^{(k)}$ є структурно подібними.

Тоді для субкадру, рівному за розмірами рядку кадру з роздільною здатністю FullHD, кількість станів алгоритму Φ буде визначатися як:

$$W = (2^3)^{\Pi} + (2^M)^I, \quad (5.15)$$

де Π та I - відповідно, обсяг трансформант, що належать другому та, відповідно, першому рівню градації.

Отже, для розглядуваного прикладу маємо $W = (2^3)^{80} + (2^8)^{80} = 2^{240} + 2^{640}$;

Водночас, для випадку субкадру, що має розмір 1/2 рядку FullHD-кадру, величина Φ , відповідно до (5.15), обчислюється як: $\Phi = (2^3)^{40} + (2^8)^{40} = 2^{120} + 2^{320}$.

Тобто, у такий спосіб забезпечується додаткове скорочення величини Φ .

Нарешті, для випадку, коли субкадр формується на базі 6 фрагментів $B_{i,j}^{(k)}$ кадру E_j Розглянемо далі розподіл початкового кадру F на підкадри F_{sub} розміром 6 фрагментів кожен. У цьому разі кількість станів Φ алгоритму для найгіршого випадку буде рівною 2^{48} .

У той же час за умови, що для субкадру означеного розміру буде застосовано алгоритми розподілу трансформант за ознаками структурної подібності та групування за рівнями градації семантичної значимості, може бути забезпечено скорочення величини Φ до значення $\Phi = (2^2)^2 + (2^8)^2 = 2^4 + 2^{16}$.

Отримана величина Φ дозволяє реалізувати розглянутий алгоритм управління бітовою швидкістю відео потоку на базі динамічного програмування на базі сучасних апаратно-програмних платформ загального призначення.

ВИСНОВКИ

За технічним завданням до виконання атестаційної роботи було необхідно:

- розглянути особливості формування трафіку у сучасних мережах;
- визначити проблематику, пов'язану з необхідністю забезпечення якості мережевих відеосервісів;
- обґрунтувати необхідність управління динамікою бітової швидкості відео на рівні джерела;
- дослідити метод управління бітовою швидкістю відео потоку з забезпеченням оптимальної якості та підходи, спрямовані на підвищення його швидкодії;
- виконати розрахунки ймовірної кількості станів алгоритму для випадку застосування методів підвищення швидкодії методу управління та без них.

У рамках розв'язання першого завдання було визначено наступне:

1. Трафік сучасних мереж характеризується високим рівнем неоднорідності, що є характерним для сервісів більшості типів.
2. Неоднорідність трафіку спричинена:
 - суттєвим динамічним діапазоном величин пакетів, що його формують;
 - різними рівнями пріоритетності пакетів трафіку різних типів;
 - високим рівнем інтегрованості загального інформаційного потоку.
3. Спостерігається постійний ріст бітових швидкостей даних у мережі, який перевищує темпи збільшення пропускної спроможності, що є причинами виникнень мережевих колізій.
4. Найбільший відсоток у загальному інформаційному потоці належить відео сервісам.

Отже, шляхом скорочення обсягу пакетів відеоданих, що надходять у мережу, може бути забезпечено зменшення мережевого навантаження, що тією чи іншою мірою сприяє збільшенню якості сервісів інших типів.

Разом з тим, скорочення обсягу пакетів відеоданих у загальному випадку спричинює падіння якості надання відео сервісів, а відтак –

необхідно одночасно враховувати залежність між ступенем зменшення бітової швидкості відео та рівнем помилки, яка при цьому вноситься.

Показано, що підходи на базі використання технологій компресії відео не враховують характер динаміки відеотрафіку, та його зміни відносно змін пропускної спроможності мережі. Тобто, доцільним є застосування методів балансування означених величин.

Разом з тим, як свідчить аналіз ряду розглянутих стандартизованих підходів, зокрема, таких, що утілено у рамках технологій ABR та SRC, застосування їх обмежено у зв'язку з характерними для них недоліками, серед яких наступні:

- висока обчислювальна складність у випадку функціонування у реальному часі, та нераціональне використання об'єму пристроїв зберігання у випадку відеохостингу (для ABR);
- обмеженість діапазону застосовуваності певними роздільними здатностями кадру та бітовими швидкостями (SRC);
- неможливість гнучкої зміни кроку скорочення бітової швидкості у ході управління;
- внесення суттєвих рівнів помилки у ході управління (SRC).

Обгрунтовано, що у даних умовах для забезпечення найбільш суттєвого рівня скорочення мережевого навантаження за рахунок зменшення обсягу трансльованих пакетів відеоданих з одночасним дотриманням якості сервісів на потрібному рівні необхідно здійснювати управління бітовою швидкістю за бімінімальним сценарієм.

Бімінімальний сценарій передбачає кодування структурних фрагментів відеопотоку з максимальним скороченням обсягу біт, задіяних для їхнього опису, наскільки це можливо в умовах мінімізації помилки, яка при цьому вноситься.

У рамках реалізації бімінімального сценарію розглянуто підхід до його реалізації у базисі прогресивного алгоритму JPEG за схемою ітераційного наближення.

При цьому, математичною основою для виконання управління бітовою інтенсивністю у зазначеному базисі використовується метод динамічного програмування. Доведено, що даний метод забезпечує реалізацію бімінімального сценарію.

Разом з тим, методу властивий недолік, що полягає у тому, що управляюче рішення виробляється у ході повного перебору можливого простору рішень. Це спричинює суттєве зростання кількості станів алгоритму зі збільшенням розміру кадру та кількості розрядів для його опису за ступеневим законом. Зокрема, для кадру з роздільною здатністю 2К (FullHD) результуюча кількість станів алгоритму є такою, що обробка у реальному часі не може бути реалізована.

Для усунення даного недоліку може бути використано:

- поділ вихідних кадрів відео потоку на субкадри;
- виявлення у межах субкадрів структурних фрагментів, що є подібними за структурними особливостями та семантичною значимістю.
- застосуванні однакового локального управління для фрагментів субкадрів, що є подібними за однією або обома ознаками.

У наслідок цього забезпечується скорочення кількості ймовірних станів алгоритму до величини, що дозволяє використовувати розглянутий метод управління бітовою швидкістю відеопотоку на базі неспеціалізованих апаратно-програмних платформ.

Отже, усі завдання виконано у повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. VNI Forecast Highlights Tool [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights.html
2. Video quality testing in mobile networks | Rohde & Schwarz [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.rohde-schwarz.com/solutions/test-and-measurement/mobile-network-testing/expertise/video-quality-testing/video-quality-testing_232054.html?change_c=true
3. New Open Industry Standard Introduced for Connecting Next-Generation VR Headsets to PCs, Other Devices [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/07/17/1538342/0/en/New-Open-Industry-Standard-Introduced-for-Connecting-Next-Generation-VR-Headsets-to-PCs-Other-Devices.html>
4. Milestone Content Portal [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://content.milestonesys.com/media/?mediaId=03F1B94C-5A2B-4031-870A431B57382C4D>
5. For Self-Driving Cars, There’s Big Meaning Behind One Big Number: 4 Terabytes [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://newsroom.intel.com/editorials/self-driving-cars-big-meaning-behind-one-number-4-terabytes/>
6. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 958 с.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1073 с.
8. Качество обслуживания в операторских сетях [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.opennet.ru/docs/RUS/qos_oper/
9. Кругль Г. Профессиональное видеонаблюдение. Практика и технологии аналогового и цифрового ССТV / Герман Кругль. – 2-е изд. пер. с англ. – М.: Секьюрити Фокус, 2011. – 640 с.
10. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. – М.: Вузовская книга, 2011. – 320 с.
11. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М. : ДИАЛОГ – МИФИ, 2003. – 384 с.

12. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано. пер. с англ. – М. : Триумф, 2003. – 336 с.
13. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический поход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 992 с
14. Чемпен Н., Чемпен Д. Цифровые технологии мультимедиа. – М.: Вильямс, 2006. – 624 с.
15. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
16. Ричардсон Ян. H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-Generation Multimedia / Ян Ричардсон. – Город. : Издательство, 2005. – 368 с.
17. Shi, Yun Q. Image and video compression for multimedia engineering: fundamentals, algorithms, and standards / Yun Q Shi, Huifang Sun.
18. Video encoding in the cloud | Telestream Cloud [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.telestream.net/telestream-cloud/adaptive-bitrate-encoding.htm>
19. Беляев Е.А, Тюрликов А.М. Управление скоростью и ошибкой кодирования в системе сжатия и передачи видеоинформации с ограничениями на память передающего и принимающего устройств // Компьютерная оптика. 2007. - Т.31. №2. С.69-76.
20. Беллман Р., Енджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.:Мир, 1974.
21. Зайченко О.Ю., Зайченко Ю.П., Дослідження операцій. К.: Слово, 2007. – 427 с.
22. Мартинюк О.М., Попіна С.Ю., Елементи комбінаторики й класичне означення ймовірності. Тернопіль, 2003. – 40 с.