УДК 621.396.21

МАТРИЧНА ФОРМА МЕТОДУ ЛСП-НР

Павлов О. І.
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем НАН України і Міністерства освіти і науки України, Київ

MATRIX FORM OF THE LSP-HS METHOD

Pavlov O. I.
International Research and Training Centre of Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry Education and Science of Ukraine, Kiev

Вступ

В роботах [1-7] був описаний новий метод кодування форми спектральної обвідної мовленнєвих сигналів, який дістав назву ЛСП-НР (метод лінійних спектральних параметрів найвищого розщеплення). Вказаний метод є доцільним для застосування в пристроях перетворення мовленнєвих сигналів приймально-передавальної апаратури, які працюють на основі лінійного прогнозування (ЛП). Суть методу полягає в тому, що характеристику $A(z)$ фільтру аналізу M-порядку, яка подається одним сталим поліномом степеня M,

$$A(z) = 1 - \sum_{i=1}^{M} a_i' z^{-i} = 1 + \sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}\,, \tag{1}$$

пропонується подавати за допомогою M елементарних приведених сталих поліномів 1-го степеня

$$A^{vvv}(z) = 1 + a_1^{vvv} z^{-1}, \tag{2}$$

які є результатом поетапного розщеплення оригінального полінома $A(z)$ при його прямому перетворенні (ПП), рис. 1.) де використовуються такі позначення [1]: однотипні поліноми, наприклад, $A(z)$, $P(z)$, $Q(z)$, $G(z)$, $H(z)$, $D(z)$, $S(z)$, їх коефіцієнти (a_1, … s_1, …), їх степені (M_A, M_P, M_Q, …), та їх корені, які зустрічаються на кожному етапі перетворення, позначаються однаковими символами, а для відображення історії їх утворення (гілки розщеплення) використовується ланцюжок верхніх символьних індексів (рядкових символів p та q, а також символу v (від англійського «*variation*»), котрий використовується для позначення будь-якого з символьних індексів p або q). Наприклад: запис $G^{pq}(z)$ означає поліном $G(z)$, утворений за такою послідовністю перетворень: $A(z)$ → гілка $P(z)$ 1-го етапу → гілка $Q(z)$ 2-го етапу → поліном $G(z)$ 2-го етапу.

Корені елементарних поліномів (2), $A^{vvv}(z)=1+a_1^{vvv}z^{-1}$, є лінійними спектральними *проекціями* найвищого розщеплення (ЛСПр-НР).

Арккосинуси коренів елементарних поліномів, $A^{vvv}(z)=1+a_1^{vvv}z^{-1}$, є лінійними спектральними *частотами* найвищого розщеплення (ЛСЧ-НР).

Безпосереднє застосування формул перетворень, наведених в [1-7] дає суттєвий виграш за багатьма показниками, але все ще залишається громіздким, а запропоновані параметри потребують додаткового фізичного тлумачення. Ці питання є надзвичайно актуальними і саме тому становлять об'єкт дослідження в рамках даної статті.

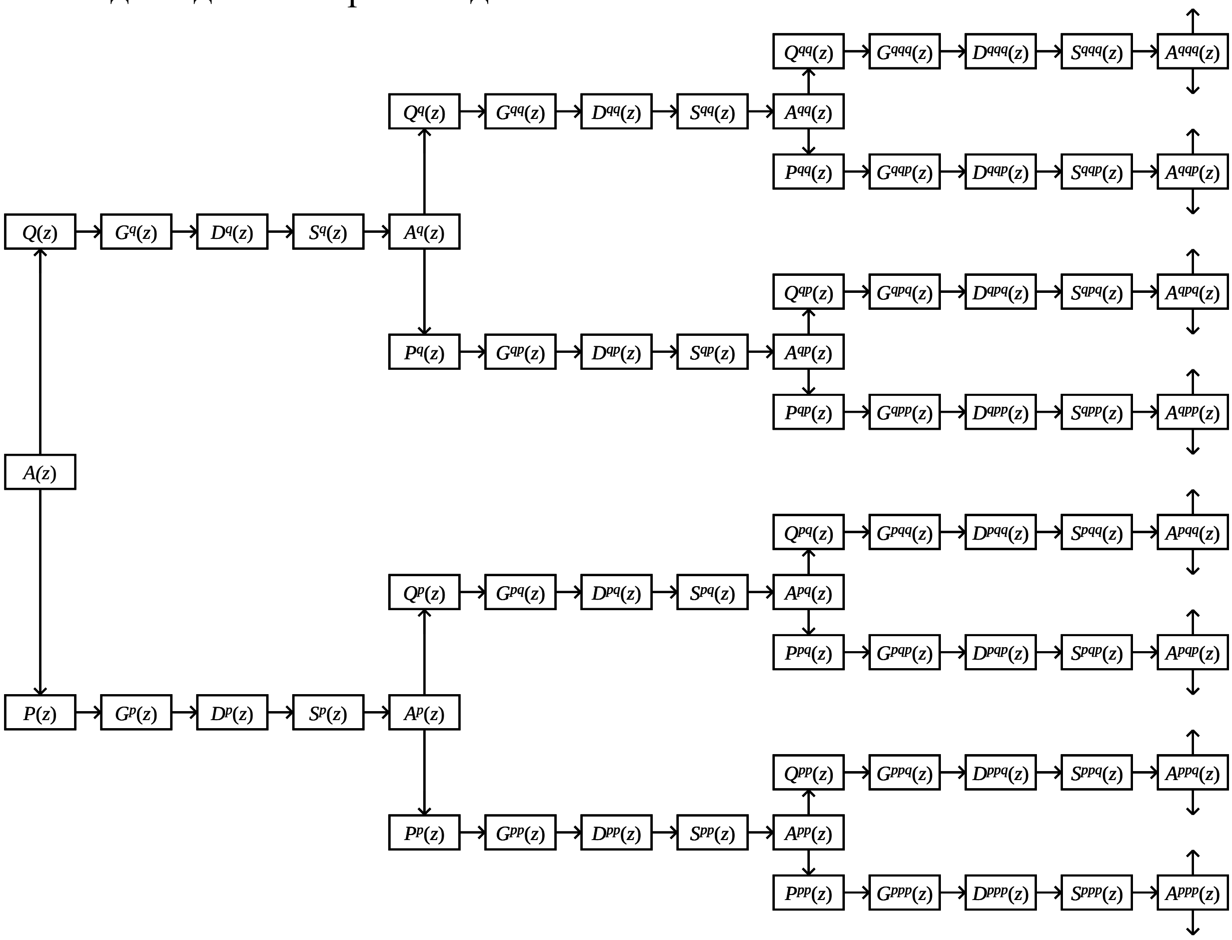


Рис. 1. Структура ПП методу ЛСП-НР для перших 3-х етапів

Аналіз публікацій та формулювання завдання досліджень. Переваги ЛСП-НР перед класичними ЛСП

Було показано [1 — 10], що класичний метод ЛСЧ та ЛСПр є лише першим етапом розщеплення методу ЛСЧ-НР та ЛСПр-НР.

Перехід від класичних (першого етапу розщеплення) ЛСП до ЛСП-НР дозволяє зберегти приваби класичного методу та одночасно отримати ряд додаткових переваг:

1. Процес представлення фільтру аналізу (1), $A(z)=1-\sum_{i=1}^{M}a_i'z^{-i}=1+\sum_{i=1}^{M}a_iz^{-i}$, у вигляді ЛСП-НР спрощується та набуває строгий, логічно завершений вигляд. Корені елементарних поліномів (2), $A^{vvvv}(z)=1+a_1^{vvvv}z^{-1}$, обчислюються тривіально, без застосування ітераційних методів їх оцінки, бо з точністю до знаку дорівнюють коефіцієнтам a_i^{vvvv}. Елементарні поліноми, у випадку їх отримання на ранніх етапах розщеплення, залишаються інваріантними до подальших етапів розщеплення незалежно від значення M в (1), $A(z)=1-\sum_{i=1}^{M}a_i'z^{-i}=1+\sum_{i=1}^{M}a_iz^{-i}$, [1, 2, 7].

2. Усувається методична похибка оцінки ЛСП, яка притаманна класичному методу через застосування ітераційного пошуку явних коренів пари поліномів $D^p(x)$ и $D^q(x)$, які у випадку ЛП 10 порядку мають вигляд $D^v(x)=x^5+d_1^vx^4+d_2^vx^3+d_3^vx^2+d_4^vx+d_5^v$ (де символ v означає один з двох символів p або q) [1, 2].

3. Прискорюється алгоритм представлення коефіцієнтів лінійного прогнозування (КЛП) у вигляді ЛСП [3, 4].

4. Необхідний обчислювальний ресурс більш рівномірно розподіляється між аналізатором передавальної частини і синтезатором приймальної частини пристроїв перетворення мовлення [5, 6].

5. Існує просте правило кодування ланцюжка верхніх символьних індексів у коефіцієнтах s_i^{vvvv} (де $s_i^{vvvv}\equiv a_i^{vvvv}$), що відображає історію утворення коефіцієнтів в процесі поетапного розщеплення від (1), $A(z)=1-\sum_{i=1}^{M}a_i'z^{-i}=1+\sum_{i=1}^{M}a_iz^{-i}$, до (2), $A^{vvvv}(z)=1+a_1^{vvvv}z^{-1}$, яке дозволяє перейти до числових індексів у коефіцієнтах $s_1,\ldots,s_M$, і навпаки, від числових індексів до ланцюжка верхніх символьних індексів [7]. Числові індекси дозволяють намалювати граф коефіцієнтів ЛСП-НР, рис. 2, і визначити появу елементарних інваріантних приведених сталих поліномів 1-го степеня (2), $A^{vvvv}(z)=1+a_1^{vvvv}z^{-1}$, на ранніх етапах розщеплення для довільного значення M в (1), $A(z)=1-\sum_{i=1}^{M}a_i'z^{-i}=1+\sum_{i=1}^{M}a_iz^{-i}$, [7], додатково скоротивши число обчислювальних операцій.

6. Існує простий критерій сталості фільтру синтезатора в термінах ЛСП-НР з числовими індексами у коефіцієнтах $s_1,\ldots,s_M$, інваріантний для будь-якого M, [7]: $-1 < s_1 < s_2 < s_3 < \ldots < s_M < 1$.

7. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку при виконанні операції міжкадрової інтерполяції в порівнянні з іншими еквівалентними параметрами, в тому числі класичними (першого етапу розщеплення) ЛСП, [8].

8. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку векторного квантування в порівнянні з іншими еквівалентними параметрами, в тому числі класичними (першого етапу розщеплення) ЛСП, [9].

9. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку прогнозування форми спектральної обвідної мовленнєвого сигналу на підставі відомих її значень на попередніх кадрах, [10].

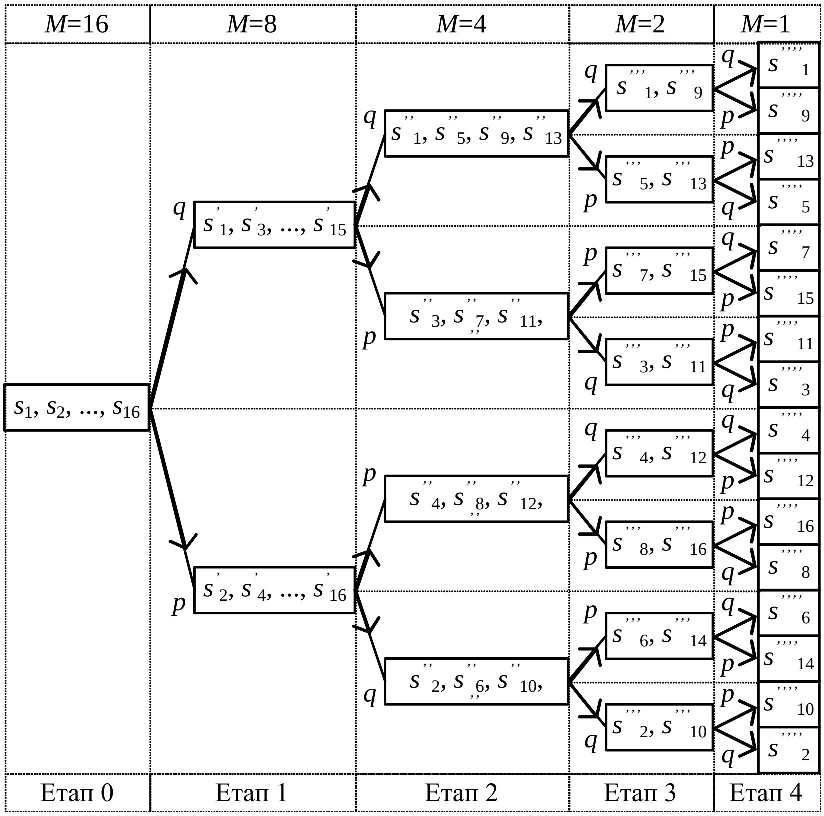


Рис. 2. Граф утворення коефіцієнтів ЛСП-НР для $M = 16$
(для кожного етапу показано, як змінюється значення степеня M)

Для зменшення алгоритмічної складності методу ЛСП-НР та з'ясування фізичного смислу його параметрів знайдемо одну з можливих матричних форм прямого та зворотного перетворень, наведених в [1-7].

Матрична форма зворотного перетворення ЛСП-НР

Всі операції зворотного перетворення (ЗП) в методі ЛСП-НР є лінійними, а КЛП, які відновлюються з коефіцієнтів ЛСП-НР в результаті ЗП можуть бути визначені за допомогою узагальненої лінійної функції 10 змінних: $a_i = f_i(s_1, s_2, ..., s_{10}) = f_{i,0} + f_{i,1}s_1 + f_{i,2}s_2 + ... + f_{i,10}s_{10}$, де $s_1 = s_1^{qqqq}$, $s_2 = s_1^{pqqq}$, $s_3 = s_1^{qpqq}$, …, $s_{10} = s_1^{pqqp}$ — впорядковані коефіцієнти ЛСП-НР з цифровими індексами, які відповідають нумерації, починаючи з одиниці. Такі коефіцієнти задовольняють правилу:

$$-1 < s_1 < s_2 < s_3 < s_4 < s_5 < s_6 < s_7 < s_8 < s_9 < s_{10} < +1. \quad (3)$$

Цифрова індексація коефіцієнтів ЛСП-НР однозначно пов'язана з їх символьною індексацією, яка відображає історію поетапного розщеплення поліномів в ПП ЛСП-НР. Цей зв'язок визначений таким правилом:

1. Кожному символьному індексу q и p ставиться у відповідність логічний нуль та логічна одиниця (q=0, p=1).

2. Ланцюжок індексів q и p, який відображає історію утворення коефіцієнтів в результаті поетапного розщеплень поліномів в ПП ЛСП-НР, розглядається як двійковий код з такою вагою кожного біту: вага першого етапу — 2^0, вага другого етапу — 2^1, та так далі.

3. Для зручності до кожного цифрового індексу, який обчислюється за означеним двійковим кодом додається одиниця, що приводить до нумерації коефіцієнтів, починаючи з одиниці (на відміну від індексації, яка починається з нуля).

В табл.1 наведено приклад вказаного зв'язку для перших 16 номерів коефіцієнтів.

Отже, функцію $a_i = f_i(s_1, s_2, ..., s_{10})$ можна переписати в більш компактному вигляді: $a_i = \sum_{j=0}^{M_A} f_{i,j} s_j$, де $s_0 \equiv 1$ — умовний параметр, введений для зручності, $M_A = 10$ — порядок ЛП та степінь поліному $A(z) = 1 + \sum_{i=1}^{M_A} a_i z^{-i}$.

Таблиця 1

Зв'язок символьних і цифрових індексів для $M_A = 16$

Ланцюжок символьних індексів	Ланцюжок бінарних індексів з вагою $2^0 2^1 2^2 2^3$	Цифровий індекс, починаючи з 0	Номер, починаючи з 1	Ланцюжок символьних індексів	Ланцюжок бінарних індексів з вагою $2^0 2^1 2^2 2^3$	Цифровий індекс, починаючи з 0	Номер, починаючи з 1
qqqq	0000	0	1	*pqqq*	1000	1	2
qqqp	0001	8	9	*pqqp*	1001	9	10
qqpq	0010	4	5	*pqpq*	1010	5	6
qqpp	0011	12	13	*pqpp*	1011	13	14
qpqq	0100	2	3	*ppqq*	1100	3	4
qpqp	0101	10	11	*ppqp*	1101	11	12
qppq	0110	6	7	*pppq*	1110	7	8
qppp	0111	14	15	*pppp*	1111	15	16

Коефіцієнти a_i поліному

$$A(z) = 1 + \sum_{i=1}^{M_A} a_i z^{-i} \tag{4}$$

можна об'єднати у вектор $\mathbf{A} = [1 \quad a_1 \quad a_2 \quad ... \quad a_{10}]^{\mathrm{T}}$, а значення комплексної змінної z^{-i}, $0 \le i \le 10$, — у вектор $\mathbf{Z} = [1 \quad z^{-1} \quad z^{-2} \quad ... \quad z^{-10}]^{\mathrm{T}}$. Тоді

$$A(z) = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}. \tag{5}$$

По аналогії можна об'єднати у вектор результат ПП КЛП в простір ЛСП-НР, $\mathbf{S} = [1 \quad s_1 \quad s_2 \quad ... \quad s_{10}]^{\mathrm{T}}$. З урахуванням лінійної залежності

$a_i = f_i(s_1, s_2, ..., s_{10}) = f_{i,0} + f_{i,1}s_1 + f_{i,2}s_2 + ... + f_{i,10}s_{10}, \quad 0 \le i \le 10$, можна записати:

$\begin{cases} a_1 = f_1(s_1, s_2, ..., s_{10}) \\ a_2 = f_2(s_1, s_2, ..., s_{10}) \\ ... \\ a_{10} = f_{10}(s_1, s_2, ..., s_{10}) \end{cases}$, або $\begin{cases} f_{1,0} + f_{1,1}s_1 + f_{1,2}s_2 + ... + f_{1,10}s_{10} = a_1 \\ f_{2,0} + f_{2,1}s_1 + f_{2,2}s_2 + ... + f_{2,10}s_{10} = a_2 \\ ... \\ f_{10,0} + f_{10,1}s_1 + f_{10,2}s_2 + ... + f_{10,10}s_{10} = a_{10} \end{cases}$. До вказаної системи можна додати тривіальне 11-е рівняння:

$$\begin{cases} 1 + 0 \cdot s_1 + 0 \cdot s_2 + ... + 0 \cdot s_{10} = 1 \\ f_{1,0} + f_{1,1}s_1 + f_{1,2}s_2 + ... + f_{1,10}s_{10} = a_1 \\ f_{2,0} + f_{2,1}s_1 + f_{2,2}s_2 + ... + f_{2,10}s_{10} = a_2 \\ ... \\ f_{10,0} + f_{10,1}s_1 + f_{10,2}s_2 + ... + f_{10,10}s_{10} = a_{10} \end{cases}, \quad \begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & ... & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & ... & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & ... & f_{2,10} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & ... & f_{10,10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ s_2 \\ ... \\ s_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ ... \\ a_{10} \end{bmatrix} \text{ або}$$

$$\mathbf{FS} = \mathbf{A}, \text{ де } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & ... & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & ... & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & ... & f_{2,10} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & ... & f_{10,10} \end{bmatrix}, \; f_{0,0} = 1, \; f_{0,i} = 0, \; 1 \le i \le 10. \qquad (6)$$

Абстрагуючись від критерію стійкості фільтра синтезу в термінах ЛСП-НР, та діючи формально, можна задати 11 тестових векторів:

$$\mathbf{S}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ .. \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ .. \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ .. \\ 0 \end{bmatrix}, \ldots, \mathbf{S}_{10} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ .. \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ та тестову матрицю } \tilde{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & ... & 1 \\ 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ .. & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \end{bmatrix}$$

За допомогою алгоритму ЗП ЛСП-НР в КЛП, $\mathbf{A} = \mathrm{rpt}(\mathbf{S})$, для кожного тестового вектору $\mathbf{S}_0$, $\mathbf{S}_1$, $\mathbf{S}_2$, …, $\mathbf{S}_{10}$ можна знайти відповідні 11 результуючих векторів КЛП $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$, …, $\mathbf{A}_{10}$, які в свою чергу мають задовольняти матричному рівнянню (6), $\mathbf{FS} = \mathbf{A}$. Тоді можна записати таке матричне рівняння:

$$\begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & ... & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & ... & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & ... & f_{2,10} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & ... & f_{10,10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & ... & 1 \\ 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ .. & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & ... & 1 \\ a_{0,1} & a_{1,1} & a_{2,1} & ... & a_{10,1} \\ a_{0,2} & a_{1,2} & a_{2,2} & ... & a_{10,2} \\ .. & ... & ... & ... & ... \\ a_{0,10} & a_{1,10} & a_{2,10} & ... & a_{10,10} \end{bmatrix}. \qquad (7)$$

В отриманому матричному рівнянні матрицю $\tilde{\mathbf{E}}$ можна привести до одиничного вигляду. Остаточно матриця ЗП ЛСП-НР $\mathbf{F}$, визначена через складові результуючих векторів КЛП, є такою:

$$\mathbf{F}=\begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & \cdots & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,10} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & \cdots & f_{10,10} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{0,1} & a_{1,1}-a_{0,1} & a_{2,1}-a_{0,1} & \cdots & a_{10,1}-a_{0,1} \\ a_{0,2} & a_{1,2}-a_{0,2} & a_{2,2}-a_{0,2} & \cdots & a_{10,2}-a_{0,2} \\ .. & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{0,10} & a_{1,10}-a_{0,10} & a_{2,10}-a_{0,10} & \cdots & a_{10,10}-a_{0,10} \end{bmatrix}.$$

Значення елементів матриці ЗП ЛСП-НР $\mathbf{F}$, які були отримані в результаті обчислень за наведеними вище викладками для $M_A = 10$ є такими:

F

5						1	3	5	7	9
	6	0			4	4			0	6
10	4	8		8	4				28	84
	26	4	14	6			6	14	4	26
10	26	14	14			6	6	4	4	126
	4	28			4	4			28	4
5	6	20			4			8	0	36
		7		3			3		7	
		1		1		1		1		1

(8)

Матрична форма прямого перетворення ЛСП-НР

Аналогічним чином можуть бути проаналізовані операції ПП КЛП в ЛСП-НР і може бути показано, що все операції ЗП $\mathbf{S} = \mathrm{dpt}(\mathbf{A})$ є також лінійними. Тоді, по аналогії, коефіцієнти ЛСП-НР можуть бути визначені за допомогою узагальненої лінійної функції 10 змінних: $s_i = \phi_i(a_1, a_2, ..., a_{10}) = \phi_{i,0} + \phi_{i,1}a_1 + \phi_{i,2}a_2 + ... + \phi_{i,10}a_{10}$, що приводить до матричного рівняння

$$\mathbf{\Phi A} = \mathbf{S}\text{, де } \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \phi_{0,0} & \phi_{0,1} & \phi_{0,2} & \cdots & \phi_{0,10} \\ \phi_{1,0} & \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \cdots & \phi_{1,10} \\ \phi_{2,0} & \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \cdots & \phi_{2,10} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \phi_{10,0} & \phi_{10,1} & \phi_{10,2} & \cdots & \phi_{10,10} \end{bmatrix},\ \phi_{0,0}=1,\ \phi_{0,i}=0,\ 1\le i\le 10. \quad (9)$$

Розв’язуючи таке рівняння в спосіб, аналогічний описаному вище, можна отримати матрицю ПП ЛСП-НР $\mathbf{\Phi}$, визначену через складові результуючих векторів ЛСП-НР, яка є такою:

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \phi_{0,0} & \phi_{0,1} & \phi_{0,2} & \dots & \phi_{0,10} \\ \phi_{1,0} & \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \dots & \phi_{1,10} \\ \phi_{2,0} & \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \dots & \phi_{2,10} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{10,0} & \phi_{10,1} & \phi_{10,2} & \dots & \phi_{10,10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s_{0,1} & s_{1,1}-s_{0,1} & s_{2,1}-s_{0,1} & \dots & s_{10,1}-s_{0,1} \\ s_{0,2} & s_{1,2}-s_{0,2} & s_{2,2}-s_{0,2} & \dots & s_{10,2}-s_{0,2} \\ .. & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{0,10} & s_{1,10}-s_{0,10} & s_{2,10}-s_{0,10} & \dots & s_{10,10}-s_{0,10} \end{bmatrix}.$$

Значення елементів матриці ПП ЛСП-НР $\mathbf{\Phi}$, які були отримані в результаті обчислень за наведеними вище викладками для $M_A = 10$ є такими:

Φ =										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.99804688	0.00195313	0.00195313	0.00195313	0.00195313	0.00195313	0.0019531	0.00195313	0.00195313	0.00195313	0.0019 313
-0.97851563	0.01757813	0.01367188	0.00976563	0.00585938	0.00195313	-0.00195313	-0.00585938	-0.00976563	-0.01367188	-0.01757813
-0.89062500	0.07031250	0.03906250	0.01562500	0.00000000	-0.00781250	-0.00781250	0.00000000	0.01562500	0.03906250	0.07031250
-0.65625000	0.16406250	0.05468750	0.00000000	-0.01562500	-0.00781250	0.00781250	0.01562500	0.00000000	-0.05468750	-0.16406250
-0.24609375	0.24609375	0.02734375	-0.02734375	-0.01171875	0.01171875	0.01171875	-0.01171875	-0.02734375	0.02734375	0.24609375
0.24609375	0.24609375	-0.02734375	-0.02734375	0.01171875	0.01171875	-0.01171875	-0.01171875	0.02734375	0.02734375	-0.24609375
0.65625000	0.16406250	-0.05468750	0.00000000	0.01562500	-0.00781250	-0.00781250	0.01562500	0.00000000	-0.05468750	0.16406250
0.89062500	0.07031250	-0.03906250	0.01562500	0.00000000	-0.00781250	0.00781250	0.00000000	-0.01562500	0.03906250	-0.07031250
0.97851563	0.01757813	-0.01367188	0.00976563	-0.00585938	0.00195313	0.00195313	-0.00585938	0.00976563	-0.01367188	0.01757813
0.99804688	0.00195313	-0.00195313	0.00195313	-0.00195313	0.00195313	-0.00195313	0.00195313	-0.00195313	0.00195313	-0.00195313

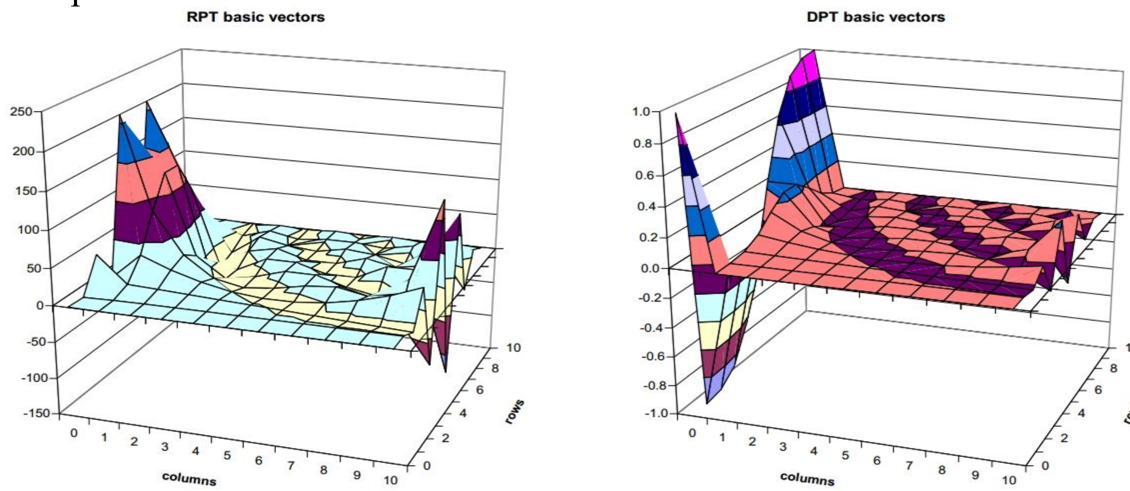
(10)

Базисні вектори матричного методу ЛСП-НР

Матриці ПП (10) та ЗП (8) методу ЛСП-НР можна обчислити для будь-якого степеня M_A. ПП та ЗП методу ЛСП-НР можна розглядати як розкладання за відповідними базисними векторами.

Вигляд базисних векторів ПП та ЗП методу ЛСП-НР для $M_A = 10$ наведено на рис. 3.

Вигляд базисних векторів ПП та ЗП методу ЛСП-НР для $M_A = 10$ наведено на рис. 3.



а б

Рис. 3. Базисні вектори ЗП (*а*) та ПП (*б*) методу ЛСП-НР для $M_A = 10$

Оцінка спектральної обвідної в просторі ЛСП-НР

Підставляючи (6) в (5) можна отримати новий вираз для обчислення поліному (4) через коефіцієнти ПП ЛСП-НР: $A(z)=\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}=\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}=(\mathbf{FS})^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}=\mathbf{S}^{\mathrm{T}}(\mathbf{F}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z})=(\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{F})\mathbf{S}$, або $A(z)=\mathbf{S}^{\mathrm{T}}\widetilde{\mathbf{Z}}=\widetilde{\mathbf{Z}}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}$, де $\tilde{\mathbf{Z}}$ є вектор, повернутий за напрямками базисних векторів ЗП ЛСП-НР $\mathbf{F}$:

$$\widetilde{\mathbf{Z}}=(\mathbf{F}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z})=\begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & \cdots & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,10} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & \cdots & f_{10,10} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} 1 \\ z^{-1} \\ z^{-2} \\ \cdots \\ z^{-10} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Використовуючи підстановку $z=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\omega/\omega_s}$, де ω_s — кругова частота дискретизації, можна отримати значення спектральної обвідної синтезованого мовленнєвого сигналу для заданої частоти ω:

$$K(\mathrm{j}\omega)=\left.\frac{1}{A(z)}\right|_{z=\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\omega/\omega_s}}=\left(\begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ s_2 \\ \cdots \\ s_{10} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \left(\begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} & \cdots & f_{0,10} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,10} \\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,10} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{10,0} & f_{10,1} & f_{10,2} & \cdots & f_{10,10} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\omega/\omega_s} \\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi\omega/\omega_s} \\ \cdots \\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}20\pi\omega/\omega_s} \end{bmatrix}\right)\right)^{-1}. \quad (12)$$

Підсумки

Показано, що ПП та ЗП методу ЛСП-НР можна розглядати як певне матричне перетворення над коефіцієнтами поліному (4). Лінійні спектральні параметри найвищого розщеплення є трансформантами такого матричного перетворення. Наведено методику визначення матриць ПП та ЗП методу ЛСП-НР. Матриці ПП та ЗП ЛСП-НР можна обчислити для довільного M_A в (4). Визначено матриці ПП (10) та ЗП (8) методу ЛСП-НР для $M_A=10$. Наведено вигляд базисних векторів ПП та ЗП методу ЛСП-НР, рис. 3. Отримана формула (12) оцінки спектральної обвідної синтезованого мовленнєвого сигналу в просторі ЛСП-НР.

Висновки

Метод ЛСП-НР може застосовуватися в матричному вигляді. Запропонована матрична форма методу ЛСП-НР дає можливість задіяти стандартний математичний апарат для опису форми спектральної обвідної мовленнєвого сигналу не тільки в просторі КЛП, але і в просторі ЛСП-НР, чого неможна зробити в просторі класичних (першого етапу розщеплення) ЛСП. Матрична форма методу ЛСП-НР дозволяє одержати альтернативні структури фільтрів аналізу і синтезу мовлення, параметрами яких є не класичні КЛП, а коефіцієнти простору ЛСП-НР, що розкриває фізичний смисл переходу від КЛП до ЛСП в алгоритмах кодування мовлення.

Перелік посилань

1. Павлов О. И. Прямое П-преобразование в линейном предсказании речи // Радиоэлектроника. — 2000. — N12. — С. 53—66. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Павлов О. И. Упрощение реализации метода линейных спектральных пар (частот) в линейном предсказании речи // Труды 3-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение", Т.3, стр. 128 — 132, Москва, 2000.
3. Павлов О. И. Быстрый алгоритм и графическое представление прямого преобразования в методе линейных спектральных частот высшего порядка // Труды 3-й Международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение", Т. 3, стр. 132 — 136, Москва, 2000.
4. Павлов О. И. Алгоритм быстрого прямого П-преобразования и особенности его математического аппарата // Радиоэлектроника. — 2001. — N2.— С. 61—73. (Изв.высш.учеб.заведений).
5. Павлов О. И. Обратное П-преобразование в линейном предсказании речи // Радиоэлектроника. — 2001. — N1. — С. 61—73. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Павлов О. И. Алгоритм быстрого обратного П-преобразования // Радиоэлектроника. — 2001. — N8.— С. 67—77. (Изв.высш.учеб.заведений).
7. Павлов О. И. Свойства линейных спектральных частот высших порядков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 117. С. 62—64.
8. Павлов О. И. Межкадровая интерполяция спектральной огибающей речевого сигнала в пространстве линейных спектральных частот наивысшей регрессии // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2008. — Т. 51, № 4. — С. 56—69.
9. Павлов О. І., Стасевич П. А., Тертичний Г. М. Оцінка ефективності кодування спектральної обвідної мовленнєвих сигналів в просторах лінійних спектральних параметрів найвищої регресії методом кластерного аналізу // Праці IX всеукраїнської міжнародної конференції "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів", УкрОбраз'2008, 3—7 листопада 2008 р. — Київ: МННЦ ІТіС НАН та МОН України, УАсОІРО, 2008. — С. 189—192. — Режим доступу —http://uasoiro.kibermova.com/files/Zbirnyk/2008/5/p_50.pdf.
10. Павлов О. І., Герасименко К. В., Аполонов Є. В. Прогнозування спектральної обвідної мовленнєвих сигналів в просторі лінійних спектральних параметрів найвищого розщеплення // Праці 11-ої Всеукраїнської міжнародної конференції "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів", УкрОбраз'2012, 15—19 жовтня 2012 р. — Київ : МННЦ ІТіС НАН та МОН України, УАсОІРО, 2012. — С. 137—144.

References

1. Pavlov O. I. (2000) Priamoe P–preobrazovanie v lineinom predskazanii rechi [Direct P–transformation in the linear prediction of speech]. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 43, no. 12, pp. 53–66.
2. Pavlov O. I. (2000) Uproshchenie realizatsii metoda lineinikh spektralnikh par (chastot) v lineinom predskazanii rechi [Simplifying the implementation of the linear spectral pairs (frequencies) in the linear prediction speech] *Trudy 3 Mezhdunarodnoi konferentsii "Tsyfrovaia obrabotka sihnalov i ee primenenie"* [Proc. 3th Int. Conf. " Digital Signal Processing and Applications"], Vol. 3, Moskow, pp. 128–132.
3. Pavlov O. I. Bystryi alhorytm i hraficheskoe predstavlenie priamoho preobrazovaniia v metode lineinikh spektralnikh chastot vyssheho poriadka [Fast algorithm and graphical representation of the direct transformations in method of line spectral frequencies higher order].

Trudy 3 Mezhdunarodnoi konferentsii "Tsyfrovaia obrabotka sihnalov i ee primenenie" [Proc. 3th Int. Conf. " Digital Signal Processing and Applications"], Vol. 3, Moskow, pp. 132 – 136.

4. Pavlov O. I. (2001) Alhoritm bystroho priamoho P–preobrazovaniia i osobennosti eho matematicheskoho apparata [Algorithm for fast direct P-transformation and features of its mathematical apparatus]. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 44, no. 2, pp. 61–73.

5. Pavlov O. I. (2001) Obratnoe P–preobrazovanie v lineinom predskazanii rechi [Inverse P-transformation in linear prediction of speech]. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 61 – 73.

6. Pavlov O. I. (2001) Alhoritm bystroho obratnoho P–preobrazovaniia [Algorithm for fast inverse P-transformation]. *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 44, no. 8, pp. 67 – 77.

7. Pavlov O. I. (2001) Svoistva lineinykh spektralnykh chastot vysshikh poriadkov [Properties of line spectral frequencies higher orders]. *Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb*. Vol. 117. pp. 62 – 64.

8. Pavlov O. I. (2008) Inter-frame interpolation of the spectral envelope of the speech signal in the space of linear spectral frequencies of the highest regression *Radioelectronics and Communications Systems*. vol. 51, no. 4, pp. 56 – 69. doi: 10.3103/S0735272708040067

9. Pavlov O. I., Stasevych P. A. and Tertychnyy H. M. (2008) Estimation of speech signals spectrum envelope encoding efficiency in linear spectrum parameters spaces of the highe st regression with a cluster analysis method. *Obroblennia syhnaliv i zobrazhen ta rozpiznavannia obraziv, UkrObraz2008* [Proc. Of 9-th Int. Conf "Signal/Image Processing And Pattern Recognition, UkrOBRAZ'2008"], Kyiv, pp. 189 – 192. (in Ukrainian) Available at: http://uasoiro.kibermova.com/files/Zbirnyk/2008/5/p_50.pdf

10. Pavlov O. I., Herasymenko K. V. and Apollonov Ye. V. (2012) Speech signals spectral envelope prediction in the linear spectral parameter space of highest splitting. *Obroblennia syhnaliv i zobrazhen ta rozpiznavannia obraziv, UkrObraz2008* [Proc. Of 11-th Int. Conf "Signal/Image Processing And Pattern Recognition, UkrOBRAZ'2012"], Kyiv, pp. 137–144. (in Ukrainian)

Павлов О. І. ***Матрична форма методу ЛСП-НР.*** *В статті розглядається теорія кодування форми спектральної обвідної мовленнєвих сигналів методом лінійних спектральних параметрів найвищого розщеплення (ЛСП-НР). Показано, що ПП та ЗП у методі ЛСП-НР можна розглядати як певне матричне перетворення. Наведена формула оцінки спектральної обвідної синтезованого мовленнєвого сигналу безпосередньо в просторі ЛСП-НР.*

Ключові слова: *Кодування форми спектральної обвідної, лінійні спектральні параметри (ЛСП), лінійні спектральні пари (проекції, ЛСПр), лінійні спектральні частоти (ЛСЧ).*

Павлов О. И. ***Матричная форма метода ЛСП-НР.*** *В статье рассматривается теория кодирования формы спектральной огибающей речевых сигналов методом линейных спектральных параметров наивысшего расщепления (ЛСП-НР). Показано, что ПП та ЗП в методе ЛСП-НР можно рассматривать как некоторое матричное преобразование. Приведена формула оценки спектральной огибающей синтезированного речевого сигнала непосредственно в пространстве ЛСП-НР.*

Ключевые слова: *Кодирование формы спектральной огибающей, линейные спектральные параметры (ЛСП), линейные спектральные пары (проекции, ЛСПр), линейные спектральные частоты (ЛСЧ).*

Pavlov O. I. ***Matrix form of the LSP-HS method.***

Introduction. The coding theory of the speech signals spectral envelope forms by linear spectral parameters of the highest splitting (LSP-HS) method is regarded. Advantages of LSP-HS parameters using compare to the classic LSP parameters are specified.

Main part. It is demonstrated that the direct and inverse transform of LSP-HS method can be regarded as a certain matrices transform from the LPC coefficients. Method of determining the matrix elements of direct and inverse transformation method LSP-HS is described. It is shown that the matrix of direct and inverse transformation of method LSP-HS can be calculated for arbitrary prediction order. The results of specified matrices elements determination for 10th prediction order are given. Basis vectors of the direct and inverse transformation matrices of LSP-HS method are plotted on the charts. The formula of the spectral envelope estimates for synthesized speech signal in space LSP-HS is written.

Conclusions. It is proved that the method of LSP-HS can be used in matrix form. The matrix form of LSP-HS method makes it possible to employ standard mathematical tools to describe the shape of speech signal spectral envelope not only in space LPC, but in the space of LSP-HS, which can not be done in the space of classical (first phase splitting) LSP. The matrix form of LSP-HS method allows to draw alternative structure of analysis and synthesis of speech filters not with classic LPC parameters, but with the coefficients of LSP-HS space, and to reveal the physical meaning of the transition from LPC to the LSP in algorithms of speech coding.

Keywords: *encoding shape of the spectral envelope, linear spectral parameters (LSP), linear spectral pairs (projection LSPr), linear spectral frequencies (LSF), linear prediction coefficients (LPC).*