

УДК 621.39

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ОПЕРАТИВНОГО ДОВЕДЕННЯ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ КОДУВАННЯ ПРОГНОЗОВАНИХ КАДРІВ

Р. І. Акімов

Харківський університет Повітряних Сил

barannik_v_v@mail.ru

Показано, що на ефективність функціонування транспорту, а саме якості надання послуг з транспортування пасажирів і вантажів, впливають системи об'єктивного контролю. Виявлено проблематику, зумовлену наявністю суперечності: з одного боку, це вимога щодо підвищення оперативності та достовірності надання відеоінформації, що веде до збільшення їх обсягів, а з іншого — обмежені пропускні здібності і швидкодія віддалених вузлів збору відеоінформації, яка призводить до обмеженої продуктивності технологічної складової. Здійснено обґрунтування варіанта підвищення ступеня стиснення відеоінформаційного потоку в інфокомунікаційних системах в умовах забезпечення заданої достовірності інформації на основі скорочення тимчасової надлишковості на основі виявлення межкадрових апертур. Викладено основні компоненти розробки технології кодування пакета прогнозованих кадрів на базі формування коду позиційним числом. Побудовано аналітичні вирази для оцінки максимальної кількості двійкових розрядів для представлення пакета прогнозованих кадрів.

Ключові слова: об'єктивний контроль, оперативність доведення інформації, достовірність інформації, кодування прогнозованих кадрів, міжкадрова апертура.

It is shown that the crucial role on efficiency of functioning of transport, namely quality of rendering of services on transportations of passengers and loads, is rendered by systems of objective monitoring. The perspective which is dictated by existence of a contradiction comes to light: on the one hand this requirement concerning increase of efficiency and reliability of provision of video information that carries to increase in their volumes, and on the other hand limited carrying capacities and high-speed performance of remote sites of collection of video information that leads to the limited productivity of a technological component. Reasons for option of increase of a compression ratio of a video information flow in infocommunication systems in the conditions of support of the given reliability of information on the basis of abbreviation of temporal redundancy on the basis of detection of interframe apertures are carried out. Principal components of development of technology of coding of a packet of the predicted frames on the basis of formation of a code are explained to positional numbers. Analytical expressions for an assessment of the maximum quantity of binary places on representation of a packet of the predicted frames are built.

Keywords: objective monitoring, efficiency of finishing information, reliability of information, coding of the predicted frames, an interframe aperture.

Вступ

Підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту пов'язане з поліпшенням якості контролю за станом і переміщенням вантажів.

Вирішальну роль мають системи об'єктивного контролю. У свою чергу, основна інформація для таких систем надходить на основі відеоінформаційних датчиків. Така ситуація характеризується наявністю актуальної проблематики досліджень, яка зумовлюється наявністю суперечності.

З одного боку, це вимога щодо підвищення оперативності та достовірності надання відеоінформації, що веде до збільшення їх обсягів, з ін-

шого — обмежені пропускні здібності і швидкодія віддалених вузлів збору відеоінформації, що призводить до обмеженої продуктивності технологічної складової.

Тому пропонується розвивати технології кодування відеоінформаційного потоку.

Розглянемо структуру відеопотоку.

В існуючих технологіях компресії, таких як: MPEG-2, MPEG-4 використовується кадровий принцип обробки. Вся послідовність кадрів розбивається на три типи [1–3]. Кадри першого типу (I-кадри, опорні) стискаються на основі внутрішньокадрової обробки. Кадри другого типу (P-кадри, передбачені) стискаються з використанням попередніх I- або P-кадрів. Кадри третьо-

го типу (*B*-кадри) стискаються з використанням двонаправленого передбачення, тобто із залученням попередніх і наступних *I*- і *P*-кадрів. Максимальні спотворення відбуваються на етапі обробки *B*-кадрів. Тому найбільший інтерес становлять технології кадрової обробки перших двох типів. Звідси одним із варіантів подальшого вдосконалення технологій компресії у напрямку підвищення ступеня компресії в умовах забезпечення заданої цілісності відеоінформації є розробка методів кодування *P*-кадрів.

Отже, мета досліджень полягає в обґрунтуванні і побудові технології кодування прогнозованих кадрів.

Розробка технології кодування прогнозованих кадрів

Стиснення *P*-кадрів досягається на основі скорочення двох видів надлишковості, а саме: просторової і тимчасової. Скорочення просторової надлишковості досягається кодуванням з перетворенням. Для зменшення тимчасової надлишковості використовується кодування з прогнозуванням і блоковою компенсацією руху. Дані особливості, зокрема наявність подібності у сусідніх кадрах, у відеопослідовності дає змогу додатково збільшувати ступінь стиснення *P*-кадрів щодо опорних кадрів. Отже, на ефективність усієї системи стиснення значно впливають передбачені кадри (*P*-кадри). Кількість *P*-кадрів у відеопослідовності може бути або фіксованою частотою, або визначатися автоматично за складністю відеоряду. При цьому, чим більша кількість *P*-кадрів використовується у відеопослідовності, тим

вищий ступінь стиснення в цілому. Однак існуючі технології кодування прогнозованих кадрів мають ряд недоліків. Перший недолік полягає в тому, що зі зростанням кількості прогнозованих кадрів різко знижується якість зображення. Це потребує використання механізму контролю за помилками. Помилка в одному блоці пошириться на всю групу наступних *P*-кадрів. Другий недолік пов'язаний з використанням у сучасних алгоритмах стиснення трансформованих зображень статистичних методів, заснованих на кодуванні Хаффмана. Тут існують такі недоліки, як висока чутливість до помилок, необхідність у буферному накопичувачі, неможливість визначити ступінь стиснення до початку кодування, великі затримки при побудові кодового дерева для відеопослідовностей, які містять велику кількість кадрів. Тому потрібно вдосконалювати технології обробки прогнозованих кадрів із заданим рівнем достовірності.

Один з таких напрямків полягає в описі послідовності прогнозованих кадрів (рис. 1) на основі виявлення міжкадрових апертур.

Під міжкадровою апертурою розуміється послідовність із такими властивостями: елементи, розташовані в пакеті *P*-кадрів на однакових позиціях; значення елементів знаходяться в межах обмеженого динамічного діапазону.

Отже, апертура містить не тільки рівні між собою елементи, але й елементи, чий значення відрізняються незначно. Допуск на діапазон відхилення значень елементів апертури визначається її висотою (рис. 2).

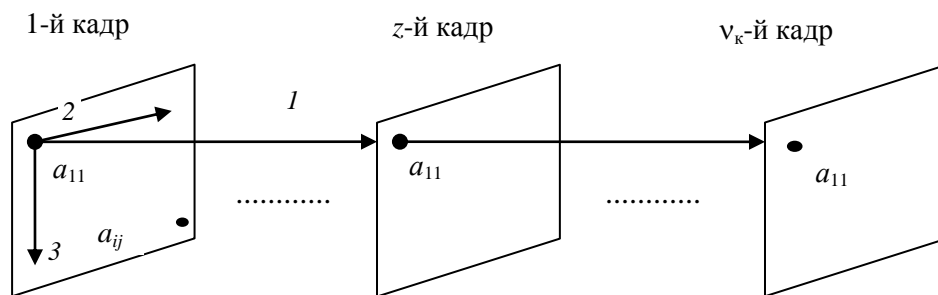


Рис. 1. Послідовність *P*-кадрів:

l — шлях, що усуває міжкадрову надлишковість; 2, 3 — шлях порядкової розгортки.

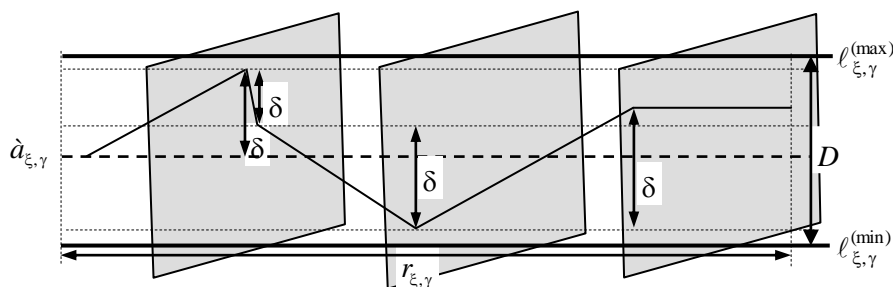


Рис. 2. Схема формування міжкадрової апертури

Характеристиками міжкадрової апертури є:

– висота $D_{\xi,\gamma}$ апертури для $(\xi;\gamma)$ -ї послідовності, обумовлена як різниця між верхнім $\ell_{\xi,\gamma}^{(max)}$ та нижнім $\ell_{\xi,\gamma}^{(min)}$ значеннями динамічного діапазону в послідовності елементів прогнозованих кадрів

$$D_{\xi,\gamma} = \ell_{\xi,\gamma}^{(max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(min)},$$

де $\ell_{\xi,\gamma}^{(min)}$, $\ell_{\xi,\gamma}^{(max)}$ — значення відповідно нижньої та верхньої меж діаметра $(\xi;\gamma)$ -ї апертури; довжина $r_{\xi,\gamma}$ апертури, що обчислюється як кількість підряд розташованих елементів, для яких виконується умова $a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(max)}]$,

$\tau=0, r_{\xi,\gamma}-1$; початковий елемент $a_{\xi,\gamma}$ міжкадрової апертури, відносно якої здійснюється визначення величин $\ell_{\xi,\gamma}^{(min)}$ та $\ell_{\xi,\gamma}^{(max)}$, тобто

$$\ell_{\xi,\gamma}^{(max)} = a_{\xi,\gamma} + D_{\xi,\gamma} / 2;$$

$$\ell_{\xi,\gamma}^{(min)} = a_{\xi,\gamma} - D_{\xi,\gamma} / 2.$$

Позначимо $A^{(\xi,\gamma)}$ як послідовність елементів прогнозованих кадрів, що належать апертурі, де

$$A^{(\xi,\gamma)} = \{a(0)_{\xi,\gamma}, a(1)_{\xi,\gamma}, \dots, a(r_{\xi,\gamma})_{\xi,\gamma}\},$$

$$a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(max)}], \tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}.$$

Обхід елементів усередині прогнозованого кадру для виявлення чергової міжкадрової апертури проілюстровано на рис. 3.

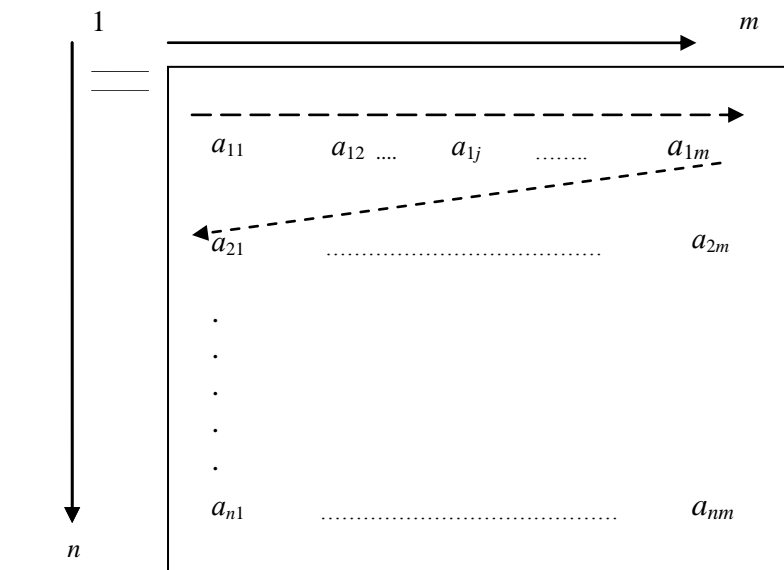


Рис. 3. Схема обходу елементів P-кадру:
 ————— напрямок обходу рядків для виявлення однакових елементів

По закінченні обробки елемента a_{m_j} для τ -го кадру процес виявлення міжкадрових апертур (AM) триває з елемента $a_{1,j+1}$, розташованого на позиції $(1; j+1)$ першого кадру (рис. 3).

Водночас відомі технології щодо формування та кодового представлення апертур мають два таких суттєвих недоліки:

1. Формування апертур, як правило, організується в режимі заздалегідь заданої висоти, і отже, нерівномірної довжини.

Залежність нерівномірної довжини апертури від ступеня когерентності фрагментів зображень призводить до: зниження перешкодостійкості; підвищення часу на стискання у разі обробки високонасичених реалістичних зображень; зменшення стиснення для зображень з високою концентрацією різких змін кольору (як-

равості), обумовлене скороченням довжин апертур та збільшенням значень їх висот.

2. Обробка апертур базується на методах з безповоротною втратою інформації. Наприклад, опис апертури її довжиною, опис апертури коефіцієнтами апроксимуючої функції.

Підходи відносно організації усунення надлишковості зображень на основі виявлення апертур розрізняються залежно від функції, яка описує елементи, належать апертурі [*генеруючої апертурної функції (ФАГ)*].

У першому випадку забезпечується обробка з внесенням апроксимуючих викривлень у передбачені кадри, тобто усувається психовізуальна та статистична надлишковість.

Генеруюча апертурна функція $f'_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)})$ будується на основі апроксимації елементів послідов-

ності $\dot{A}^{(\xi,\gamma)}$ в умовах, коли для висоти апертури виконується умова $D_{\xi,\gamma} \geq 1$. Тоді в загальному випадку відбувається невідповідність між вихідним і реконструйованим знаннями міжкадрової апертури, тобто $\dot{a}'(\tau)_{\xi,\gamma} \neq \dot{a}(\tau)_{\xi,\gamma}$; $\dot{a}'(\tau)_{\xi,\gamma} \in \overline{A}^{(\xi,\gamma)}$, $\tau = \overline{0, r_{\xi} - 1}$, де $\dot{A}^{(\xi,\gamma)}$, $\overline{A}^{(\xi,\gamma)}$ — послідовності елементів, що відповідають вихідній апертурі та апертурі, отриманій на основі генеруючої функції $f'_a(\dot{A}^{(\xi,\gamma)})$:

$$\overline{A}^{(\xi,\gamma)} = f'_a(\dot{A}^{(\xi,\gamma)}).$$

Тут $\dot{a}_{\xi,\gamma}$, $\dot{a}'_{\xi,\gamma}$ — (ξ,γ) -і елементи, що належать відповідно міжкадровим послідовностям $\dot{A}^{(\xi,\gamma)}$ та $\overline{A}^{(\xi,\gamma)}$.

Компактне представлення, тобто виконання умови $W(P_a) < W(\dot{A}^{(\xi,\gamma)})$ досягається за рахунок того, що формуються параметри P_a генеруючої функції $f'_a(\dot{A}^{(\xi,\gamma)})$ які потребують меншої кількості біт $W(P_a)$, ніж бітовий обсяг вихідної апертури $W(\dot{A}^{(\xi,\gamma)})$.

Якщо, коли потрібно мінімізувати апроксимуючі викривлення, побудова генеруючої апертурної функції пов'язана зі значними обчислювальними витратами.

Найменші часові витрати на реалізацію першого підходу досягаються якщо апроксимуюча функція будується як середнє значення $\bar{a}_{\xi,\gamma}$ за елементами міжкадрової апертури $f'_a(\dot{A}^{(\xi,\gamma)}) = \bar{a}_{\xi,\gamma}$, а саме

$$\bar{a}_{\xi,\gamma} = \left(\sum_{\tau=0}^{r_{\xi}-1} \dot{a}(\tau)_{\xi,\gamma} \right) / r_{\xi,\gamma}.$$

Недолік такого підходу полягає в тому, що не забезпечується контрольований характер апроксимуючих викривлень.

Навпаки мінімізація таких викривлень потребує використання значних обчислювальних ресурсів. Реалізація останнього рішення обмежується відносно низькою швидкістю апаратури дистанційного об'єктивного контролю на ЖД транспорті.

Залежність коефіцієнта стиснення k_c від ступеня h внесених викривлень у процесі виявлення апертур у послідовності прогнозованих кадрів наведено на рис. 4.

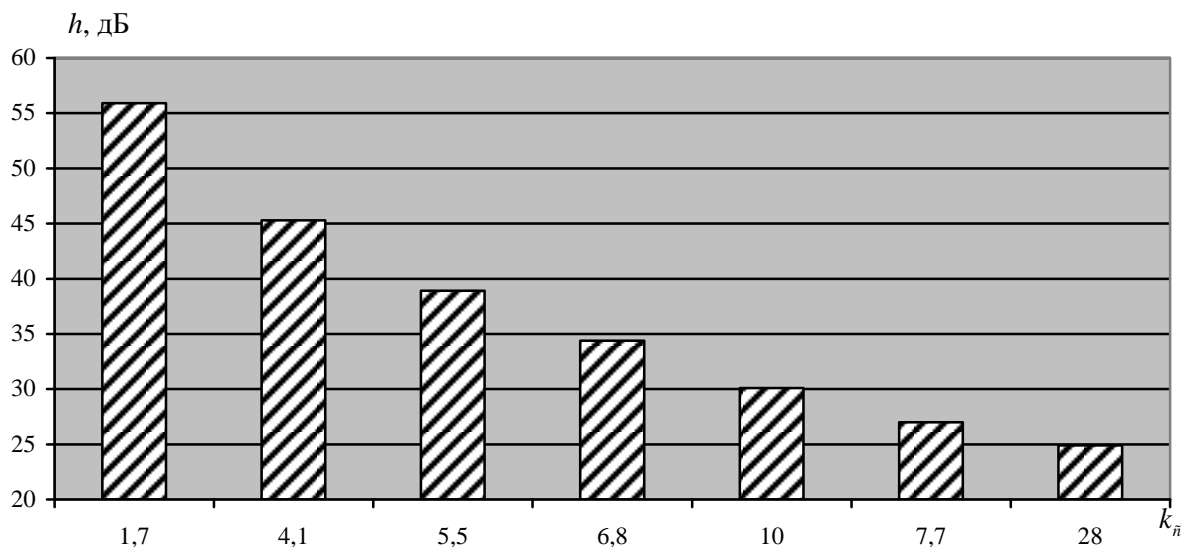


Рис. 4. Залежність k_c від h для пакета передбачених кадрів

Оцінювання проводилось для $\tau=8$. На обробку надходив відеопотік, що відповідав режиму роботи стаціонарної камери у процесі проходження залізничного поїзда з вантажем.

У результаті дослідження залежності у вигляді діаграм на рис. 4 можна зробити висновок, що рівень стиснення знаходиться в суттєвій залежності від ступеня апроксимуючих викривлень, які оцінюються через пікове відношення сигнал/шум h . Ступінь компресії в режимі отри-

мання достовірної інформації знаходиться на рівні, що не перевищує чотирьох разів. Отже, ефективність обробки прогнозованих кадрів на основі виявлення міжкадрових апертур різко знижується для режиму забезпечення цілісності відеоінформації. У разі наявності у послідовності кадрів різних змін сюжетів відбувається падіння ступеня стиснення додатково на 50–70%.

Обмежена можливість щодо забезпечення обробки пакетів P -кадрів заданої довжини на осно-

ві виявлення міжкадрових апертур у режимі заданої цілісності відеоінформації зумовлена відсутністю механізмів компенсації:

1) підвищення інформативності, яка викликає різким зростанням висоти апертури, відповідного випадку зміни сюжету кадру. Тоді $D_{\xi,\gamma} \rightarrow 2^b$, та відповідно $k_n \rightarrow 1$;

2) наявності додаткової структурної надлишковості, зумовленої відсутністю неоднорідних за сюжетом кадрів зображень. У цьому випадку довжина міжкадрової апертури дорівнюватиме довжині пакета P -кадру.

Для другого підходу побудову генеруючої апертурної функції пропонується організувати на базі використання позиційних систем. У цьому випадку функція $f_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)})$ створюється для таких умов:

$$D_{\xi,\gamma} \geq 1 \text{ і } x(\tau)_{\xi,\gamma} \neq x(\tau+1)_{\xi,\gamma},$$

$$a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}], \quad \tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}; \quad (1)$$

$$h \geq h_{\text{од}}. \quad (2)$$

Особливість апроксимації на основі використання позиційних систем полягає в тому, що вся міжкадрова апертура $\hat{A}^{(\xi,\gamma)}$, яка складається із $r_{\xi,\gamma}$ елементів, замінюється її кодом-номером $N(r_{\xi,\gamma})$ у допустимій множині $\Psi(r_{\xi,\gamma})$. Визначимо обсяг множини $\Psi(r_{\xi,\gamma})$ як $V(r_{\xi,\gamma})$. Тоді послідовність $A^{(\xi,\gamma)} = \{a(0)_{\xi,\gamma}, a(1)_{\xi,\gamma}, \dots, a(r_{\xi,\gamma})_{\xi,\gamma}\}$ належить множині $V(r_{\xi,\gamma})$, тобто $A^{(\xi,\gamma)} \in V(r_{\xi,\gamma})$, якщо виконуються обмеження $a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}] \quad \tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}$. Представлення міжкадрової апертури на основі запропонованого підходу в режимі без втрати інформації подається таким виразом $N(r_{\xi,\gamma}) = f_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)}; D_{\xi,\gamma}; r_{\xi,\gamma})$, так, що для $\tau = \overline{0, r_{\xi,\gamma} - 1}$:

- 1) $a(\tau)_{\xi,\gamma} \in [\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}; \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}]$;
- 2) $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} \neq \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}$ та $a'(\tau)_{\xi,\gamma} = a(\tau)_{\xi,\gamma}$.

Тут $a(\tau)_{\xi,\gamma}, a'(\tau)_{\xi,\gamma}$ — (τ) -і елементи, які належать відповідно вихідній та відновленій $(\xi; \gamma)$ -й міжкадровій апертурі.

Умова, задана співвідношенням (1), означає зняття обмежень на процес виявлення апертури. Співвідношення (2) визначає режим обробки пакета P -кадрів з контрольованими апроксимуючими викривленнями.

Отже, потрібно синтезувати функцію $f_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)}; D_{\xi,\gamma}; r_{\xi,\gamma})$ для представлення міжкадрової

апертури $\hat{A}^{(\xi,\gamma)}$ так, щоб забезпечити виконання умови $N(r_{\xi,\gamma}) = f_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)}; D_{\xi,\gamma}; r_{\xi,\gamma}) \rightarrow \min$ за таких обмежень:

$$\begin{cases} r_{\xi,\gamma} = \text{const}; \\ D_{\xi,\gamma} = \text{var} \ \& \ D_{\xi,\gamma} \geq 1; \\ h \geq h_{\text{од}}; \\ v_{\bar{n}}^{(\phi)}, v_r^{(\phi)} = O(r). \end{cases}$$

Для синтезу генеруючої апертурної функції в заданих умовах зауважимо, що значення елементів апертури знаходяться в обмеженому динамічному діапазоні $\ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} \leq \hat{a}(\tau)_{\xi,\gamma} \leq \ell_{\xi,\gamma}^{(\max)}$. Звідси впливає таке:

1) генеруюча апертурна функція на основі кода-утворюючого виразу для позиційного числа (ПЧ) набуде вигляду:

$$f_a(\hat{A}^{(\xi,\gamma)}) = \sum_{\tau=0}^{r_{\xi,\gamma}-1} \hat{a}(\tau)_{\xi,\gamma} v(\tau)_{\xi,\gamma},$$

де $v(\tau)_{\xi,\gamma}$ — ваговий коефіцієнт (τ) -го елемента $(\xi; \gamma)$ -го ПЧ

$$v(\tau)_{\xi,\gamma} = \left(\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} \right)^{r_{\xi,\gamma} - (\tau) - 1};$$

2) кількість $V^{(\xi,\gamma)}$ різних міжкадрових апертур довжиною $r_{\xi,\gamma}$, яку можна скласти на основі формування різних ПЧ, що дорівнює $V^{(\xi,\gamma)} = \left(\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)} \right)^{r_{\xi,\gamma}}$;

3) максимальний обсяг цифрового опису апертури на основі кода-утворюючої функції ПЧ оцінюється за формулою

$$\log_2 V^{(\xi,\gamma)} = r_{\xi,\gamma} \left(\lceil \log_2 (\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}) \rceil + 1 \right).$$

Звідки сумарний обсяг на представлення міжкадрових апертур, виявлених для всього пакета P -кадрів, на основі формування коду для позиційного числа в режимі змінної апертури буде дорівнювати

$$W = W_{in} + W_{cl}$$

або

$$W = \sum_{\xi=1}^{Q_l} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} \log_2 V^{(\xi,\gamma)} + \sum_{\xi=1}^{Q_l} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} \log_2 r_{\xi,\gamma} =$$

$$= \sum_{\xi=1}^{Q_l} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} r_{\xi,\gamma} \left(\lceil \log_2 (\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}) \rceil + 1 \right) + \sum_{\xi=1}^{Q_l} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} \log_2 r_{\xi,\gamma},$$

де W_{in}, W_{cl} — сумарні обсяги цифрового представлення відповідно для елементів міжкадрових апертур, що описуються на основі обраної ФАГ, і для опису довжин апертур.

Якщо довжина міжкадрової апертури фіксована і дорівнює r , то останній вираз набуде такого вигляду:

$$W = \sum_{\xi=1}^{Q_1} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} r \left(\left\lceil \log_2 (\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}) \right\rceil + 1 \right) + \sum_{\xi=1}^{Q_1} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} \log_2 D_{\xi,\gamma}.$$

Тут $\sum_{\xi=1}^{Q_1} \sum_{\gamma=1}^{Q_c} \log_2 D_{\xi,\gamma}$ — кількість розрядів на представлення інформації для висот міжкадрових апертур.

Аналізуючи отримане співвідношення з урахуванням того, що виконується нерівність $b \geq \left(\left\lceil \log_2 (\ell_{\xi,\gamma}^{(\max)} - \ell_{\xi,\gamma}^{(\min)}) \right\rceil + 1 \right)$, де величина b є кількість розрядів, що відводиться на представлення вихідних елементів, можна зробити висновок: сумарний бітовий обсяг пакета P -кадрів на основі побудови ФАГ, що базується на позиційному описі, не перевищуватиме сумарний цифровий обсяг до виявлення міжкадрових апертур.

Висновки

1. Обґрунтовано, що варіантом підвищення ступеня стиснення відеоінформаційного потоку в інфокомунікаційних системах в умовах забезпечення заданої достовірності інформації є скорочення тимчасової надлишковості на основі виявлення міжкадрових апертур.

2. Розроблено технологію кодування пакета P -кадрів на основі формування коду позиційним числом, сформованим для міжкадрових апертур.

3. Отримано аналітичні вирази для оцінки максимальної кількості двійкових розрядів на представлення пакета P -кадрів.

У результаті цього показано, що сумарний бітовий обсяг пакета P -кадрів на основі побудови ФАГ, що базується на позиційному описі, не перевищуватиме сумарний цифровий обсяг до виявлення міжкадрових апертур.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео* / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. — М. : Диалог-Мифи, 2003. — 381 с.
2. *Ричардсон Ян. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения* / Ян Ричардсон. — М. : Техносфера, 2005. — 368 с.
3. *Баранник В. В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах* / В. В. Баранник, В. П. Поляков. — Х. : ХУПС, 2010. — 212 с.
4. *Баранник В. В. Методологические принципы представления апертур во множестве одномерных двухосновных позиционных чисел* / В. В. Баранник, Д. С. Кальченко // АСУ и приборы автоматики. — 2011. — Вып. 155. — С. 15–22.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2014.