

УДК 621.39

Ткаченко О. М., канд. техн. наук  
Феферман О. Д.  
Хрущак С. В.

## ЕФЕКТИВНИЙ ПОШУК ВЕКТОРІВ У КОДОВІЙ КНИЗІ

Вінницький національний технічний університет

У даній статті розглянуто процес ущільнення мовних сигналів із використанням векторних кодових книг. Розроблено метод впорядкування векторів у кодовій книзі, що базується на застосуванні теорії мажоризації та метод формування вікна пошуку вектора у структурованій кодовій книзі. Проведено експериментальне дослідження розроблених методів.

### Вступ

У сучасних системах цифрового зв'язку широко застосовується лінійне прогнозування параметрів. При цьому для більш ефективного квантування та інтерполяції коефіцієнти лінійного прогнозування (LPC), як правило, перетворюють на лінійні спектральні частоти (LSF) [1].

При кодуванні LSF використовуються методи скалярного та векторного квантування параметрів. У ранішніх роботах [1-3] в основному досліджувалися методи скалярного квантування, коли кожна компонента вектора параметрів кодується незалежно за допомогою спеціальних таблиць, що отримали назву кодових книг.

Векторне квантування LSF, хоча й виявляється складнішим за скалярне квантування в обчислювальному відношенні, але дозволяє зменшити спектральне спотворення, що вноситься у мовний сигнал. Проте безпосереднє квантування 10-мірного вектора LSF-параметрів на практиці не використовується через надмірні витрати пам'яті та обчислювальну складність. Для зменшення витрат пам'яті та прискорення пошуку потрібного вектора у кодовій книзі в [4] запропоновано 10-вимірний вектор LSF розбивати на підвектори. У подальшому кожен підвектор кодується незалежно із застосуванням власної кодової книги. В [5] досліджувалися різні варіанти розбиття та було показано, що кращі результати досягаються при використанні двох підвекторів розмірністю 5 і 5 та трьох підвекторів розмір-

ністю 3, 3 і 4. Проте повний пошук найближчого сусіда у неструктурованій кодовій книзі виявляється непридатним для багатьох практичних застосувань.

З метою зменшення часу пошуку в [6] було запропоновано декілька підходів до впорядкування векторів у кодовій книзі, названих авторами методами швидкого векторного квантування (*fast vector quantization methods*). Було показано, що складність обчислень при застосуванні наведених методів для кодової книги розмірністю 3x3x4 складає порядка 25% від складності обчислень при повному пошуку без суттєвої втрати продуктивності, що оцінювалася за спектральним спотворенням. Проте запропонованому підходу притаманні деякі недоліки, а саме:

1. Коректність отриманих результатів підтверджується лише експериментально. Немає впевненості, що задеклароване зменшення складності обчислень буде отримано для інших вхідних даних, а також для книг іншої розмірності, наприклад, 5x5.

2. Обчислювальні витрати залишаються достатньо великими для практичного застосування.

У даній статті пропонується новий підхід до впорядкування векторів у кодовій книзі, що дозволяє досягти подальшого зменшення складності обчислень. Як і методи, запропоновані у [6], підхід базується на пошуку у структурованій кодовій книзі.

Кодову книгу розбито на  $m$  класів, що не перекриваються між собою. Кіль-

кість векторів у кожному класі може бути різною. Під час пошуку найближчого вектора спочатку визначається приналежність вхідного вектора  $X$  до одного з класів  $C_k$ , на які розбито кодову книгу. Слід зазначити, що пошук потрібного класу зводиться до простої процедури порівняння та не вимагає значних обчислювальних витрат. Після того, як знайдено необхідний клас, на другому етапі застосовується повний пошук найближчого до  $X$  вектора у множині векторів, що належать даному класу, та у декількох сусідніх класах. Таку множину векторів у подальшому будемо називати вікном пошуку.

### Мета роботи

Метою даної статті є зменшення обчислювальної складності кодування мовних сигналів шляхом прискорення пошуку векторів у кодовій книзі.

### Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі задачі:

- розробити математичну модель впорядкування векторів у кодовій книзі;
- запропонувати новий метод структуризації кодових книг, що дозволить зменшити вікно пошуку найближчого вектора;
- розробити алгоритм формування вікна пошуку вектора у кодовій книзі;
- запропонувати та дослідити різні підходи до впорядкування різниць компонентів векторів;
- дослідити ефективність запропонованих методів.

### Математична модель упорядкування векторів за відношенням мажорування

Нехай задано вектори LSF  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ,  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ,  $X, Y, Z \in \mathbb{R}^n$ . Розбиття кодових книг на класи згідно із заданим критерієм будемо називати структуризацією векторних кодових книг. Структуризація має на меті скорочення обчислювальних витрат на пошук квантованого век-

тора у кодовій книзі, що є найближчим до вхідного вектора  $X$ . При пошуку буде застосовуватися незважена евклідова метрика, де відстань  $D$  між векторами  $X$  і  $Y$  обчислюється за формулою

$$D^2(X, Y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2. \quad (1)$$

Необхідно дослідити, за яких умов виконується

$$D(X, Y) \leq D(X, Z). \quad (2)$$

Один з можливих підходів до структуризації кодових книг базується на використанні нерівності Карамати [7], згідно з якою для будь-якої опуклої функції  $y = f(x)$ , визначеної на деякому проміжку  $I$ , та будь-яких наборів чисел  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  з цього проміжку, що задовольняють умові  $A \prec B$ , справедливо

$$f(a_1) + f(a_2) + \dots + f(a_n) \leq f(b_1) + f(b_2) + \dots + f(b_n)$$

Вочевидь, функція  $y = x^2$  є опуклою. Неважко показати, що нерівність Карамати виконується також за умови слабого мажорування [7]  $A \prec_w B$ . Проведемо заміну  $a_i = y_i - x_i$ ,  $b_i = z_i - x_i$ . Тоді вимога слабого мажорування  $A \prec_w B$  зводиться до виконання нерівностей:

$$\begin{cases} z_i - x_i \geq z_{i+1} - x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1, \\ y_i - x_i \geq y_{i+1} - x_{i+1}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} z_1 - x_1 \geq y_1 - x_1, \\ z_1 - x_1 + z_2 - x_2 \geq y_1 - x_1 + y_2 - x_2, \\ \dots, \\ z_1 - x_1 + z_2 - x_2 + \dots + z_n - x_n \geq \\ \geq y_1 - x_1 + y_2 - x_2 + \dots + y_n - x_n. \end{cases} \quad (4)$$

Перетворимо (3) до вигляду:

$$\begin{cases} z_i - z_{i+1} \geq x_i - x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ y_i - y_{i+1} \geq x_i - x_{i+1}. \end{cases} \quad (5)$$

У свою чергу (4) можна переписати у вигляді

$$\begin{cases} z_1 \geq y_1, \\ z_1 + z_2 \geq y_1 + y_2, \\ \dots, \\ z_1 + z_2 + \dots + z_n \geq y_1 + y_2 + \dots + y_n, \end{cases} \quad (6)$$

або, скорочено,

$$\sum_{i=1}^k z_i \geq \sum_{i=1}^k y_i, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Нерівності (5) і (7) будемо використовувати як критерій для структуризації кодових книг.

**Метод структуризації кодових книг**

При структуризації кодових книг тільки за критерієм (7) графічна інтерпретація для двовимірного випадку виглядатиме так, як показано на рис. 1:

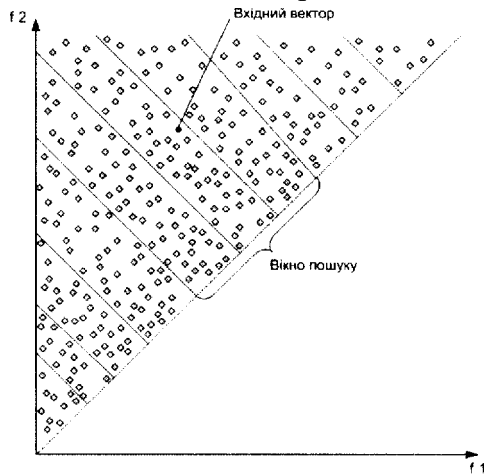


Рис. 1. Графічна інтерпретація структуризації кодових книг за критерієм (7) для двовимірного випадку

Графічна інтерпретація структуризації кодових книг тільки за критерієм (5) виглядатиме так, як представлено на рис. 2:

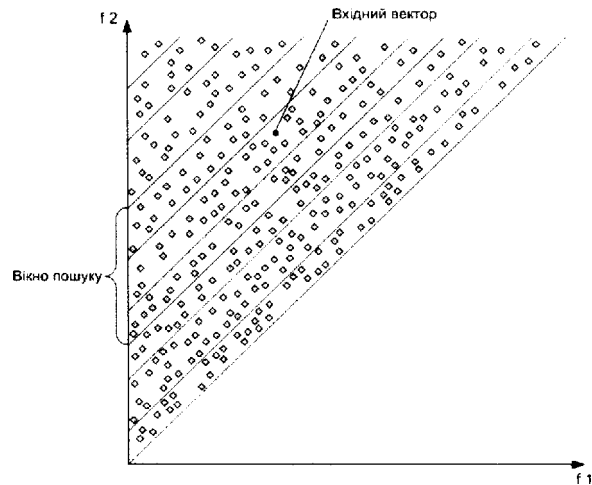


Рис. 2. Графічна інтерпретація структуризації кодових книг за критерієм (5) для двовимірного випадку

Структуризацію кодових книг одночасно за обома критеріями (5) та (7) представлено на рис. 3.

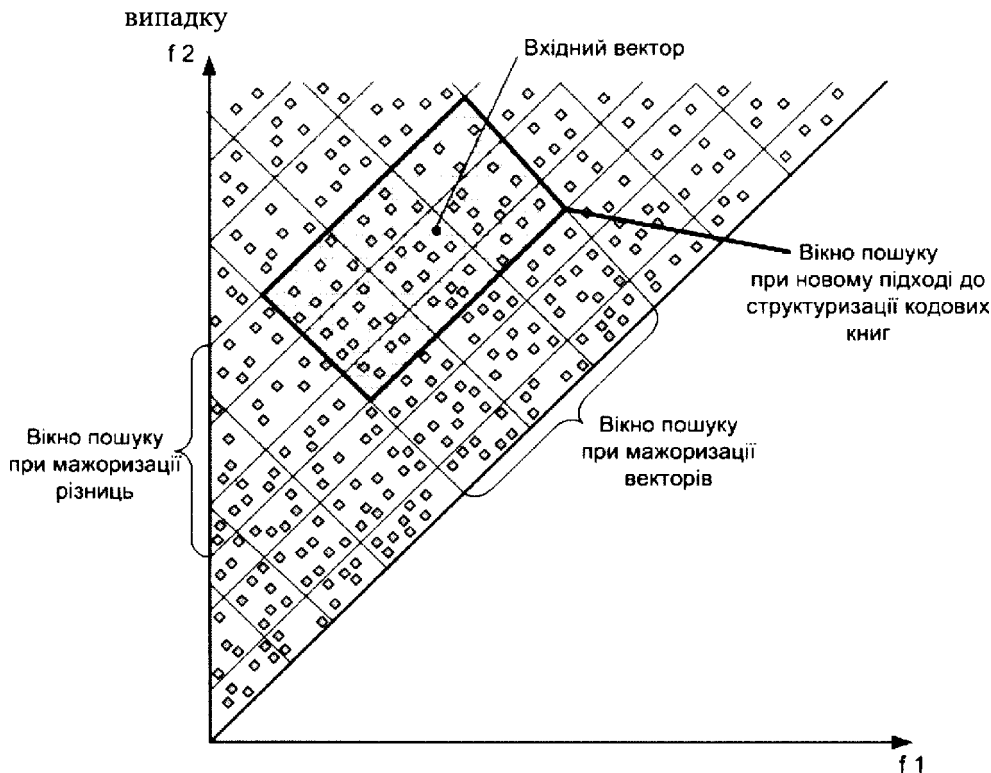


Рис. 3. Графічна інтерпретація структуризації векторних кодових книг за критеріями (5) і (7) для двовимірного випадку

Таким чином, при застосування критеріїв (5) та (7) вектори вже не просто ді-

ляться на рівні, а відбувається перехід від рівнів до комірок. Введемо деякі позна-

чення. Нехай дано вектор  $X$ . При структуризації за критерієм (5) даний вектор належить рівню  $L1_i (X \in L1_i)$ , а при структуризації за критерієм (7) – рівню  $L2_j (X \in L2_j)$ . При структуризації за обома критеріями даний вектор буде належати комірці  $C_{i,j} (X \in C_{i,j})$

### Формування вікна пошуку

Формування вікна пошуку відбувається окремо для кожної комірки кодової книги.

Для формування вікна пошуку можна застосувати різні підходи. Нехай задано число  $M$  – максимальна кількість векторів у вікні.

Перший підхід – це формування радіального вікна:

1. Переходимо до наступної комірки  $C_{i,j}$ ;
2. Встановлюємо радіус рівним нулю -  $R_{i,j} = 0$
3. Підраховуємо кількість  $M_{i,j}$  векторів у всіх комірках що знаходяться в межах радіусу
4. Якщо  $M_{i,j} > M$  зменшуємо радіус  $R_{i,j} = R_{i,j} - 1$  та переходимо до кроку 1, інакше  $R_{i,j} = R_{i,j} + 1$  та переходимо до кроку 3

Кроки 1-4 проводяться поки не буде сформовано вікно для всіх комірок в кодовій книзі.

Перевірка того чи комірка знаходиться в межах радіусу відбувається із застосуванням середньоквадратичної відстані. Тобто вважається, що комірка  $C_{k,l}$  знаходиться в межах радіусу  $R_{i,j}$  комірки  $C_{i,j}$  якщо:

$$R_{i,j} \geq \sqrt{(i-k)^2 + (j-l)^2} \quad (8)$$

Графічно це виглядає так, як представлено на рис. 4:

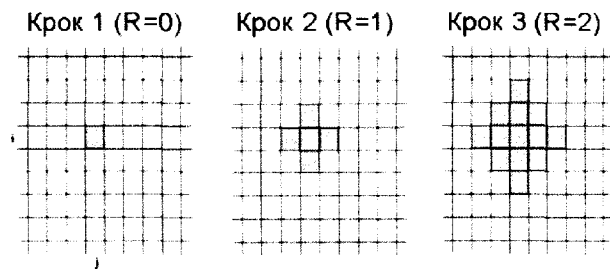


Рис. 4. Графічна інтерпретація формування радіального вікна

Другий підхід – формування прямокутного вікна:

1. Переходимо до наступної комірки  $C_{i,j}$ ;
2. Встановлюємо межі вікна рівними межах комірки.  
 $B_1 = B_3 = i, B_2 = B_4 = j$
3. Для кожної межі вікна  $B_k$  проводимо наступні операції:
  - a. Пересуваємо її у напрямку від комірки
  - b. Знаходимо кількість векторів, що лежать у межах вікна
  - c. Якщо кількість більше  $M$  – повертаємо дану межу до попереднього значення та запам'ятовуємо, що її вже не можна пересувати
  - d. Переходимо до пересування наступної межі
  - e. Якщо жодну межу вже не можна пересувати – переходимо до кроку 1, інакше – до кроку 3.

Кроки 1-3 проводяться поки не буде сформовано вікно для всіх комірок в кодовій книзі. Перевірка чи комірка знаходиться в межах вікна проводиться простим порівнянням. Тобто вважається, що комірка  $C_{k,l}$  знаходиться в межах вікна комірки  $C_{i,j}$  якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} k \geq B_1 \\ k \leq B_3 \\ l \geq B_2 \\ l \leq B_4 \end{cases}$$

Графічну інтерпретацію формування прямокутного вікна показано на рис. 5.

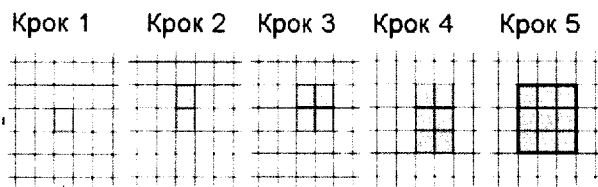


Рис. 5. Графічна інтерпретація формування прямокутного вікна

**Впорядкування різниць компонентів векторів**

Упорядкування, що задаються відношеннями (5) і (7), можна застосувати для побудови структурованих векторних кодових книг. Проте для довільних векторів критерій (7) не виконується. Тому введемо поняття рівнів мажоризації, відповідно до яких буде відбуватися розбиття на класи звичайної неструктурованої кодової книги. Рівні мажоризації формуються за таким правилом. Будемо вважати, що рівень мажоризації  $L_i$  мажорується рівнем мажоризації  $L_j$ , якщо для кожного вектора  $X$ , що належить  $L_i$ , на рівні  $L_j$  знайдеться вектор  $Y$ , що слабо мажорує  $X$ , або формально

$$\forall X, X \in L_i, \exists Y, Y \in L_j, X <_w Y \Rightarrow L_i < L_j, \quad (9)$$

Для довільних векторів критерій (5) також не виконується. Тому у роботі досліджувалися різні варіанти впорядкування із застосуванням різниць координат, крім критерію (5) (який називатимемо порівнянням різниць), а саме:

$$\sum_{i=1}^k (z_i - z_{i+1}) \geq \sum_{i=1}^k (y_i - y_{i+1}), \quad (10)$$

$k = 1, 2, \dots, n - 1$

Критерій (10) називатимемо мажоризацією різниць. Фактично від вектора координат розмірності  $n$  відбувається перехід до вектора різниць розмірності  $n-1$ , після чого відбувається мажоризація вектора різниць.

Можливо також застосування іншого критерію:

$$\sum_{i=1}^{n-1} (z_i - z_{i+1}) \geq \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - y_{i+1}) \quad (11)$$

Критерій (11) називатимемо порівнянням сум різниць.

**Дослідження різних підходів формування вікна**

Для тестування було відібрано два тексти. Перший з них містив 67 слів, що раніше використовувалися для створення кодових книг і був фонетично повним, тобто містив усі алофони української мови. Другий текст містив уривок з роману І. Нечуй-Левицького і був фонетично репрезентативним, тобто співвідношення різних алофонів у ньому відповідало такому ж співвідношенню у звичайному усному мовленні. Кожен текст надиктовувався трьома різними голосами: жіночим, чоловічим і дитячим, результати усереднювалися. Оцінювання результатів проводилося за відносною кількістю пропущених при швидкому пошуку векторів у кодовій книзі, що були найближчими до вхідного, а також за сумарним спектральним спотворенням  $SD$  [4, 5].

У таблиці 1 та на рис. 6 показано результати дослідження різних підходів до формування вікна пошуку для кодової книги  $5 \times 5$  розмірністю в 4096 вектори. При цьому застосовувався критерій (5) – порівняння різниць. Як можна бачити, за однакових розмірів вікна пошуку прямокутне вікно забезпечує меншу кількість пропущених векторів, тому у подальших дослідженнях застосовується саме воно.

Таблиця 1. Порівняння різних підходів до формування вікна пошуку

Вікно пошуку (кількість векторів)	% пропущених векторів	
	Прямокутне вікно	Радіальне вікно
100	62,92	56,90
200	36,07	32,70
300	5,42	20,56
400	2,17	10,85
500	1,61	7,00
600	0,98	4,16
700	0,98	2,82
800	0,81	1,75
900	0,72	1,18
1000	0,55	0,74



Рис. 6. Порівняння різних підходів до формування вікна пошуку

### Дослідження різних підходів до впорядкування різниць компонентів

У таблиці 2 та на рис. 7 наведено результати досліджень різних підходів до впорядкування різниць компонентів для кодової книги 5x5 в 4096 вектори. Для кожного підходу наведено спектральне спотворення SD та відсоток пропущених векторів M. Під мажоризацією векторів

тут мається на увазі застосування відношення мажоризації до компонентів вектора LSF тобто структуризація кодових книжок лише із застосуванням критерію (5). Найкращі результати забезпечуються із застосуванням мажоризації різниць, тобто за критерієм (10), дещо поступається йому критерій (5) – порівняння різниць.

Таблиця 2. Дослідження різних підходів до впорядкування різниць компонентів

Вікно пошуку (кількість векторів)	Мажоризація різниць		Порівняння різниць		Порівняння сум		Мажоризація векторів	
	M, %	SD, dB	M, %	SD, dB	M, %	SD, dB	M, %	SD, dB
100	23,88	0,8576	62,92	1,29	83,46	1,54	66,72	1,32
200	9,76	0,7965	36,07	0,8645	51,24	1,001	43,95	0,9412
300	5,23	0,7792	5,42	0,7798	30,7	0,8618	27,99	0,8595
400	2,92	0,7695	2,17	0,7695	18,42	0,8216	19,54	0,8554
500	2,04	0,7684	1,61	0,7674	10,52	0,8006	13,87	0,8125
600	1,32	0,7662	0,98	0,7661	6,26	0,7816	9,8	0,8034
700	0,97	0,7658	0,98	0,7661	3,57	0,7785	7,97	0,7868
800	0,83	0,7656	0,81	0,7654	2,03	0,7682	4,75	0,7796
900	0,55	0,7642	0,72	0,7652	1,16	0,7659	3,97	0,7791

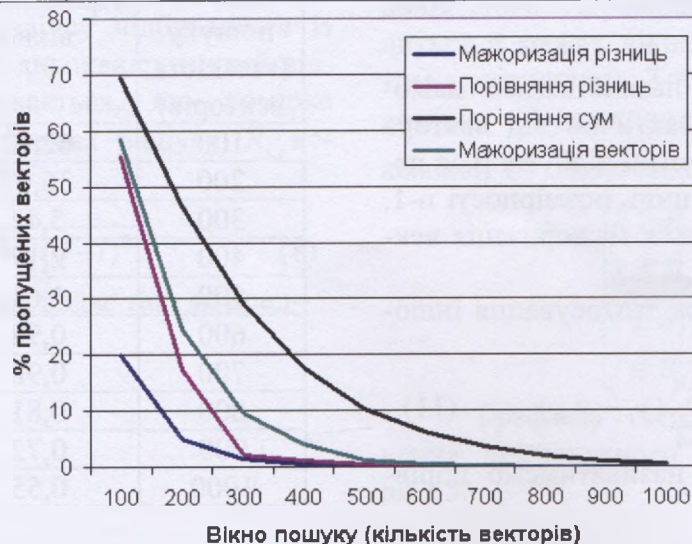


Рис. 7. Порівняння різних підходів до впорядкування різниць компонентів

### Висновки

У статті розроблено математичну модель впорядкування векторів у кодовій книзі із застосуванням теорії мажоризації. Вперше запропоновано метод структуризації кодових книг на основі відношення мажорювання, що дозволило зменшити вікно пошуку. Розроблено та досліджено різні алгоритми формування вікна пошуку та показано, що застосування прямокутного вікна дозволяє зменшити кількість пропущених векторів. Запропоновано та досліджено різні підходи до впорядкування різниць компонентів векторів і показано, що найкращі результати досягаються при мажоризації різниць векторів. Запропонований підхід дозволив зменшити обчислювальну складність процесу пошуку найближчого вектора за рахунок скорочення вікна пошуку до 700 векторів без суттєвого збільшення спектрального спотворення.

### Список літератури

1. *F. K. Soong and B. H. Juang* Line Spectrum Pair (LSP) and speech data compression. – ISASSP, 1984. – pp. 1.10.1 – 1.10.4.
2. *F. K. Soong and B. H. Juang* Optimal quantization of LSP parameters. – Proc. IEEE Inf. Conf. Acoust., Speech Signal Processing. – New York: 1988. – pp. 394 – 397.
3. *B. S. Atal, R. V. Cox, and P. Kroon* Spectral quantization and interpolation for CELP coders. – Proc. IEEE Inf. Conf. Acoust., Speech Signal Processing. – Glasgow: 1989. – pp. 69 – 72.
4. *K. K. Paliwal and B. S. Atal* Efficient vector quantization of LPC parameters at 24 bits/frame. – IEEE Transaction on Speech and Audio Processing, Vol.1, No. 2, 1993. – pp. 3 – 14.
5. *Біліченко Н. О., Ткаченко О. М., Феферман О. Д., Хрущак С. В.* LSF-вокодер на основі векторного квантування//Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2007. – Т. 9. – №1. – С. 35 – 41.
6. *J. Zhou, Y. Shoham, and A. Akansu* Simple fast vector quantization of

the line spectral frequencies // Image Compression and Encryption Technologies, vol. 4551, 2001. – pp. 274-282.

7. *А. Маршалл, И. Олкин.* Неравенства: теория мажоризации и ее приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 576 с.