Фільтр аналізу та синтезу мовлення в методі ЛСП-НР

Павлов О. І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
op-mail@ukr.net

Анотація

Показано, що на підставі матричної форми прямого та зворотного перетворення коефіцієнтів за методом ЛСП-НР може бути отримані структури фільтрів синтезу та аналізу сигналів мовлення.

Знайдена структура фільтру аналізатора та фільтру синтезатора в методі ЛСП-НР.

Показано, що лінійні спектральні параметри найвищої регресії є ваговими коефіцієнтами вихідних сигналів лінійки відповідних паралельних фільтрів, параметрами яких є параметри базисних векторів методу ЛСП-НР.

1. Вступні положення

В [1—15] було викладено сутність методу ЛСП-НР, як методу прямого та зворотного перетворення поліномів, використання якого на практиці показало його високу ефективність і переваги перед іншими методами кодування форми спектральної обвідної мовленнєвих сигналів. Отримані експериментальні результати потребують теоретичного пояснення, а практична реалізація методу ЛСП-НР вимагає його формалізації, абстрагування від операцій з поліномами, оптимізації математичних операцій а також з'ясування його властивостей. Саме цим питанням присвячений матеріал, який викладається далі.

2. Базисні вектори та базисні поліноми простору ЛСП-НР

Як було вказано в [11, 12, 15], обчислення значень поліному $A(z)=1+\sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}$ фільтру ЛП може бути виконано у формі, $A(z)=\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}=\mathbf{Z}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}$, де $\mathbf{A}=\begin{bmatrix}1 & a_1 & a_2 & \dots & a_M\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{Z}=\begin{bmatrix}1 & z^{-1} & z^{-2} & \dots & z^{-M}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$.

Оскільки вектор ЛСП-НР $\mathbf{S}=\begin{bmatrix}1 & s_1 & s_2 & \dots & s_M\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ визначається в результаті прямого матричного перетворення $\mathbf{S}=\mathbf{\Phi}\mathbf{A}$, а вектор КЛП може бути відновленим в результаті зворотного матричного перетворення $\mathbf{A}=\mathbf{F}\mathbf{S}$, де

$$\mathbf{\Phi}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & \dots & 0\\ \varphi_{1,0} & \varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \dots & \varphi_{1,M}\\ \varphi_{2,0} & \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \dots & \varphi_{2,M}\\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots\\ \varphi_{M,0} & \varphi_{M,1} & \varphi_{M,2} & \dots & \varphi_{M,M}\end{bmatrix},\quad \mathbf{F}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & \dots & 0\\ f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} & \dots & f_{1,M}\\ f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} & \dots & f_{2,M}\\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots\\ f_{M,0} & f_{M,1} & f_{M,2} & \dots & f_{M,M}\end{bmatrix},$$

то маємо $\mathbf{A}'=\mathbf{A}'_0+\mathbf{F}'\mathbf{S}'$, де $\mathbf{A}'=\begin{bmatrix}a_1 & a_2 & \dots & a_M\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{S}'=\begin{bmatrix}s_1 & s_2 & \dots & s_M\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{A}'_0=\begin{bmatrix}f_{1,0} & f_{2,0} & \dots & f_{M,0}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$,

$$\mathbf{F}'=\begin{bmatrix}f_{1,1} & f_{1,2} & \dots & f_{1,M}\\ f_{2,1} & f_{2,2} & \dots & f_{2,M}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ f_{M,1} & f_{M,2} & \dots & f_{M,M}\end{bmatrix}=\mu\begin{bmatrix}\varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \dots & \varphi_{1,M}\\ \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \dots & \varphi_{2,M}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ \varphi_{M,1} & \varphi_{M,2} & \dots & \varphi_{M,M}\end{bmatrix}=\mu\mathbf{\Phi}',$$

$\mu=2^{M-1}$.

Отже, можна отримати новий вираз для обчислення поліному $A(z)=1+\sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}$ через коефіцієнти прямого перетворення ЛСП-НР:

$$A(z)=1+\mathbf{A}'^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}'=1+(\mathbf{A}'_0+\mathbf{F}'\mathbf{S}')^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}'=1+\mathbf{A}'^{\mathrm{T}}_0\mathbf{Z}'+\mathbf{S}'^{\mathrm{T}}(\mathbf{F}'^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}'),\quad (1)$$

де $\mathbf{Z}'=\begin{bmatrix}z^{-1} & z^{-2} & \dots & z^{-M}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ — інформативний вектор полігармонічного аргументу (тобто такий, в який не входить незмінний елемент $z^0\equiv 1$, — далі, де це не буде викликати іншого тлумачення, ознаку «інформативний» будемо опускати).

Вираз (1) можна переписати у вигляді

$$A(z)=1+\begin{bmatrix}f_{1,0}\\ f_{2,0}\\ \dots\\ f_{M,0}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}z^{-1}\\ z^{-2}\\ \dots\\ z^{-M}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}s_1\\ s_2\\ \dots\\ s_M\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}f_{1,1} & f_{1,2} & \dots & f_{1,M}\\ f_{2,1} & f_{2,2} & \dots & f_{2,M}\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ f_{M,1} & f_{M,2} & \dots & f_{M,M}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}z^{-1}\\ z^{-2}\\ \dots\\ z^{-M}\end{bmatrix},\quad (2)$$

що після виконання відповідних матричних перемножень дає

$$A(z)=1+\sum_{i=1}^{M} f_{i,0}z^{-i}+s_1\sum_{i=1}^{M} f_{i,1}z^{-i}+s_2\sum_{i=1}^{M} f_{i,2}z^{-i}+\dots+s_M\sum_{i=1}^{M} f_{i,M}z^{-i}.\quad (3)$$

Оскільки детермінанти матриць $\mathbf{F}$ і $\mathbf{\Phi}$ дорівнюють детермінантам їх головних мінорів $\mathbf{F}'$ і $\mathbf{\Phi}'$, $\det[f_{i,k}]=|\mathbf{F}|=f_{0,0}|\mathbf{F}'|=|\mathbf{F}'|$, $\det[\varphi_{i,k}]=|\mathbf{\Phi}|=\varphi_{0,0}|\mathbf{\Phi}'|=|\mathbf{\Phi}'|$, а детермінанти головного мінору $\mathbf{F}'$ і головного мінору $\mathbf{\Phi}'$ пов'язані з порядком прогнозування M, $|\mathbf{F}'|=(-1)^n\sqrt{\left(2^{M-1}\right)^M}$, $|\mathbf{\Phi}'|=(-1)^n\Big/\sqrt{\left(2^{M-1}\right)^M}$, то головний мінор $\mathbf{F}'$ (а однаково і матриці $\mathbf{F}$, $\mathbf{\Phi}$ і головний мінор $\mathbf{\Phi}'$) не є виродженою матрицею, а тому його вектори-стовпчики $\mathbf{F}'^{<k-1>}=\begin{bmatrix}f_{1,k} & f_{2,k} & \dots & f_{M,k}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $1\le k\le M$, є лінійно незалежними, утворюють базис лінійного різноманіття (систему координат або систему відліку) [16, п.14.6-1, п.14.5-2, п.14.2-4] і разом з вектором зсуву $\mathbf{A}'_0=\begin{bmatrix}f_{1,0} & f_{2,0} & \dots & f_{M,0}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ можуть вважатися ***базисними векторами*** простору ЛСП-НР.

Оскільки головні мінори $\mathbf{\Phi}'$ і $\mathbf{F}'$ не є ані симетричними, $\mathbf{F}'^{\mathrm{T}}\ne\mathbf{F}'$, $\mathbf{\Phi}'^{\mathrm{T}}\ne\mathbf{\Phi}'$, ані ортогональними, $\mathbf{F}'^{\mathrm{T}}\mathbf{F}'\ne\mathbf{\Lambda_F}$, $\mathbf{\Phi}'^{\mathrm{T}}\mathbf{\Phi}'\ne\mathbf{\Lambda_\Phi}$, де $\mathbf{\Lambda_F}$ і $\mathbf{\Lambda_\Phi}$ — діагональні матриці, що містять квадрати норм (скалярні добутки) $\mathbf{F}'^{<k-1>\mathrm{T}}\mathbf{F}'^{<k-1>}$ та $\mathbf{\Phi}'^{<k-1>\mathrm{T}}\mathbf{\Phi}'^{<k-1>}$ відповідних векторів-стовпчиків головних мінорів $\mathbf{F}'$ та $\mathbf{\Phi}'$, де $1\le k\le M$, то, такий базис не є ортогональним, координати будь-якого вектору в ньому не є незалежними, перетворення векторів з простору КЛП в простір ЛСП-НР (і навпаки) не зберігає кутів і відстаней між ними, але разом з тим забезпечується єдино можливе взаємно відповідне їх подання.

Введемо умовні позначення для окремих поліномів, що входять в (3), які назвемо ***базисними поліномами*** простору ЛСП-НР:

$$A_0(z)=\sum_{i=1}^{M} f_{i,0}z^{-i}\,,\; A_1(z)=\sum_{i=1}^{M} f_{i,1}z^{-i}\,,\;\ldots,\; A_M(z)=\sum_{i=1}^{M} f_{i,M}z^{-i}\,. \quad (4)$$

Кожен з базисних поліномів (4) визначається відповідним базисним вектором простору ЛСП-НР — вектором зсуву $\mathbf{A}_0'$ і векторами-стовпчиками $\mathbf{F}'^{\langle k-1\rangle}$, $1 \le k \le M$ головного мінору $\mathbf{F}'$ матриці прямого перетворення $\mathbf{F}$:

$$A_0(z)=\mathbf{A}_0'^{\mathrm{T}}\mathbf{Z}',\; A_1(z)=\mathbf{F}'^{\langle 0\rangle \mathrm{T}}\mathbf{Z}',\;\ldots,\; A_M(z)=\mathbf{F}'^{\langle M-1\rangle \mathrm{T}}\mathbf{Z}'. \quad (5)$$

Тоді початковий поліном $A(z)=1+\sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}$ може бути представлений зваженою сумою базисних поліномів (5) простору ЛСП-НР, ваговими коефіцієнтами в якій є саме ЛСП-НР s_k :

$$A(z)=1+A_0(z)+s_1A_1(z)+s_2A_2(z)+\ldots+s_M A_M(z)\,. \quad (6)$$

3. Структура фільтру аналізатора в термінах ЛСП-НР

Структура фільтру аналізатора в термінах ЛСП-НР, яка відповідає формулам (3) — (6) показана на рис. 1.

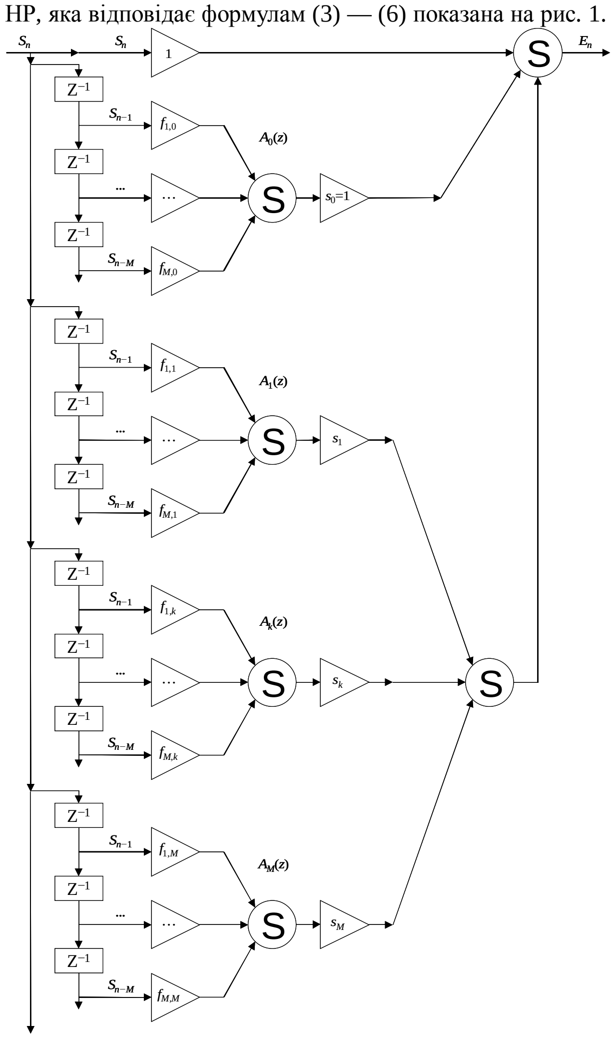

Рис. 1. Структура фільтру аналізатора в термінах ЛСП-НР

Фільтр аналізатора може бути реалізованим у вигляді набору паралельних базисних фільтрів з незмінними характеристиками (4), виходи яких мішкуються пропорційно ваговим коефіцієнтам s_k, які розраховуються для кожного кадру вхідного сигналу.

Схему на рис. 1 можна оптимізувати за витратами пам'яті на реалізацію однакових ліній затримки в кожному базисному фільтрі, а також за рахунок наявності однакових вагових коефіцієнтів в їх відповідних відведеннях (наприклад для M=10: $f_{1,1}=f_{1,2}=\ldots=f_{1,10}=1$, $f_{2,1}=9=-f_{2,10}$, $f_{3,1}=f_{3,10}=36$ і так далі).

4. Структура фільтру синтезатора в термінах ЛСП-НР

Фільтр синтезатора, так саме як і фільтр аналізатора може бути реалізованим у вигляді набору паралельних базисних фільтрів з незмінними характеристиками (4), виходи яких мішкуються пропорційно ваговим коефіцієнтам s_k, які розраховуються для кожного кадру вхідного сигналу. Але на відміну від фільтру аналізатора, який є трансверсальним, фільтр синтезатора є рекурсивним і оперує ваговими коефіцієнтами, які є протилежними за знаком до коефіцієнтів s_k .

Структура фільтру синтезатора в термінах ЛСП-НР, яка відповідає системній функції

$$K(z)=\frac{1}{A(z)}=\frac{1}{1+\sum_{i=1}^{M} f_{i,0}z^{-i}+s_1\sum_{i=1}^{M} f_{i,1}z^{-i}+s_2\sum_{i=1}^{M} f_{i,2}z^{-i}+\ldots+s_M\sum_{i=1}^{M} f_{i,M}z^{-i}}\,, \quad (7)$$

або у позначеннях (4), (5)

$$K(z)=\frac{1}{A(z)}=\frac{1}{1+A_0(z)+s_1A_1(z)+s_2A_2(z)+\ldots+s_M A_M(z)}\,, \quad (8)$$

показана на рис. 2.

Як і схему на рис. 1, схему на рис. 2 можна оптимізувати за витратами пам'яті на реалізацію однакових ліній затримки в кожному базисному фільтрі, а також за рахунок наявності однакових вагових коефіцієнтів в їх відповідних відведеннях.

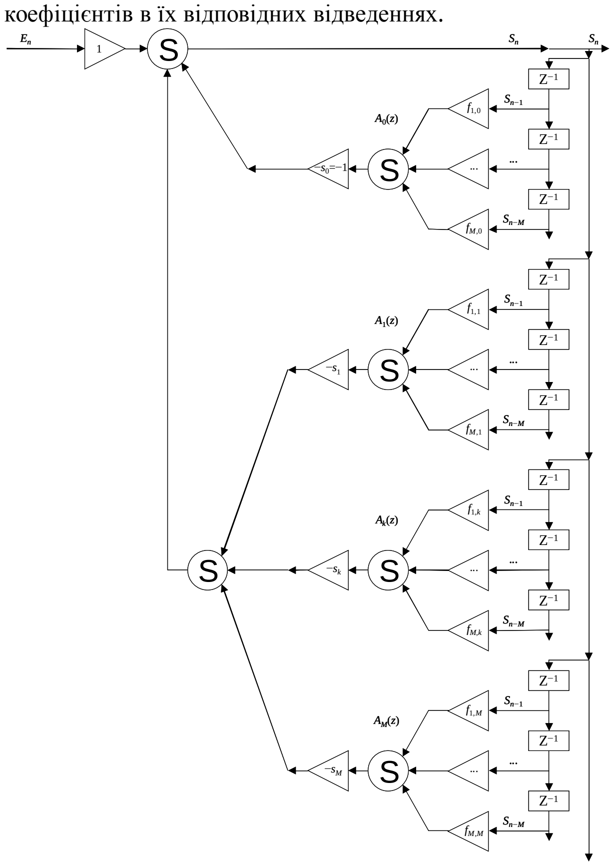

Рис. 2. Структура фільтру синтезатора в термінах ЛСП-НР

5. Підсумки

Показано, що на підставі матричної форми прямого та зворотного перетворення коефіцієнтів за методом ЛСП-

НР може бути отримані структури фільтрів синтезу та аналізу сигналів мовлення.

Знайдена структура фільтру аналізатора та фільтру синтезатора в методі ЛСП-НР.

Показано, що лінійні спектральні параметри найвищої регресії є ваговими коефіцієнтами вихідних сигналів лінійки відповідних паралельних фільтрів, параметрами яких є параметри базисних векторів методу ЛСП-НР.

6. Висновки

Аналіз та синтез сигналів мовлення може бути здійсненим безпосередньо в просторі ЛСП-НР без застосування зайвих операцій для переходу в інші класичні простори кодування форми спектральної обвідної мовленнєвого сигналу, наприклад, в простір КЛП чи КЧК, що дозволяє підвищивши ефективність відповідних алгоритмів .

7. Список використаних джерел

1. 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.
2. 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.
3. Павлов О.И. Прямое П-преобразование в линейном предсказании речи // Радиоэлектроника. — 2000. — N12. — С. 53 — 66. (Изв. высш. учеб. заведений).
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 // Радиоэлектроника. — 2008. — N4.— С. 56 — 69. (Изв.высш.учеб.заведений).
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 9-ої 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.
10. Стасевич П.А., Тертичний Г.М., Павлов О.І. Фонемна фільтрація сигналів мовлення на підставі кластерного аналізу // Праці 9-ої 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. 85—89.
11. Павлов О.І. Розділ 6. Кодування спектральної обвідної мовленнєвих сигналів методом ЛСП-НР // Розробити апаратні засоби, системне та проблемно-орієнтоване прикладне програмне забезпечення високотехнологічних електронних виробів мовленнєвої інформатики, здійснити їх впровадження в навчальний процес, виробництво та в базову комп’ютерно-телекомунікаційну платформу «Образний комп’ютер» (ОК_2008_2_ЦЕНТР_КПІ): звіт про НДР № 205 (заключний) / РТФ НТУУ «КПІ» МОН України; кер. О.І.Рибін; викон.: О.І.Павлов [та ін.]. — К., 2008. — 139 с. — № ДР 0208U010175.
12. Павлов О.І. Розділ 5. Розвинення теорії лінійних спектральних параметрів найвищої регресії // Розроблення програмно-апаратних засобів базового модуля усномовної комп’ютерної технології, що вбудовується в сучасні комп’ютерні системи, створення на їх основі високотехнологічних електронних виробів широкого застосування та здійснення заходів для їх впровадження у виробництво: звіт з НДР ОК_2009_2 (заключний) / Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України; кер. Т.Вінцюк; викон.: О.Павлов [та ін.]. — К., 2009. — 149 с. — № ДР 0109U004244.
13. Павлов О.І., Бондаренко А.С. Розпізнавання сигналів фонендоскопії в просторі лінійних спектральних параметрів найвищої регресії // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2010. — № 5. — С. 5—10.
14. 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.
15. Павлов О.І. Матрична форма методу ЛСП-НР // Вісник НТУУ „КПІ”. Сер. радіотехніки і радіоапаратобудування. — 2013. — № 56. — С. 13—24.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). / Под ред. И.Г.Арамановича. Изд. 4-е, — М.: Наука, 1977.