

УДК 621.39

Н. О. Біліченко, О. М. Ткаченко, О. Д. Феферман, С. В. Хрущак
Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна

Швидкий пошук при векторному квантуванні лінійних спектральних частот

Запропоновано метод прискореного пошуку векторів у кодовій книзі, що базується на мажоризації векторів. Розроблено математичну модель і алгоритм структуризації кодових книг на основі відношення мажорювання векторів. Наведено результати експериментального дослідження запропонованого методу.

Ключові слова: кодування мови, мажоризація, LSF, векторне квантування, кодова книга, спектральне спотворення.

Вступ

У сучасних системах цифрового кодування мовних сигналів 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 до мовного сигналу. 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 в кодовій книзі в [4] запропоновано 10-мірний 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 розмірністю 3, 3 і 4. Проте повний пошук найближчого сусіда в неструктурованій кодовій книзі виявляється непридатним для багатьох практичних застосувань.

© Н. О. Біліченко, О. М. Ткаченко, О. Д. Феферман, С. В. Хрущак

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 складає порядку 25 % від складності обчислень при повному пошуку без суттєвої втрати продуктивності, що оцінювалася по спектральному спотворенню.

У даній статті пропонується новий підхід до впорядкування векторів у кодовій книзі, що дозволяє досягти подальшого зменшення складності обчислень. Як і методи, запропоновані в [6], підхід базується на пошуку в структурованій кодовій книзі. На рис. 1 наведено схему пошуку в такій книзі.

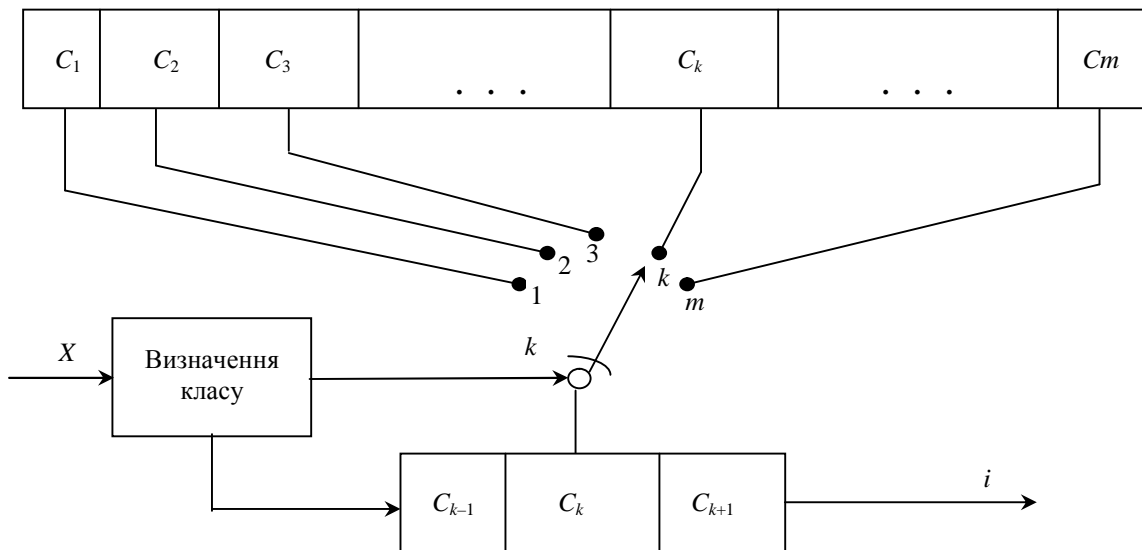


Рис. 1. Схема швидкого пошуку в структурованій кодовій книзі

Кодову книгу розбито на m класів, що не перекриваються між собою. Кількість векторів у кожному класі може бути різною. 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 в декількох сусідніх класах.

Структуровані кодові книги будуються для кожного підвектора незалежно. Як буде показано далі, складність обчислень при застосуванні запропонованого методу складає приблизно 23 % для кодової книги розміром у 4096 векторів і 20 % для кодової книги розміром у 1024 вектора від складності обчислень при повному пошуку без суттєвого збільшення спектрального спотворення.

Постановка задачі

Метою даної статті є зменшення складності обчислень за рахунок попереднього впорядкування векторів за відношенням мажорювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити математичну модель для впорядкування векторів згідно з відношенням мажорювання;
- розробити алгоритм мажоризації векторів і застосувати його для побудови структурованих векторних кодових книг;
- розробити метод пошуку векторів у структурованій векторній кодовій книзі;
- дослідити ефективність запропонованого методу.

Математична модель упорядкування векторів за відношенням мажорювання

Спочатку наведемо деякі визначення. Нехай задано вектори $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, $X, Y \in \mathfrak{R}^n$, компоненти яких упорядковано за незростанням. Говорять, що X мажорюється Y або Y мажорює X (позначається $X \prec Y$), якщо виконується [7]:

$$\sum_{i=1}^k x_i \leq \sum_{i=1}^k y_i, \quad k = 1, 2, \dots, n-1, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i.$$

Упорядкування, що задаються відношенням мажорювання (1), називають мажоризацією.

Якщо виконується нерівність

$$\sum_{i=1}^k x_i \leq \sum_{i=1}^k y_i, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

то говорять, що X слабо мажорюється Y або Y слабо мажорює X (позначається $X \prec_w Y$). Оскільки величини x_1, x_2, \dots, x_n та y_1, y_2, \dots, y_n при визначенні мажорювання перевпорядковуються за незростанням, їхні початкові впорядкування неважливі. Отже, той факт, що ці числа вважаються компонентами векторів для поняття мажорювання є несуттєвим. Проте нам зручно розглядати об'єкти $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ як вектори LSF-параметрів.

Упорядкування, що задається відношенням мажорювання (2), можна застосувати для побудови структурованих векторних кодових книг. Для цього звичайну неструктуровану векторну кодову книгу необхідно розбити на окремі класи, що формуються відповідно до рівнів мажоризації. Рівні мажоризації формуються за таким правилом. Будемо вважати, що рівень мажоризації L_i мажорюється рівнем мажоризації L_j , якщо для кожного вектора X , що належить L_i , на рівні L_j знайдеться вектор Y , що слабо мажорює X , або формально

$$\forall X, X \in L_i, \exists Y, Y \in L_j, X \prec_w Y \Rightarrow L_i \prec L_j. \quad (3)$$

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 вектора в кодовій книзі, що є найближчим до вхідного вектора X . При пошуку може застосовуватись як звичайна (незважена) евклідова метрика, де відстань D між векторами X і Y обчислюється за формулою

$$D^2(X, Y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2, \quad (4)$$

так і зважена евклідова метрика, що її запропоновано в [4].

Упорядкування векторів згідно з відношеннями мажорювання (2) і (3) можна було б вважати оптимальним для структуризації кодових книг, за умови виконання імплікації

$$X \prec_w Y \prec_w Z \Rightarrow D(X, Y) \leq D(X, Z). \quad (5)$$

Проте можна навести контрприклад, який показує, що (5) для довільних векторів може не виконуватися.

Контрприклад. Нехай задано вектори $X = (5, 1)$, $Y = (6, 6)$, $Z = (7, 5)$. Як можна бачити, нерівність (2) виконується, відповідно $X \prec_w Y \prec_w Z$. Проте, оскільки $D^2(X, Y) = 26$, $D^2(X, Z) = 20$, відповідно $D(X, Y) > D(X, Z)$, отже (5) не виконується.

Той факт, що нерівність (5) у загальному випадку не виконується, не означає неможливість упорядкування векторів у кодових книгах на основі відношення мажорювання, оскільки відомо, що в багатьох практичних застосуваннях цифрової обробки мовних сигналів субоптимальні методи дають непогані практичні результати. Тим не менш невиконання умови (5) для LSF-параметрів обумовлює необхідність пошуку інших варіантів структуризації кодових книг. Від LSF-параметрів можна перейти до векторів відстаней між цими параметрами та n точками відліку $V_0 = (0, 0, \dots, 0)$, $V_1 = (0, N_1, 0, \dots, 0)$, ..., $V_{n-1} = (0, 0, \dots, N_{n-1})$, де n — розмірність підвектора LSF-параметрів. Зазначимо, що числа N_1, \dots, N_{n-1} не обов'язково мають бути однаковими, тому точки відліку V_0, V_1, \dots, V_{n-1} можуть розглядатися як вершини деякого прямокутного гіперкуба.

Перехід від вектора LSF-параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ до вектора відстаней $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ задається формулами:

$$x'_1 = D(X, V_0), \dots, x'_n = D(X, V_{n-1}), \quad (6)$$

в яких відстань $D(X, V_i)$ обчислюється за формулою (4). Вектори відстаней X' заносяться в другу кодову книгу та впорядковуються за рівнями мажоризації згідно з правилом (3). Разом з ними перевпорядковуються відповідні вектори LSF-параметрів X . Процедуру мажоризації векторів розглянуто в наступному розділі.

Геометричну інтерпретацію мажоризації векторів для $n = 2$ представлено на рис. 2. Виконання відношення мажорирования $X \prec_w Y \prec_w Z$ означає, що точка X має знаходитися в середині кола та еліпса, на перетині яких розташовано точку Y . Це також означає, що точка Z має знаходитися зовні кола та еліпса. Як можна бачити на рис. 2, для точок X, Y, Z умова (5) виконується. Водночас для точок, що лежать у невеликому регіоні, обмеженому колом з центром у X і радіусом $r = D(X, Y)$ та еліпсом, і зокрема точки Z^* , умова (5) порушується, оскільки $D(X, Y) > D(X, Z^*)$. Проте з урахуванням того, що точки X, Y, Z обчислюються як центри кластерів, відстань між якими має бути максимальною, ймовірність невиконання (5) є досить низькою. До того ж, за рахунок відповідного вибору фокусів еліпса (значень N_i), цей регіон можна зробити наскільки завгодно малим, хоча це може призвести до небажаного скорочення кількості класів.

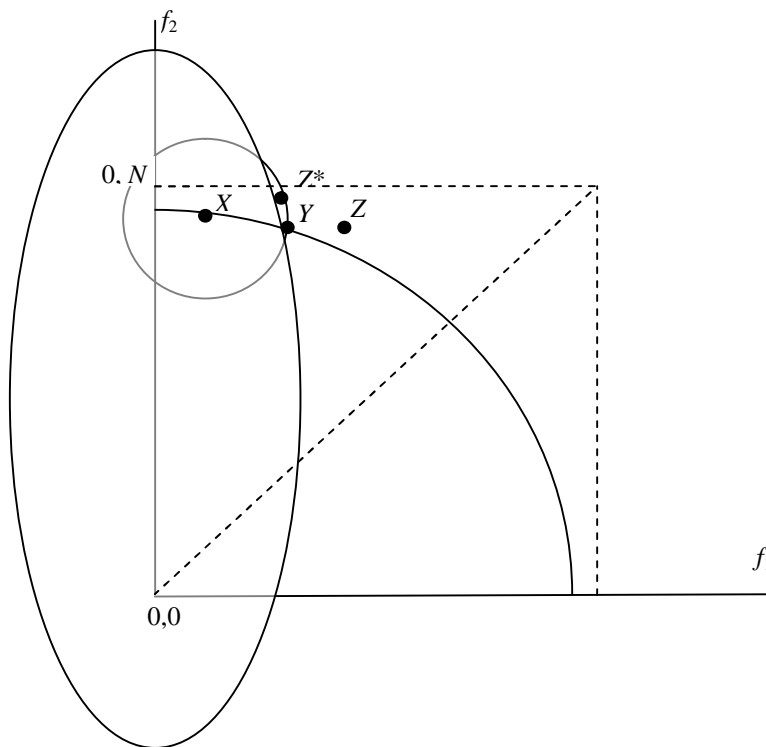


Рис. 2. Геометрична інтерпретація мажоризації векторів

Структуризація кодових книг

Структуровані кодові книги будуються для кожного підвектора незалежно. Структуризація векторної кодової книги починається з обчислення відстаней від векторів LSF-параметрів до точок відліку за формулами (6). Вектори відстаней X'

утворюють кодову книгу відстаней, розмірність якої збігається з розмірністю кодової книги LSF-параметрів. У подальшому для мажоризації використовуються вектори з кодової книги відстаней, але результатом буде синхронне впорядкування векторів у обох кодових книгах. Мажоризація відбувається за таким алгоритмом.

1. Вектори в кодовій книзі відстаней сортується у спадному порядку за компонентою x'_1 . Якщо в деяких векторів перші компоненти збігаються, їхнє сортування відбувається за наступними компонентами.

2. Усі вектори в кодовій книзі помічаються як немажоровані.

3. Створюється цикл від 1 до M , де M — кількість векторів у кодовій книзі.

3.1. У циклі за формулою (2) послідовно перевіряються всі вектори X'_1, \dots, X'_M .

3.2. Якщо знаходиться немажорований вектор X'_i , він помічається як мажорований і додається на рівень мажоризації L_j . Кількість рівнів мажоризації збільшується на 1.

3.3. Створюється цикл від $i+1$ до M .

3.3.1. У циклі за формулою (2) послідовно перевіряються всі вектори X'_{i+1}, \dots, X'_M .

3.3.2. Якщо знаходиться вектор, який не мажорується жодним вектором рівня L_j , він помічається як мажорований і додається на рівень мажоризації L_j .

Кількість створених рівнів мажоризації K (число класів у кодових книгах) дорівнює кількості повторів п. 3.3. Таким чином, робота алгоритму завершується за $M \times K$ ітерацій.

Результатом роботи алгоритму є векторна кодова книга, структурована за рівнями мажоризації. Оскільки застосування даного алгоритму гарантує, що кожен вектор мажорується лише один раз, класи, утворені згідно з відношенням мажорювання (2) та за правилом (3), не перекриваються між собою. При цьому кількість векторів на різних рівнях мажоризації може бути неоднаковою. Це необхідно врахувати при створенні процедури пошуку.

Даний алгоритм не накладає обмежень на метод кластеризації та може бути застосований для структуризації кодової книги, створеної за будь-яким алгоритмом.

Слід зазначити, що описаний вище підхід не гарантує розбиття кодових книг на максимальне число класів. Оптимізація кодових книг за рахунок вибору координат точок відліку V_0, V_1, \dots, V_{n-1} , порядку їхнього обходу, а також зменшення пам'яті, необхідної для зберігання кодової книги відстаней, у даній статті не розглядається.

Розробка методу пошуку квантованих векторів у кодовій книзі

Основна ідея прискореного пошуку полягає в тому, що найближчі до вхідного вектора квантовані вектори в кодовій книзі мають знаходитися на тому ж рівні мажоризації, що й вхідний вектор, або на сусідніх рівнях. За рахунок цього

з'являється можливість значно скоротити число кандидатів на відбір i , відповідно, зменшити час пошуку.

Пошук найближчого вектора відбувається в два етапи. На першому етапі вхідний вектор LSF-параметрів X перетворюється за формулами (6) у вектор відстаней до точок відліку X' . Далі у кодовій книзі відстаней відбувається пошук рівня мажоризації, якому належить вхідний вектор. При цьому послідовно, починаючи з верхнього, перевіряються всі рівні мажоризації. Якщо на рівні мажоризації L_j знаходиться вектор Y' , такий що $X' \prec_w Y'$, відбувається перехід до наступного рівня. При цьому решта векторів цього рівня не перевіряється. Пошук завершується, коли буде знайдено рівень L_k , на якому жоден вектор Y' не мажорує вхідний вектор X' , або коли досягається останній рівень мажоризації.

Слід зазначити, що перевірка відношення мажорювання (2) потребує набагато менше обчислювальних витрат порівняно з обчисленням відстані. До того ж, якщо відношення (2) виконується, воно є справедливим для одного з перших векторів цього рівня, що також скорочує час пошуку. Перевірка всіх векторів на деякому рівні мажоризації відбувається лише для того рівня L_k , якому належить вхідний вектор.

На другому етапі відбувається пошук найближчого до вхідного квантованого вектора на знайденому рівні мажоризації та кількох сусідніх рівнях. Пошук виконується в кодовій книзі LSF-параметрів за методом повного перебору, при цьому вибирається той вектор Y кодової книги, для якого $D(X, Y) = \min$.

Кількість векторів, що аналізуються на другому етапі, має бути фіксованою величиною, що залежить лише від необхідної точності пошуку і не залежить від кількості векторів на поточному рівні мажоризації та на сусідніх рівнях. Оскільки кількість векторів на рівнях мажоризації відрізняється, для кожного рівня обраховується номер рівня (або індекс вектора в кодовій книзі), з якого починається пошук. Залежність результатів пошуку від кількості векторів, що аналізуються, наводиться у наступному розділі.

Пошук проводиться для кожного підвектора незалежно. Результатом пошуку є індекс квантованого вектора в кодовій книзі.

Експериментальні дослідження методу прискореного пошуку векторів

Побудова векторних кодових книг виконувалася за умов, описаних у [5]. Досліджувалися два варіанта побудови кодових книг. За першим варіантом вектор LSF-параметрів було розбито на дві частини 5×5 , розміром по 4096 підвекторів кожна. За другим варіантом книга складалася з трьох частин з розбиттям $3 \times 3 \times 4$, розміром по 1024 підвектори кожна. Таким чином, обсяг даних, необхідних для представлення короткочасної спектральної інформації, становив відповідно 24 біти та 30 бітів.

Для тестування було відібрано два тексти. Перший з них містив 57 слів, що раніше використовувалися для створення кодових книг, і був фонетично повним. Другий містив відривок 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 табл. 1 наведено результати розподілу найближчих до вхідного векторів за рівнями, отриманими за результатами мажоризації. Як можна побачити, більше 99 % векторів знаходяться в межах ± 3 рівні. Графічно результати розподілу представлено на рис. 3.

Таблиця 1. Розподіл векторів за рівнями мажоризації

Відхилення від рівня мажоризації	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Відносна кількість векторів на рівні, %	0	0,05	0,07	0,57	2,44	9,69	21,05	28,88	25,87	8,94	2,30	0,14	0,01	0	0



Рис. 3. Розподіл векторів за рівнями мажоризації

У табл. 2 і 3 наведено результати дослідження кодових книг із розмірністю підвекторів 5×5 та $3 \times 3 \times 4$ відповідно.

Таблиця 2. Результати швидкого пошуку для кодової книги 5×5

№ з/п	Вікно пошуку m	Складність обчислень S , %	Кількість пропу- щених векторів, %	Спектральне спо- творення SD, dB
1	100	4,23	65,78	1,0202
2	200	6,96	37,45	0,8586
3	300	9,51	18,68	0,8009
4	400	12,19	4,31	0,7769
5	500	14,87	1,68	0,7656
6	600	17,56	0,46	0,7602
7	700	20,24	0,25	0,7576
8	800	22,92	0,15	0,7564
Повний пошук	4096	100	0	0,7557

Таблиця 3. Результати швидкого пошуку для кодової книги 3×3×4

№ з/п	Вікно пошуку m	Складність обчислень S , %	Кількість пропущених векторів, %	Спектральне спо- творення SD, dB
1	100	10,45	4,83	0,6194
2	120	12,40	2,52	0,6116
3	140	14,36	1,27	0,6078
4	160	16,31	0,61	0,6062
5	180	18,26	0,27	0,6055
6	200	20,21	0,13	0,6051
Повний пошук	1024	100	0	0,6047

Складність обчислень S при швидкому пошуку оцінювалась як сума відповідних величин на першому та другому етапі пошуку: $S = S_1 + S_2$. Складність обчислень на першому етапі S_1 залежить лише від кількості рівнів мажоризації K і не залежить від кількості векторів m , що аналізуються (вікна пошуку). За експериментальними даними обчислювальні витрати на аналіз одного рівня мажоризації для вхідного вектора складають приблизно 0,05 від витрат на обчислення відстані до одного вектора кодової книги. Отже

$$S_1 = \frac{0,05 \cdot K}{M} \cdot 100 \% ,$$

де M — кількість векторів у кодовій книзі. Середня кількість рівнів мажоризації $K = 120$ для кодової книги 5×5 та $K = 150$ для кодової книги 3×3×4.

Складність обчислень на другому етапі S_2 визначалася за формулою:

$$S_2 = \frac{m}{M} \cdot 100 \% .$$

На рис. 4 наведено результати порівняння кодових книг 5×5, структурованих за мажоризацією векторів X та їхніх відстаней X' . Перехід до мажоризації відстаней дозволяє суттєво поліпшити результати пошуку.

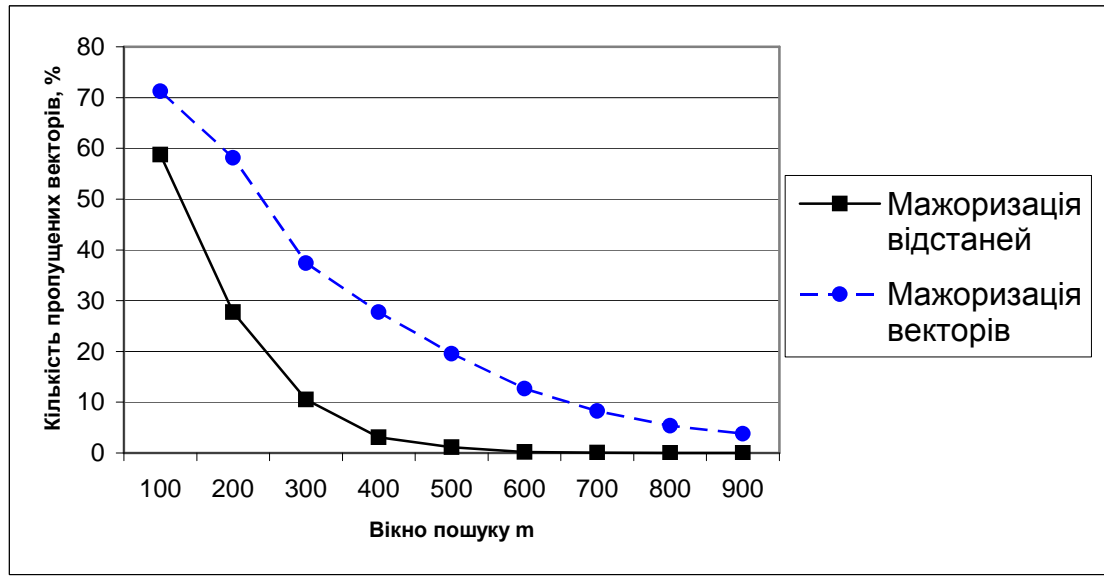


Рис. 4. Результати пошуку в кодовій книзі відстаней та кодовій книзі векторів з розмірністю підвекторів 5×5

У табл. 4 наведено результати порівняння трьох кращих методів, розроблених у [6], за методом швидкого пошуку, що базується на мажоризації відстаней векторів. Усі результати отримані для кодових книг із розмірністю підвекторів 3×3×4, кількість векторів — 1024. У дужках наведено спектральне спотворення, що можна отримати при повному пошуку векторів у кодовій книзі. Як можна побачити, запропонований метод дозволяє зменшити складність обчислень за рахунок додаткових витрат пам'яті.

Таблиця 4. Результати швидкого пошуку для кодової книги 3×3×4

Метод	Складність обчислень S , %	Кількість пропущених векторів, %	Спектральне спотворення SD, dB	Додаткові витрати пам'яті, %
Векторна квантизація	25,4	0,1	0,757 (0,757)	1,875
Класифікація за середнім	26,74	0,195	0,757 (0,757)	1,875
Середнє з вікном	24,90	0,25	0,757 (0,757)	30
Мажоризація векторів	20,21	0,13	0,6051 (0,6047)	105

Висновки

Запропоновано метод прискореного пошуку, що базується на попередньому впорядкуванні векторів у кодовій книзі. Вектори впорядковуються за відношенням мажорювання відстаней до заданих точок відліку. Розроблено математичну модель й алгоритм мажоризації кодових книг, які було застосовано для структуризації кодових книг. Результати експериментальних досліджень продемонстрували, що складність обчислень при застосуванні запропонованого методу складає 23 % для кодової книги з розмірністю підвекторів 5×5 і 20 % для кодової книги з розмірністю підвекторів $3 \times 3 \times 4$.

1. *Soong F.K. and Juang B.H.* Line Spectrum Pair (LSP) and Speech Data Compression. — ISASSP, 1984. — P. 1.10.1–1.10.4.
2. *Soong F.K. and Juang B.H.* Optimal Quantization of LSP Parameters // Proc. IEEE Inf. Conf. Acoust., Speech Signal Processing. — New York: 1988. — P. 394–397.
3. *Atal B.S., Cox R.V. and Kroon P.* Spectral Quantization and Interpolation for CELP Coders // Proc. IEEE Inf. Conf. Acoust., Speech Signal Processing. — Glasgow: 1989. — P. 69–72.
4. *Paliwal K.K. and Atal B.S.* Efficient Vector Quantization of LPC Parameters at 24 bits/frame // IEEE Transaction on Speech and Audio Processing. — 1993. — Vol. 1, N. 2. — P. 3–14.
5. *Біліченко Н.О., Ткаченко О.М., Феферман О.Д., Хрущак С.В.* LSF-вокодер на основі векторного квантування // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 1. — С. 35–41.
6. *Zhou J., Shoham Y. and Akansu A.* Simple Fast Vector Quantization of the Line Spectral Frequencies // Image Compression and Encryption Technologies. — 2001. — Vol. 4551. — P. 274–282.
7. *Маршалл А., Олкин И.* Неравенства: теория мажоризации и ее приложения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 576 с.

Надійшла до редакції 22.01.2008