

Лекції «Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи»

Тема 7. Кодування та стиснення вимірювальної інформації у комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах

1. Застосування методів кодування і стиснення двовимірних сигналів до відеозображень з вимірювальною інформацією

Вимірювання поточних координат та параметрів руху об'єктів вимагають отримання часових послідовностей відеозображень з високою частотою кадрів. Це приводить до необхідності реєстрації в реальному часі дуже великого об'єму цифрової відеоінформації, що неможливо навіть для сучасних технічних засобів. Тому актуальною задачею є стиснення (зменшення об'єму цифрових даних) часових послідовностей відеозображень на основі методів їх комп'ютеризованої обробки та оцінка впливу такого стиснення на точність вимірювання поточних координат та параметрів руху об'єктів.

Існуючі методи визначення похибок відеоінформації на стиснутих відеозображеннях орієнтовані на оцінку візуальної якості відеозображення при його спостереганні людиною і не придатні для визначення точності вимірювань механічних величин.

Тому в даному розділі розглянуто можливість застосування стиснення до часових послідовностей відеозображень, що формуються з метою визначення геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів.

Для вирішення цього питання:

– отримано математичну модель, яка дозволяє оцінити точність результатів вимірювань механічних величин в залежності від параметрів алгоритмів стиснення часових послідовностей відеозображень;

– визначено параметри алгоритмів стиснення, які забезпечують підвищення точності вимірювань механічних величин за рахунок фільтрації шумів, що виникли в процесі формування часових послідовностей відеозображень.

Можливість стиснення часових послідовностей відеозображень ґрунтується на наявній надлишковості цифрових даних, що описують яскравість та колір цих відеозображень. Розрізняють декілька видів надлишковості цифрових даних відеозображень:

- статистична надлишковість, що обумовлена властивостями відеозображень як джерела цифрових двійкових даних і може бути виключена методами статистичного кодування цих даних на основі ентропійного підходу до опису відеозображень;

- просторова та часова надлишковість, обумовлена сильними кореляційними залежностями між цифровими даними про яскравість і колір сусідніх точок цифрового відеозображення та сусідніх відеозображень у часовій послідовності;

- психофізична надлишковість, обумовлена наявністю у описі відеозображення цифрових даних (наприклад, таких, що відповідають дрібним деталям об'єктів), які не можуть бути сприйняті людиною через обмеження її зору;

Відповідно до цього розрізняють:

- стиснення відеозображень без втрат відеоінформації про її зміст та наявні об'єкти, що використовує перші два види надлишковості;

- стиснення з втратами відеоінформації, що використовує третій вид надлишковості цифрових даних відеозображення.

Стиснення без втрат відеоінформації при окремому його застосуванні до часових послідовностей відеозображень не може забезпечити потрібних значень коефіцієнту стиснення (коефіцієнту зменшення об'єму цифрових даних відеозображення, тобто відношення об'єму цифрових даних нестиснутого відеозображення до об'єму цифрових даних стиснутого відеозображення). Тому таке стиснення може використовуватися тільки як складова частина більш складних методів стиснення відеозображень з втратами частини відеоінформації.

Стиснення з втратами частини відеоінформації може забезпечити потрібні коефіцієнти стиснення часових послідовностей відеозображень у декілька десятків та сотень разів, але при цьому виникають похибки відеоінформації на відеозображеннях, відновлених після стиснення. Допустима величина цих похибок визначається потрібною візуальною якістю відновлених відеозображень при їх спостереганні людиною (застосування стиснутих відеозображень у мультимедійних системах, телебаченні, базах даних тощо) або допустимими похибками визначення геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів (застосування стиснутих відеозображень у інформаційно-вимірювальних системах та інших подібних технічних системах).

Використання відеозображень для вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів містить певне протиріччя. Воно полягає у тому, що підвищення точності визначення цих параметрів вимагає більшої розподільчої здатності відеозображення, що приводить до збільшення кількості дискретних точок та об'єму цифрових даних відеозображення. Але збільшення цього об'єму збільшує час формування, введення в цифрову ЕОМ та накопичення цих відеозображень, що суттєво знижує швидкодію засобів вимірювання механічних величин. Для вирішення цього протиріччя і може бути застосовано стиснення часових послідовностей відеозображень, яке зменшує об'єм цифрових даних та підвищує швидкодію засобів вимірювання механічних величин при заданій точності цих вимірювань. Але при цьому потрібно контролювати величину похибок вимірювальної відеоінформації про геометричні параметри та параметри руху об'єктів.

Відповідна похибка Δ_c обумовлена кодуванням і перетворенням цифрових даних відеозображень в ПФВЗ з метою зменшення їх об'єму (стиснення) при введенні, накопиченні та зберіганні в цифровій ЕОМ. Коефіцієнт зменшення об'єму цифрових відеозображень $k_V = V_0 / V_{\text{інт}}$ ($V_0 = N \cdot M \cdot N_{\text{дк}} \cdot N_{\text{к}} \cdot k_{\text{п}}$ – початковий об'єм цифрових даних, $V_{\text{інт}}$ – об'єм цих даних після перетворення, N, M – ширина та висота відеозображення у дискретних точках (д.т.), $N_{\text{дк}}$ – кількість двійкових розрядів, що використовуються для кодування яскравості точок цифрового відеозображення, $N_{\text{к}}$ – кількість каналів, що використовуються в цифровому кольоровому відеозображенні для передачі інформації про яскравість і колір поверхні ОБ, $k_{\text{п}}$

=1 біт – коефіцієнт пропорційності для випадку двійкового кодування цифрового відеозображення). Зв'язок між середньоквадратичним значенням цієї похибки $\sigma_{\Delta c} = \sigma_{\Delta c a} \cdot l_{\Pi} / h_{\Pi}$ і k_V може бути визначений ($\sigma_{\Delta c a}$ – середньоквадратичне значення похибки відтворення амплітуди відеозображення в результаті кодування, h_{Π} – середнє значення висоти перепадів амплітуди відеосигналу, які відповідають контурам ОВ, l_{Π} – середнє значення довжини проєкцій цих перепадів на задану координатну вісь в площині відеозображення).

Для цього вводиться поняття швидкості створення інформації в ПФВЗ $R_{B3}(\sigma_{\Delta 6a})$ [Претт. Цифровая обработка изображений, 1982], що фактично визначає кількість біт, необхідну для передачі інформації про одну д.т. цифрового відеозображення. Цифрове відеозображення можна вважати двовимірним марковським джерелом з експоненційною кореляційною функцією і нормальним законом розподілу амплітуди. Якщо $\Delta_{6a} \ll A_{\max}$, то згідно [Претт. Цифровая обработка изображений, 1982] маємо:

$$R_{B3}(\sigma_{\Delta 6a}^2) = \frac{k_{\Pi 1}}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma_{B3}^2 \cdot (1 - \rho_x^2) \cdot (1 - \rho_y^2)}{\sigma_{\Delta 6a}^2} \right),$$

де A_{\max} – максимальне значення амплітуди цифрових відеозображень (при кодуванні амплітуди за допомогою 8-ми розрядів двійкового коду $A_{\max} = 255$ дискретних рівнів (д.р.)), σ_{B3}^2 – дисперсія амплітуди відеозображення, ρ_x і ρ_y – коефіцієнти кореляції відліків у рядках і стовпцях відеозображення, $k_{\Pi 1} = 1$ біт/(д.т.) – коефіцієнт пропорційності, що визначає розмірність R_{B3} для випадку двійкового кодування цифрового відеозображення.

Тоді коефіцієнт зменшення об'єму напівтонового цифрового відеозображення можна визначити таким чином:

$$k_V = N_{\text{дк}} / R_{B3}.$$

Визначимо на основі наведених формул необхідний коефіцієнт зменшення об'єму цифрових відеозображень. Для цифрових відеозображень ОВ типове значення дисперсії $\sigma_{B3}^2 = 60$ (д.р.)², а типове значення коефіцієнтів кореляції $\rho_x = \rho_y = 0,95$. Допустима величина середньоквадратичного значення похибки дорівнює: $\sigma_{\Delta c a} = 5,0$ д.р., $R_{B3} = 0,23$ біт/(д.т.), $k_V = 34,8$ рази. Зауважимо, що для реальних відеозображень ОВ коефіцієнт k_V є в дещо меншим, ніж той, що визначений для ідеального випадку за наведеними вище формулами.

Кодування та зменшення об'єму цифрових відеозображень реалізуються на основі методів стиснення та відповідних їм форматів файлів цифрових відеозображень.

Основні рекомендації по застосуванню методів кодування цифрових відеозображень для вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів є такими:

1. Передача відеозображень від пристрою формування відеозображень (ПФВЗ) в цифрову ЕОМ по інтерфейсу з обмеженою пропускну здатністю в складі пристрою передачі відеозображень (ППВЗ) виконується в темпі надходження цих відеозображень від ПФВЗ. При цьому об'єм цифрових відеозображень зменшується в декілька десятків разів, щоб забезпечити роботу засобів вимірювань в реальному часі та потрібну точність відеозображень. Ця вимога реалізується спеціалізованими мікросхемами в складі ПФВЗ, що виконують стиснення цифрових відеозображень на основі дискретного косинусного перетворення (метод JPEG) або вейвлет-перетворення (метод JPEG 2000).

2. Накопичення та довготривале зберігання цифрових відеозображень в запам'ятовуючих пристроях цифрової ЕОМ вимагає досягнення максимально можливої ступені стиснення відеозображень при їх заданій точності. Найбільш перспективним в цьому випадку є фрактальне перетворення і кодування відеозображень, що забезпечує зменшення їх об'єму в декілька сотень разів.

3. При формуванні часових послідовностей цифрових відеозображень в реальному часі необхідно виконувати їх кодування та зменшення об'єму. Таке перетворення виконується шляхом окремого кодування кожного відеозображення цієї послідовності (наприклад у форматі *DV*). Виключення частини цифрових відеозображень з часової послідовності та наступне їх відновлення на основі наближених оцінок (методи *MPEG-1,2,4*) знижує точність засобів вимірювання механічних величин.

Метод та пристрій стиснення відеозображень, що реалізується технічними та програмними засобами при вимірюванні механічних величин, як і будь-який інший цифровий обчислювальний пристрій характеризується такими похибками:

- трансформована похибка, обумовлена наявними похибками вимірювальної відеоінформації, що надходить для стиснення (шуми ПФВЗ, похибки, обумовлені дискретизацією у просторі та квантуванням за рівнем відеосигналу);

- методична похибка, обумовлена не ідеальністю чисельних методів, що застосовуються для перетворення цифрових даних, в даному випадку – це методи виключення частини відеоінформації з метою стиснення відеозображень;

- обчислювальні похибки, обумовлені обмеженою розрядною сіткою цифрових пристроїв обробки та стиснення часових послідовностей відеозображень.

Тому розглянемо методи стиснення відеозображень з точки зору можливості виникнення похибок визначення геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів, що обумовлені наведеними вище трьома видами похибок цифрових обчислювальних пристроїв, що виконують стиснення часових послідовностей відеозображень. Розгляд похибок будемо вести на прикладі найпоширенішого методу стиснення та формату графічних файлі JPEG, що може застосовуватися як до стиснення окремих відеозображень, так і до кадрів у складі часових послідовностей відеозображень.

Цьому методу відповідає JPEG-алгоритм стиснення відеозображень, який представлено на рис. 1.

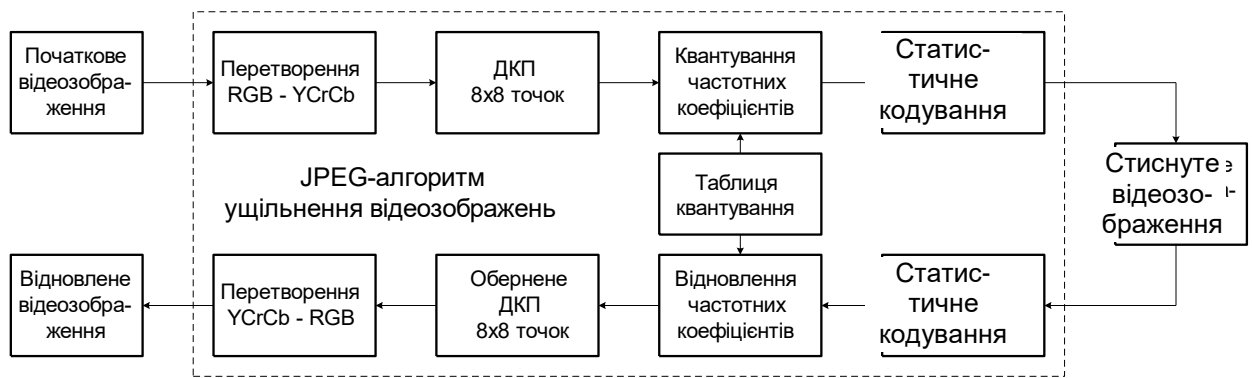


Рис. 1. Схема JPEG-алгоритму стиснення відеозображень

Стиснення цифрових відеозображень за JPEG-алгоритмом включає чотири етапи.

Перший етап – перетворення початкового відеозображення з метою розподілу інформації про яскравість і колір точок відеозображення, субдискретизація інформації про колір. Розподіл інформації про яскравість і колір точок зображення виконується шляхом перетворення кольорової схеми *RGB* в схему *YCrCb*:

$$\begin{cases} Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B, \\ Cb = -0,169R - 0,331G + 0,500B + 128, \\ Cr = 0,500R - 0,419G - 0,081B + 128, \end{cases}$$

де *R*, *G*, *B* – червона, зелена і синя складові частини інформації про колір дискретної точки відеозображення,

Cr, *Cb* – інформація про колір точки, відокремлена від інформації про яскравість (кольорорізницева інформація),

Y - інформація про яскравість цієї точки.

Зворотне перетворення виконується відповідно до формул:

$$\begin{cases} R = Y + 1,402(Cr - 128), \\ G = Y - 0,344(Cb - 128) - 0,714(Cr - 128), \\ B = Y + 1,772(Cb - 128). \end{cases}$$

Субдискретизація інформації про колір полягає в збереженні тільки кожного другого або четвертого дискретного значення *Cb* і *Cr*.

У випадку застосування JPEG-алгоритму для розв'язання задач, пов'язаних із геометричними вимірюваннями на відеозображеннях, слід відзначити:

1. Існує обернена операція для відновлення цифрових даних.

2. В багатьох пристроях цифрові дані початкового відеозображення вже розділені на дані про яскравість і колір. Наприклад, у більшості відеокамер ці дані формуються окремо, їх перетворення в цифрову форму при введенні в комп'ютер також виконується окремо.

3. Для геометричних вимірювань використовуються, як правило, напівтонові зображення, отримані шляхом перетворення кольорових відеозображень.

В результаті можна вважати, що перший етап JPEG-алгоритму не приводить до виникнення похибок геометричних вимірювань, крім похибки виконання обчислень.

Другий етап JPEG-алгоритму – розподіл відеозображення на блоки (матриці) розміром $K \times K$ дискретних точок (зазвичай, $K = 8$) і виконання дискретного косинусного перетворення (ДКП) для кожного блоку. Із матриці розміром $K \times K$, що містить інформацію про яскравість дискретних точок відеозображення $f(n, m)$, утворюється матриця розміром $K \times K$, що містить частотні коефіцієнти ДКП $F(u, v)$, тобто спектр відеозображення. В результаті інформація про яскравість і колір (кожна окремо) переводиться в частотну область.

Обчислення частотних коефіцієнтів (пряме ДКП) виконується за формулою:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{2K}} \cdot C(u) \cdot C(v) \sum_{n=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{K-1} f(n, m) \cdot \cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K} \cdot \cos \frac{(2m+1)v\pi}{2K},$$

де $u = 0, 1, \dots, K-1, v = 0, 1, \dots, K-1,$

$n = 0, 1, \dots, K-1, m = 0, 1, \dots, K-1,$

$C(u), C(v)$ – постійні коефіцієнти,

$$C(u) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & u = 0, \\ 1, & u > 0, \end{cases} \quad C(v) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & v = 0, \\ 1, & v > 0. \end{cases}$$

Відновлення інформації про яскравість точок (обернене ДКП) виконується за формулою:

$$f(n, m) = \frac{1}{\sqrt{2K}} \cdot \sum_{u=0}^{K-1} \sum_{v=0}^{K-1} C(u) \cdot C(v) \cdot F(u, v) \cdot \cos \frac{(2n+1)u\pi}{2K} \cdot \cos \frac{(2m+1)v\pi}{2K}.$$

Наведені формули фактично є визначенням прямого і оберненого ДКП, але їх застосування при обробці відеозображень не вигідно, так як потрібна велика кількість обчислювальних операцій. Існує швидкий алгоритм обчислення прямого і оберненого ДКП, який реалізується через стандартні операції множення матриць:

$$F = C_1 \cdot Y \cdot C_1^T,$$

$$Y = C_1^T \cdot F \cdot C_1,$$

де C_1 – матриця постійних коефіцієнтів ДКП,

$$C_1(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{K}}, & v = 0, \\ \sqrt{\frac{2}{K}} \cdot \cos \frac{(2u+1)v\pi}{2K}, & v > 0, \end{cases}$$

C_1^T – транспонована матриця C_1 .

Так як ДКП має обернене перетворення (обернене ДКП), то другий етап JPEG-алгоритму не приводить до втрат відеоінформації і виникнення похибок, крім похибок виконання обчислень.

Третій етап JPEG-алгоритму – квантування частотних коефіцієнтів, отриманих в результаті ДКП:

$$F_q(u, v) = \text{int} \left\{ \frac{F(u, v)}{Q(u, v)} + 0,5 \right\},$$

де $\text{int}\{.\}$ – операція виділення цілої частини числа,

$Q(u, v)$ – вагові коефіцієнти в таблиці квантування частотних коефіцієнтів.

Відновлення частотних коефіцієнтів при відновленні відеозображень виконується за формулою:

$$F'(u, v) = F_q(u, v) \cdot Q(u, v).$$

В процесі квантування верхні частоти можуть бути вилучені із спектра цифрового відеозображення. Це залежить від співвідношення значень елементів таблиці квантування і значень частотних коефіцієнтів. Вилучення верхніх частот приводить до викривлення форми перепадів яскравості, що відповідають контурам об'єктів вимірювань (ОВ) на відеозображеннях. В результаті виникає ще одна складова частина похибки визначення координат точок контурів об'єктів на цифровому відеозображенні. Інші частотні коефіцієнти, що залишаються в спектрі, в результаті квантування можуть дещо змінитися і це теж є джерело похибок визначення координат точок.

Четвертий етап JPEG-алгоритму – кодування частотних коефіцієнтів після квантування за методом Хаффмена або арифметичне кодування для вилучення інформаційної надлишковості. Ці методи кодування не приводять до втрат інформації і виникнення похибок.

Для відновлення стиснутого відеозображення всі вказані етапи виконуються в зворотному порядку.

Початкове відеозображення, що надходить в JPEG-алгоритм для стиснення, має певний рівень шумів та інших похибок, що виникли в процесі формування цього відеозображення. Ці похибки перетворюються в трансформовану похибку на виході JPEG-алгоритму.

JPEG-алгоритм містить багато обчислювальних операцій над цифровими даними. Обмеження розрядності цифрових даних приводить до виникнення похибки виконання обчислень.

Значення похибки виконання обчислень залежить від варіанту обчислень ДКП, який реалізовано в засобах стиснення відеозображень, і від розрядності цифрових даних в цих засобах. Безпосереднє визначення цієї похибки є досить складним через велику кількість обчислювальних операцій в JPEG-алгоритмі. Крім того, для стандартних технічних засобів потрібна початкова інформація не завжди доступна. Більш доцільним слід вважати підхід, при якому похибка виконання обчислень може бути оцінена за результатами експериментальних досліджень стиснення деяких тестових відеозображень.

Для розв'язання задачі визначення впливу стиснення за JPEG-алгоритмом на точність геометричних вимірювань необхідно розробити математичні моделі трансформованої похибки і похибки, пов'язаної з квантуванням і вилученням частотних коефіцієнтів в спектрі відеозображення. Це дозволить:

– оцінити точність геометричних вимірювань на цифровому відеозображенні в залежності від параметрів JPEG-алгоритму;

- визначити максимально можливу степiнь стиснення цифрових відеозображень в залежності від потрібної точності геометричних вимірювань;
- в результаті, сформулювати вимоги до технічних і програмних засобів вимірювання механічних величин.

Для розв'язання вказаної задачі пропонується розглядати JPEG-алгоритм на основі теорії цифрової обробки сигналів. З цієї точки зору JPEG-алгоритм відповідає нерекурсивному цифровому фільтру нижніх частот, що виконує фільтрацію сигналу в частотній області.

Точнісні характеристики цифрового фільтра можна визначити відомими методами на основі детермінованого або ймовірнісного підходів. Особливості застосування ймовірнісних методів до JPEG-алгоритму розглянуті в даному розділі.

Для спрощення подальших міркувань будемо розглядати одновимірний сигнал яскравості $f(n)$, що відповідає послідовності дискретних точок в рядку або стовпці відеозображення. Цей сигнал яскравості містить горизонтальні або вертикальні одновимірні перепади яскравості. Вказані перепад визначають координати контурів ОВ в рядку або стовпцю відеозображення.

Якщо розглядається горизонтальний одновимірний перепад яскравості (сигнал $f(n)$ однаковий у всіх рядках блоку розміром $K \times K$ дискретних точок), то, виходячи із властивостей ДКП, цей перепад визначається першим рядком ($u = 0, 1, \dots, K-1, v = 0$) матриці частотних коефіцієнтів $F(u, v)$. В цьому випадку для визначення похибок вимірювань потрібно досліджувати перший рядок матриці частотних коефіцієнтів, перший рядок таблиці квантування і перший рядок блоку точок на відновленому після стиснення відеозображенні.

Якщо розглядається вертикальний одновимірний перепад яскравості, то потрібно досліджувати перший стовпець ($u = 0, v = 0, 1, \dots, K-1$) матриці частотних коефіцієнтів, таблиці квантування і блоку точок на відновленому відеозображенні.

Таким чином, актуальною є задача визначення впливу стиснення відеозображень за JPEG-алгоритмом на точність вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів.

В JPEG-алгоритмі виникають такі похибки геометричних вимірювань:

- трансформована похибка, обумовлена перетворенням похибок, що наявні на початковому нестиснутому відеозображенні;
- похибка, що обумовлена квантуванням частотних коефіцієнтів;
- викривлення форми перепадів яскравості в результаті вилучення верхніх частот із спектра зображення, що є наслідком квантування частотних коефіцієнтів;
- похибки виконання обчислень, що виникають внаслідок обмеженої розрядності цифрових даних.

Для визначення цих похибок пропонується дослідити JPEG-алгоритм на основі теорії цифрової обробки сигналів. Даний алгоритм відповідає нерекурсивному цифровому фільтру нижніх частот, що виконує фільтрацію сигналу в частотній області.

2. Аналіз впливу стиснення відеозображень на вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів

Цифрове відеозображення, що надходить в JPEG-алгоритм для стиснення, містить шуми та інші похибки, які виникли в процесі його формування. До таких похибок відносяться:

- шум в електронних схемах пристроїв формування відеозображень;
- шум квантування по рівню при перетворенні відеосигналу в цифрову форму;
- еквівалентна похибка квантування, отримана в результаті перерахунку похибки дискретності на основі лінійної форми перепаду яскравості.

Будемо вважати, що вказані похибки утворюють адитивний шум, що присутній в сигналі яскравості. Цей сигнал відповідає послідовності значень яскравості в дискретних точках одного рядка цифрового відеозображення. Вказаний шум перетворюється в процесі стиснення відеозображення в деякий інший шум, що присутній в сигналі яскравості на виході JPEG-алгоритму.

Визначимо дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму (на відеозображенні після стиснення) на основі параметрів JPEG-алгоритму і статистичних характеристик шуму на вході цього алгоритму (на початковому відеозображенні).

Для стійкого цифрового фільтра, при подачі на вхід стаціонарного випадкового процесу з нульовим середнім значенням, дисперсія випадкового процесу на виході дорівнює:

$$\sigma_{вих}^2 = R_{вих}(0) = \frac{T}{\pi} \cdot \int_0^{\pi/T} W_{вих}(\omega) d\omega, \quad (1)$$

де $R_{вих}$ – кореляційна функція випадкового процесу на виході фільтра,

T – інтервал дискретності відліків сигналу в фільтрі,

$W_{вих}$ – спектральна щільність потужності випадкового процесу на виході фільтра.

Відповідно до

$$W_{вих}(z) = D(z^{-1}) \cdot D(z) \cdot W_{вх}(z), \quad (2)$$

де D – передаточна функція фільтра,

$W_{вх}$ – спектральна щільність потужності випадкового процесу на вході фільтра.

У випадку, коли вхідний шум є некорельований стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім значенням, некорельований з корисним сигналом, можна отримати на основі формул (1) і (2) вираз для розрахунку дисперсії шуму на виході цифрового фільтра:

$$\sigma_{вих}^2 = \sigma_{вх}^2 \cdot \frac{T}{\pi} \int_0^{\pi/T} A^2(\omega) d\omega, \quad (3)$$

де $\sigma_{вх}^2$ – дисперсія шуму на вході фільтра,

$A(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика фільтра.

Для цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією шум є некорельованим стаціонарним випадковим процесом з нульовим середнім значенням і він некорельований з сигналом яскравості. Нерекурсивний фільтр, який відповідає JPEG-алгоритму, завжди стійкий. Тому можна використовувати

формулу (3). Будемо вважати, що розмір цифрового відеозображення в дискретних точках не змінюється за допомогою програмних засобів після його перетворення в цифрову форму. Тоді інтервал дискретності для цифрового фільтра дорівнює кроку дискретності δ_d відеосигналу при його перетворенні в цифрову форму, тобто $T = \delta_d$.

Визначимо амплітудно-частотну характеристику цифрового фільтра, що відповідає JPEG-алгоритму стиснення відеозображень. При стисненні відеозображень мають місце деякі зміни амплітуди сигналу яскравості в рядку відеозображення (зміни яскравості дискретних точок відеозображення). Вони пов'язані із деякою зміною значень частотних коефіцієнтів в процесі їх квантування. Ці зміни яскравості будуть враховані окремо у вигляді похибки, пов'язаної із квантуванням частотних коефіцієнтів. Тому будемо вважати, що стиснення за JPEG-алгоритмом не змінює амплітуди сигналу яскравості, а відповідний цифровий фільтр нижніх частот має в смузі перепускання амплітудно-частотну характеристику $A(\omega) = 1$.

Визначимо верхню межу смуги перепускання цифрового фільтра. Цей фільтр виконує фільтрацію сигналу в частотній області. В даному випадку L – порядковий номер (рахуючи з 0) останнього частотного коефіцієнту в першому рядку матриці частотних коефіцієнтів, що залишається в спектрі одновимірного сигналу яскравості в рядку відеозображення. Вилучення частотних коефіцієнтів з більшими номерами здійснюється при квантуванні цих коефіцієнтів в процесі стиснення відеозображення за JPEG-алгоритмом. Скільки частотних коефіцієнтів буде вилучено, залежить від співвідношення значень частотних коефіцієнтів і значень елементів таблиці квантування.

Визначимо на основі теореми відліків і властивостей ДКП частоти, що відповідають номерам частотних коефіцієнтів. Максимальна частота, що може бути присутня в рядку цифрового відеозображення, відповідає порядковому номеру $K = 8$ і дорівнює: $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max} = \pi/\delta_d$, де $f_{\max} = 1/(2\delta_d)$. Для будь-якого довільного порядкового номера “ i ” частота $\omega_i = \frac{i \cdot \pi}{\delta_d \cdot K}$.

В результаті маємо амплітудно-частотну характеристику цифрового фільтра, що відповідає JPEG-алгоритму стиснення відеозображень (рис. 2).

Використовуючи формулу (5.3) і отриману амплітудно-частотну характеристику, маємо:

$$\sigma_{вих}^2 = \sigma_{ex}^2 \cdot \frac{\delta_d}{\pi} \int_0^{\omega_L} 1^2 \cdot d\omega = \sigma_{ex}^2 \cdot \frac{L}{K}. \quad (4)$$

Таким чином, формула (4) дозволяє розв'язати поставлену задачу, тобто знайти дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму.

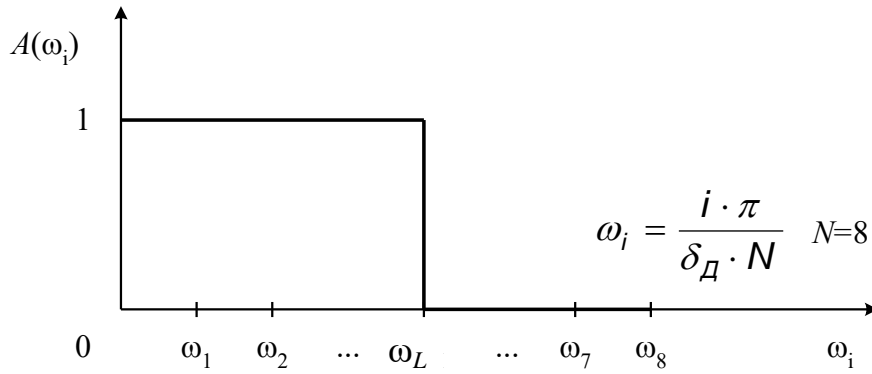


Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика JPEG-алгоритму

Так як $L = 0, 1, \dots, 7$; $K = 8$, то JPEG-алгоритм зменшує рівень шуму, який присутній на початковому зображенні.

Величина, на яку зменшується рівень шуму, залежить від співвідношення значень частотних коефіцієнтів і елементів таблиці квантування. Таким чином, перетворення вхідного шуму в JPEG-алгоритмі залежить від характеру зміни яскравості на конкретному типі відеозображень і від параметрів алгоритму.

При використанні формули (4) потрібно враховувати співвідношення максимальної частоти ω_{max} , що може бути присутня в рядку відеозображення, і верхньої межі смуги частот сигналу яскравості, яка визначається в процесі його формування і перетворення. Якщо верхня межа смуги частот сигналу яскравості менша за максимальну частоту ω_{max} , то потрібно визначити номер частотного коефіцієнту N' , що відповідає цій верхній межі. Тоді формула (4) набуває вигляду:

$$\sigma_{вих}^2 = \begin{cases} \sigma_{вх}^2 \cdot \frac{L}{K'}, & L < K', \\ \sigma_{вх}^2, & L \geq K'. \end{cases}$$

Таким чином, на основі теорії цифрової обробки сигналів визначено дисперсію шуму на виході JPEG-алгоритму. Встановлено, що при відповідному виборі параметрів JPEG-алгоритму можна зменшити рівень шуму на відеозображенні і, в результаті, зменшити похибки геометричних вимірювань.