

Шутко В.М., д.т.н.,
Колганова О.О., к.т.н.,
Ковтонюк І.Ю.,
Савченко О.В.

АВТОМАТИЗОВАНЕ СТИСНЕННЯ АЕРОФОТОЗНІМКІВ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОГО БАГАТОМАСШТАБНОГО РОЗКЛАДУ

Національний авіаційний університет

Стаття присвячена розробці автоматизованого методу стиснення аерофотознімків на основі нелінійного багатомасштабного розкладу та розкритті його переваги у порівнянні з вейвлет-аналізом

Вступ

Цифрове стиснення - гнучка технологія, оскільки рівні складності кодування, що використовуються, та ступінь компресії можуть варіюватися відповідно до програм. Основним принципом цифрового стиснення є використання так званої надлишковості звукового або відеосигналу. Надлишковість пояснюється тим, що звук і відео містять області, що мають схожі характеристики. Таким чином, весь потік інформації можна умовно розділити на передбачувану частину (інакше кажучи - надлишковість) і нову, непередбачувану частину (відому в теорії інформації як ентропія). Сума цих двох величин і дає нам потік даних, зменшення якого буде залежати від того, наскільки добре ми можемо здійснити «передбачення». Теоретично можна повністю усунути надлишковість і залишити тільки ентропію, але для цього знадобився б ідеальний алгоритм стиснення, який був би надзвичайно складним і працював би невинувато довго. Якщо ж ступінь стиснення настільки велика, що результуюча швидкість потоку даних стає менше ентропії, то інформація втрачається. На практиці коефіцієнт стиснення вибирається менше ідеального, щоб забезпечити деякий запас надійності. Це дає можливість користуватися більш простими алгоритмами і виробляти повторне відновлення/стискання без відчутних втрат якості. В побутовій апаратурі коефіцієнт стиснення може бути більше, ніж у студійній, і якщо не вимагається багаторазовий перезапис, то в процесі стиснення деяка частка ентропії відкидається [1].

Вейвлет-аналіз забезпечує можливість досить ефективного стиснення фотозображень і їх відновлення з малими втратами якості, а також вирішення задач фільтрації. Вейвлетним аналізом є особливий тип лінійного перетворення сигналів та фізичних даних про процеси й фізичні властивості природних середовищ і об'єктів, що відображаються цими сигналами. Вейвлетні функції базису дозволяють сконцентрувати увагу на тих або інших локальних особливостях аналізованих процесів, які не можуть бути виявлені за допомогою традиційних перетворень Фур'є і Лапласа. Принципове значення має можливість вейвлетів аналізувати нестационарні сигнали зі

змінною компонентного вмісту в часі або в просторі. Одна з головних і особливо плідних ідей вейвлетного представлення сигналів на різних рівнях розкладання полягає в розділенні функцій наближення до сигналу на дві групи: що апроксимує - грубу, з достатньо повільною часовою динамікою змін, і що деталізує - з локальною і швидкою динамікою змін на фоні плавної динаміки, з подальшим їх дробленням і деталізацією на інших рівнях декомпозиції сигналів (багатомасштабний або кратномасштабний аналіз) [2, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній літературі дискретне вейвлет-перетворення будується за допомогою кратномасштабного аналізу. Поняття кратномасштабного аналізу сформульоване восени 1986 Малла (Mallat) і Мейером (Meyer). Кратномасштабний аналіз забезпечує природну основу для розуміння базисів вейвлетів і для побудови нових прикладів. Історія формулювання поняття кратномасштабного аналізу є прекрасним прикладом того, як програми стимулюють теоретичні дослідження. Малла уперше почув про базиси Мейера, працюючи над аналізом зображень, в якому ідея вивчення зображень одночасно для різних масштабів і порівняння результатів була популярна багато років. Це спонукало його до розгляду ортонормованих базисів вейвлетів як інструменту для математичного опису "приросту інформації", необхідного для переходу від грубого наближення до наближення більш високої роздільної здатності. Таке розуміння викристалізувалось в концепцію кратномасштабного аналізу [2, 3, 4, 6].

Основна ідея. Кратномасштабний аналіз складається з послідовності просторів апроксимації V_j . Точніше, замкнуті підпростори V_j задовільняють включенням:

$$\dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \dots, \quad (1)$$

де

$$\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathbb{R}), \quad (2)$$

$$\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\} \quad (3)$$

Якщо через P_j позначити оператор ортогонального проектування на V_j , то (3.7) гарантує, що $\lim_{j \rightarrow \infty} P_j f = f$ для всіх $f \in L^2(\mathbb{R})$.

Існує багато ланцюгів просторів, що задовольняють (1) – (3), які не мають відношення до «кратномасштабності». Кратномасштабність є наслідком додаткової вимоги:

$$f \in V_j \Leftrightarrow f(2^j \cdot) \in V_0. \quad (4)$$

Всі ці простори являються версіями, що масштабуються центрального простору V_0 . Інша властивість, яка потрібна кратномасштабному аналізу: інваріантність V_0 по відношенню до зсувів на цілі числа:

$$f \in V_0 \Rightarrow f(\cdot - n) \in V_0 \text{ для усіх } n \in \mathbb{Z}. \quad (5)$$

Разом з (4) це тягне $f(\cdot - 2^j n) \in V_j$ для усіх $n \in \mathbb{Z}$, якщо $f \in V_j$. Нарешті, потрібно, щоб існувала $\varphi \in V_0$ така, що:

$$\{\varphi_{0,n}; n \in \mathbb{Z}\} \quad (6)$$

(6) являється ортонормованим базисом у V_0 , де для усіх $j, n \in \mathbb{Z}$, $\varphi_{j,n}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j} t - n)$. Разом (6) і (4) призводять до того, що $\{\varphi_{j,n}; n \in \mathbb{Z}\}$ - ортонормований базис у V_j для усіх $j \in \mathbb{Z}$. У літературі φ часто називають «масштабуючою функцією» кратномасштабного аналізу.

Основний принцип кратномасштабного аналізу такий: для будь-якого набору замкнутих підпросторів, що задовільняють (1) – (6), існує такий ортонормований базис вейвлетів $\{\varphi_{j,k}; j, k \in \mathbb{Z}\}$ для $L^2(\mathbb{R})$, де $\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j} t - k)$, що для усіх $f \in L^2(\mathbb{R})$:

$$P_{j-1} f = P_j f + \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f, \varphi_{j,k} \rangle \varphi_{j,k} \quad (7)$$

(P_j - ортогональне проектування на V_j .)
Більш того, вейвлет ψ можна сконструювати у явному вигляді. Подивимось, як це робиться.

Для кожного $j \in \mathbb{Z}$, визначимо W_j як ортогональне доповнення V_j у V_{j-1} . Маємо:

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j \quad (8)$$

та $W_j \perp W_{j'}$, якщо $j \neq j'$. (9)

(Якщо $j > j'$, наприклад, то $W_j \subset V_{j'} \perp W_{j'}$.)

Відповідно, для $j < J$

$$V_j = V_J \oplus \bigoplus_{k=0}^{J-j-1} W_{J-k}, \quad (10)$$

в якому всі підпростори ортогональні. Так як (2) і (3) то:

$$L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j, \quad (11)$$

це означає розложення $L^2(\mathbb{R})$ на взаємно ортогональні підпростори. Більш того, простори W_j наслідують від V_j властивість масштабування (4):

$$f \in W_j \Leftrightarrow f(2^j \cdot) \in W_0. \quad (12)$$

Формула (7) еквівалентна висловлюванню, що для фіксованого j сімейство $\{\psi_{j,k}; k \in \mathbb{Z}\}$

утворює ортонормований базис у W_j . Маючи (11), (2), (3), ми автоматично отримуємо, що весь набір $\{\psi_{j,k}; j, k \in \mathbb{Z}\}$ являється

ортонормованим базисом для $L^2(\mathbb{R})$. З іншого боку, (12) гарантує, що якщо $\{\psi_{0,k}; k \in \mathbb{Z}\}$ - ортонормований базис у W_0 , то $\{\psi_{j,k}; k \in \mathbb{Z}\}$ буде ортонормованим базисом у W_j для будь-якого $j \in \mathbb{Z}$. Так, наша задача зводиться до знаходження такої $\psi \in W_0$, що функції $\psi(\cdot - k)$ утворюють ортонормований базис у W_0 .

Постановка завдання

З метою підвищення якості стиснення аерофотознімків пропонуємо розробити багатомасштабний аналіз з використанням нелінійної апроксимації дискретних значень матриці пікселів початкового зображення. Лінійна, особливо лінійна поліноміальна, апроксимація часто не відповідає характеру функції. Наприклад, багаточлен високої степені швидко зростає при $|x| \rightarrow \infty$; тому навіть нескладну функцію багаточлен погано апроксимує на великому відрізку. Оскільки апроксимація проводиться у широкому інтервалі зміни аргументу, використання нелінійної залежності від коефіцієнтів тут ще вигідніше, ніж при інтерполяції.

Нелінійний багатомасштабний розклад. На рис.1 показано

порядок виконання операцій при стисканні запропонованим методом.

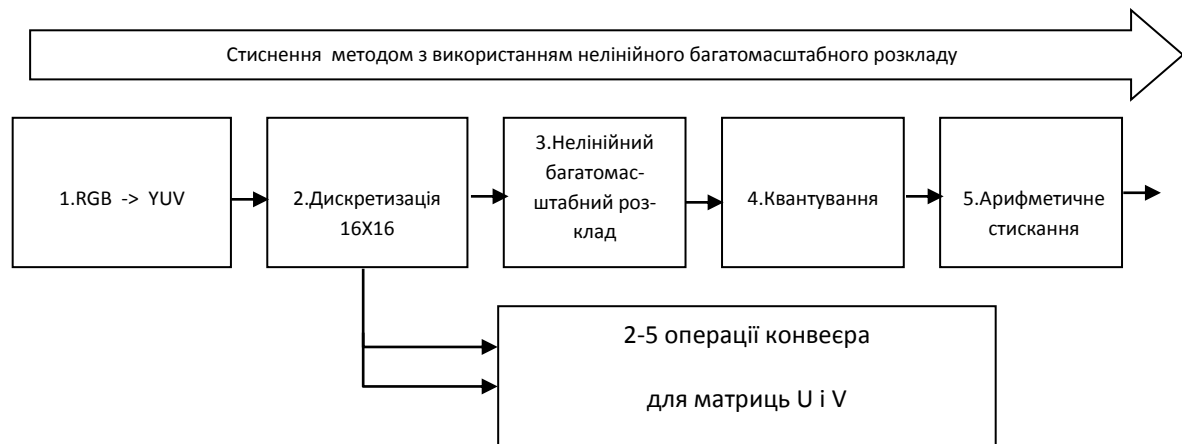


Рис.1. Конвеєр операцій при стисканні методом на основі нелінійного багатомасштабного розкладу.

При моделюванні використовують два види залежності. Один – квазілінійна залежність, яка зводиться до лінійної залежності заміною змінних, що вирівнює. Цей спосіб дуже ефективний і часто використовується при обробці експерименту, бо апріорні відомості про фізику процесу допомагають знайти хорошу заміну змінних.

Інший вид залежності від коефіцієнтів – дробно-лінійна, коли апроксимуюча функція раціональна:

$$\phi(x) = \frac{P_n(x)}{Q_m(x)} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k x^k}{\sum_{q=0}^m b_q x^q}$$

Часто використовується і відношення узагальнених багаточленів. Така апроксимація дозволяє передати полюси функції $y(x)$, – їм відповідають нулі знаменника необхідної кратності. Як правило можна відтворити асимптотичну поведінку $y(x)$ при $x \rightarrow \infty$ за рахунок відповідного вибору величини $n-m$; наприклад, якщо $y(\infty) = \text{const} \neq 0$; то треба прийняти $n=m$. При цьому самі n, m можна брати достатньо великими, щоб мати багато коефіцієнтів апроксимації. Таким методом ми і будемо користуватись.

Але квадрат похибки $\left\| y - \frac{P_n}{Q_m} \right\|_{L_2}^2$ вже не

буде квадратичною функцією коефіцієнтів, тобто знайти коефіцієнти раціональної функції нелегко. Можна за аналогією з середньоквадратичною апроксимацією багаточленами висунути гіпотезу, що похибка

$y(x) - \frac{P_n(x)}{Q_m(x)}$ має на $[a, b]$ число нулів, не менше за число вільних коефіцієнтів. Тоді задача зводиться до лагранжевої інтерполяції по цих нулях x_p і коефіцієнти a_k, b_q знаходяться з системи лінійних рівнянь:

$$y(x_p) \sum_{q=0}^m b_q x_p^q = \sum_{k=0}^n a_k x_p^k, \quad 0 \leq p \leq n+m; \quad b_0 = 1.$$

Зрозуміло, що точне положення нулів не відомо; їх обирають довільно, як правило, розташовуючи рівномірно на відрізку $[a, b]$. Цей спосіб називається методом обраних точок.

Одержане цим методом наближення $\phi(x)$ не буде найкращим. Крім того, метод обраних точок не кращий, як і будь-яка інтерполяція, якщо $y(x_p)$ має помітну похибку.

Найкраще наближення можна знайти методом ітерованої ваги. Відмітимо, що задача

$$\left\| Q_m(x)y(x) - P_n(x) \right\|_{L_2}^2 = \min$$

легко розв'язується: вираз зліва є квадратичною функцією коефіцієнтів a_k, b_q , і диференціювання по ним призводить до лінійної системи для визначення коефіцієнтів. Нова задача відрізняється від початкової за сутністю тим, що замість ваги $\rho(x)$ використовується інша вага $\rho(x)Q_m^2(x)$, тому її розв'язання не буде найкращим наближенням. Запишемо початкову задачу в новій формі:

$$\left\| y - \frac{P_n}{Q_m} \right\|_{L_2}^2 = \int_a^b \bar{\rho}(x) \left[Q_m(x)y(x) - P_n(x) \right]^2 dx = \min$$

$$\bar{\rho}(x) = \frac{\rho(x)}{Q_m^2(x)}$$

і будемо розв'язувати її простим ітераційним процесом:

$$\bar{\rho}^{(s)}(x) = \rho(x) \left[Q_m^{(s-1)}(x) \right]^{-2}$$

$$\int_a^b \bar{\rho}^{(s)}(x) \left[Q_m^{(s)}(x)y(x) - P_n^{(s)}(x) \right]^2 dx = \min$$

за нульове наближення можна взяти $Q_m^{(0)}(x) \equiv 1$. На кожній ітерації вага відома за попередньою

ітерацією, тому коефіцієнти $a_k^{(s)}$, $b_q^{(s)}$ легко

знаходяться з умови мінімуму квадратичної форми. Практика показує, що коефіцієнти найкращого наближення слабо залежать від вибору ваги, тому звичайно ітерації збігаються швидко.



Рис.2 Порівняння стиснутих зображень: а – оригінал зображення (41Мб), б – стиснення вейвлет-методом (5.31 Мб), в – стиснення запропонованим методом (3.8Мб). Міра відношення сигнал до шуму складала: PSNR=35.3 dB

Висновки

Метод стиснення аерофотознімків можна досить гнучко налаштувати підбираючи його параметри під кожний тип графічних даних так, щоб результати стиснення були найкращими.

Оцінка методу стиснення на основі нелінійного багатомасштабного розкладу, після проведення моделювання, показала, що він потребує більше часу для обробки вхідних матриць фотозображень, але дозволяє підвищити коефіцієнт стиснення на 8-10%, порівняно з сучасними методами, в яких використовується вейвлет-аналіз. Особливості даного методу стиснення визначають напрям використання, а саме бази даних геодезичних компаній, медичних установ, космічних агентств, студій відеомонтажу, де він матиме ряд переваг над багатьма сучасними методами стиснення.

Слід також вказати на одну з серйозних проблем машинної графіки яка полягає в тому, що до цих пір не знайдений адекватний критерій оцінки втрат якості зображення. А губиться воно постійно - при оцифруванні, при перекладі в обмежену палітру кольорів, при перекладі в іншу систему представлення кольору для друку, і, що для нас особливо важливо, при стисканні з втратами.

Міра, яку зараз використовують на практиці, називається мірою відношення сигналу до шуму (peak-to-peak signal-to-noise ratio - PSNR).

$$d(x,y) = 10 \cdot \log_{10} \frac{255^2 \cdot n^2}{\sum_{i=1, j=1}^{n,n} (x_{ij} - y_{ij})^2}$$

Дана міра, по суті, аналогічна середньоквадратичному відхиленню, проте користуватися нею дещо зручніше за рахунок логарифмічного масштабу шкали. Їй притаманні ті ж недоліки, що і середньоквадратичному відхиленню.

Використавши дану міру для оцінки якості стиснення, було отримано наступні результати (рис. 2).

Список літератури

1. Татарников О. Методы сжатия цифрового видео. – “КомпьютерПресс”, 2004. - N 8. – С. 37-44.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – М.: РХД, 2001. – 464 с.
3. Чуи К. Введение в вейвлеты.–М.: “Мир”, 2001. – 412 с.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике.– М.: “Солон-Р”, 2002. – 440 с.
5. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: “Диалог-МИФИ”, 2002. – 381 с.
- Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5x. – М.: “Диалог-МИФИ”, 2000. – 413 с