

ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.3.011.21; 612.66

О.І. Павлов, А.С. Бондаренко

РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ ФОНЕНДОСКОПІЇ В ПРОСТОРІ ЛІНІЙНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАЙВИЩОЇ РЕГРЕСІЇ

Вступ

Прослуховування (аускультация) шумів дихання при дослідженні хворого уже більше ста років залишається фундаментальним діагностичним дослідженням. При цьому практично незмінними продовжують залишатися як сама методика прослуховування шумів за допомогою традиційного механічного стетофонендоскопа, так і спосіб їх класифікації, заснований на оцінці аускультативних ознак лікарем. Тим часом характер дихальних шумів досить складний і різноманітний. Тому не дивно, що аускультативна семіотика використовує такі епітети, як твердий подих і хрипи: стугонливі, що дзиччать, свистячі, крупнопухирчасті та дрібнопухирчасті. Очевидно, що при подібному розпізнаванні важко прямо поставити у відповідність кожному з наведених описів які-небудь об'єктивні інформаційно значимі кількісні характеристики. Розпізнавання сигналів фонендоскопії в часовому просторі є складною задачею, оскільки виділити окремі характерні ознаки при великій кількості сигналів практично неможливо.

Більшість систем, здатних розпізнавати сигнали фонендоскопії, працюють на основі визначення характеру їх спектральних складових та аналізу діапазону частот [1]. Застосування методів діагностики, що працюють на основі спектральних складових, дає можливість класифікувати такі сигнали візуально. Недоліком такого методу є те, що для правильного розпізнавання потрібна якісна візуалізація в спектральному просторі. Також класифікацію в спектральному просторі важко автоматизувати, що зменшує його доцільність у застосуванні при діагностиці.

В цілому, результати, отримані у відомих з літератури працях, свідчать про наявність значної кількості невирішених питань як щодо вибору ознак, так і стосовно критеріїв їх порівняння. Саме тому дослідження методів порівняння і розпізнавання реалізацій сигналів фонендоскопії залишається надзвичайно актуальною задачею.

У статті [2] було розглянуто ефективність класифікації сигналів фонендоскопії в просторі автокореляційних функцій (АКФ), отриманих з часових реалізацій (фонореспіограм) звуків дихання з наступним використанням дисперсійного критерію при відборі ознак, а також у просторі коефіцієнтів лінійного прогнозування (КЛП), отриманих при використанні авторегресійного моделювання послідовного ряду значень АКФ. Було показано, що використання КЛП дає змогу отримати 100 %-ну імовірність правильної класифікації навчальної вибірки вже при 12 ознаках проти 22 ознак у просторі АКФ.

Постановка задачі

Метою даної статті є дослідження ефективності при розв'язанні задачі розпізнавання сигналів фонендоскопії в просторі лінійних спектральних параметрів найвищої регресії (ЛСП-НР) та просторі класичних лінійних спектральних параметрів (ЛСП), просторі коефіцієнтів відбиття (КВ), просторі КЛП при відборі ознак з повного максимального набору КЛП за дисперсійним критерієм, а також порівняння нових результатів з результатами [2].

Стисла характеристика методу ЛСП-НР

Основні положення методу ЛСП-НР і його властивості викладено в публікаціях [3–11]. Використання методу ЛСП-НР дає можливість зобразити фільтр-прогнозувач M -порядку з характеристикою $A(z)$, яка подається одним сталим поліномом степеня M

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

де коефіцієнти $a'_i = -a_i$, $1 \leq i \leq M$, є КЛП у вигляді набору M елементарних зведених сталих поліномів першого ступеня (тобто найвищої регресії) з характеристиками

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

де символ v означає один із двох символів p або q , а ланцюжок таких символів відображає історію утворення відповідного елементарного полінома в процесі поетапної регресії [2, 8].

Корені елементарних поліномів (2) є лінійними спектральними проекціями найвищої регресії, вони знаходяться в інтервалі $[-1; 1]$ і з точністю до знаку дорівнюють коефіцієнтам елементарних поліномів (2): $z_{al}^{vvvv} = -a_1^{vvvv}$. А

арккосинуси коренів елементарних поліномів (2) $\omega_{ai}^{vvvv} = \arccos(-a_1^{vvvv})$ є лінійними спектральними частотами найвищої регресії (ЛСЧ-НР) і лежать в інтервалі $0 < \omega_{ai}^{vvvv} < \pi$.

Таким чином, всі лінійні спектральні частоти найвищої регресії, відповідні лінійні спектральні проєкції найвищої регресії і відповідні коефіцієнти елементарних поліномів (2) є еквівалентними і тому згадуються далі як ЛСП-НР (тобто параметри). Там, де треба буде відрізняти частоти від проєкцій, будуть використовуватися обидва скорочення – ЛСП-НР (для проєкцій) і ЛСЧ-НР (для частот).

Реалізація класичного методу ЛСП

Класичний метод ЛСП відповідає першому етапу методу ЛСП-НР [2] і полягає в розщепленні полінома (1) та зображенні його у вигляді півсуми двох поліномів: $A(z) = (P(z) + Q(z))/2$, де $P(z) = A(z) - z^{-(M+1)} A(z^{-1})$, $Q(z) = A(z) + z^{-(M+1)} A(z^{-1})$, кожен з яких після відділення беззаперечних коренів і заміни змінної може бути поданим у вигляді сталих поліномів:

$$A^v(z) = 1 + \sum_{i=1}^{M_a^v} a_i^v z^{-i}. \quad (3)$$

Корені z_{ai}^v , $1 \leq i \leq M_a^v$, поліномів (3) є класичними лінійними спектральними проєкціями, вони знаходяться в інтервалі $]-1; 1[$ і в наших дослідженнях обчислювалися за допомогою модифікованого методу Ньютона.

Арккосинуси коренів поліномів (3) $\omega_{ai}^v = \arccos(z_{ai}^v)$, $1 \leq i \leq M_a^v$, є класичними лінійними спектральними частотами (ЛСЧ) і знаходяться в інтервалі $0 < \omega_{ai}^v < \pi$.

Відомі переваги ЛСП-НР перед класичними ЛСП

Класичний метод ЛСП – це лише перший етап регресії методу ЛСП-НР. Перехід від класичних (першого етапу регресії) ЛСП до ЛСП-НР дає можливість зберегти переваги класичного методу і одночасно отримати ряд додаткових переваг.

1. Процес зображення фільтра-прогнозувача (1) у вигляді ЛСП спрощується і набуває строгого, логічного завершеного вигляду. Ко-

рені елементарних поліномів (2) ($A^{vvvv}(z) = 1 + a_1^{vvvv} z^{-1}$) обчислюються тривіально, без застосування ітераційних методів їх оцінки, оскільки з точністю до знаку дорівнюють коефіцієнтам a_i^{vvvv} . Елементарні поліноми в разі їх отримання на ранніх етапах регресії залишаються інваріантними до подальших етапів регресії незалежно від значення M в (1) [3, 4, 9].

2. Усувається методична похибка оцінки ЛСП, яка є властивою класичному методу і утворюється в результаті застосування ітераційного пошуку явних коренів пари поліномів $D^p(x)$ і $D^q(x)$, які, наприклад, у випадку лінійного прогнозування 10-го порядку мають вигляд $D^v(x) = x^5 + d_1^v x^4 + d_2^v x^3 + d_3^v x^2 + d_4^v x + d_5^v$ [2, 3].

3. Прискорюється алгоритм подання коефіцієнтів лінійного прогнозування у вигляді ЛСП [5, 6].

4. Необхідний обчислювальний ресурс більш рівномірно розподіляється між аналізатором (кодером) і синтезатором (декодером) [6, 7].

5. Існує просте правило кодування ланцюжка верхніх символічних індексів у коефіцієнтах s_i^{vvvv} (де $s_i^{vvvv} \equiv a_i^{vvvv}$), що відображає історію утворення коефіцієнтів у процесі поетапної регресії від (1) до (2), яке дає можливість перейти до числових індексів у коефіцієнтах s_1, \dots, s_M і, навпаки, від числових індексів до ланцюжка верхніх символічних індексів [8]. Числові індекси сприяють визначенню отримання елементарних інваріантних зведених сталих поліномів першого степеня (2) на ранніх етапах регресії для довільного значення M в (1) [8], які додатково скорочують кількість обчислювальних операцій.

6. Існує простий необхідний (але не достатній) критерій сталості фільтра синтезатора в термінах ЛСП-НР з числовими індексами в коефіцієнтах s_1, \dots, s_M , інваріантний для будь-якого M [9]:

$$-1 < s_1 < s_2 < s_3 < \dots < s_M < 1.$$

7. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку при виконанні операції міжкадрової інтерполяції порівняно з іншими еквівалентними параметрами, в тому числі і класичними (першого етапу регресії) ЛСП [9].

8. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку прогнозування форми спектральної обвідної звукового сигналу (екстраполяції) на основі відомих її значень на попередніх кадрах.

9. ЛСП-НР забезпечують меншу похибку векторного квантування порівняно з іншими

еквівалентними параметрами, в тому числі й класичними (першого етапу регресії) ЛСП [11].

10. Пряме і зворотне перетворення в методі ЛСП-НР можна розглядати як певне матричне перетворення над коефіцієнтами полінома (1). ЛСП-НР є трансформантами такого матричного перетворення [11].

Матрична форма методу ЛСП-НР

ЛСП-НР для фільтра-прогнозувача M -порядку можуть бути визначені за допомогою $M+1$ лінійної функції M змінних, $s_i = \varphi_i(a_1, a_2, \dots, a_M) = \varphi_{i,0} + \varphi_{i,1}a_1 + \varphi_{i,2}a_2 + \dots + \varphi_{i,M}a_M$, $0 \leq i \leq M$, де $s_0 = 1$, що більш компактно можна подати у вигляді матричного рівняння

$$\Phi \mathbf{A} = \mathbf{S},$$

де

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

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_M \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_M \end{bmatrix},$$

причому $\varphi_{0,0} = 1$, $\varphi_{0,i} = 0$, $1 \leq i \leq M$, а решта елементів матриці Φ залежить лише від значення M . Елементи матриць Φ для різних значень M обчислювалися за методикою [11].

Методика досліджень і їх результати

Фонореспірограми звуків дихання являли собою файли даних, отриманих у результаті дискретизації відповідних сигналів з частотою 22 кГц і розрядністю відліків 16 біт при форматі кодування ІКМ. Всього в нашому розпорядженні було вісім класів сигналів, кожен з яких містив по чотири реалізації циклів “вдих–видих”. Так само, як і в статті [2], сигналами

було використано часові реалізації фонореспірограм шумів органів дихання:

- амфоричне дихання у хворого з великим абсцесом лівої легені;
- бронхіальне дихання у хворого з правосторонньою крупозною пневмонією першої стадії захворювання;
- бронховезикулярне дихання після трьох років лікування хворого;
- везикулярне дихання;
- вологі середньо- і крупнопухирчасті хрипи в пацієнта з бронхоектотичною хворобою;
- грубий звук тертя плеври;
- ларинготрахеальне дихання, зареєстроване в області щитоподібного хряща гортані;
- хрипи дрібнопухирчасті дзвінки.

Фонореспірограми кожного класу сигналів було сегментовано в ручному режимі на чотири сегменти, початок і кінець яких відповідав паузам між циклами “вдих–видих”, які потім було переписано в окремі файли. В межах кожного сегменту (реалізацій циклів “вдих–видих”) фази “вдих” і фази “видих” окремо одна від одної не розглядалися.

Попередня обробка даних полягала в тому, що для кожної реалізації циклу “вдих–видих” кожного класу сигналів обчислювалися АКФ, які знаходилися за формулою

(4)

$$C(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} x_n,$$

де N – кількість відліків у реалізації циклу “вдих–видих”; x_n – значення n -го відліку; m – зміщення для підрахунку АКФ.

Як і в статті [1], для всіх експериментів бралися лише перші 1000 значень АКФ ($0 \leq m \leq 1000$). Вказані значення АКФ розглядалися далі як послідовні ряди, до яких застосовувався математичний апарат методу лінійного прогнозування. У першому експерименті за методикою [1] кожний послідовний ряд перетворювався на повний максимальний набір КЛП (тобто набір з 1000 КЛП), до якого застосовувався дисперсійний критерій для відбору ознак – формування вибіркового набору КЛП заданого розміру, який потім використовувався для побудови класифікатора [13, 14]. У всіх подальших експериментах кожний послідовний ряд значень АКФ моделювався лінійною авто-регресійною моделлю з визначенням відповідно до обраного порядку моделі повного набору КЛП і КВ за алгоритмом Левінсона–Дарбіна.

Отриманий набір КЛП перетворювався в еквівалентні набори ЛСП, ЛСЧ, ЛСП-НР і ЛСЧ-НР. При обчисленні ЛСП-НР і ЛСЧ-НР використовувалася матрична форма методу ЛСП-НР. При обчисленні ЛСП і ЛСЧ застосовувався ітеративний пошук коренів за допомогою модифікованого методу Ньютона.

Результати дослідження роботи створених класифікаторів (ймовірності правильного розпізнавання навчальної вибірки) для різних просторів і різної кількості врахованих ознак ($2 \leq N \leq 24$) подано в таблиці та на рисунку. Також, для порівняння, наведено дані, що містяться в статті [2]. Помітна немонотонність наведених графіків пояснюється малим розміром навчальної вибірки.

Порівняння результатів

З таблиці та рисунка видно, що 100 % розпізнавання навчальної вибірки в класичних просторах ЛСП і ЛСЧ досягається при найменшій кількості ознак $P=4$ (для восьми клавіш сигналів, що близько до оптимуму). За отриманими характеристиками ці два простори є майже однаково ефективними. Але слід зауважити, що під час обчислень класичних ЛСП дуже часто виникають ситуації, коли метод Ньютона доводиться перезапускати з іншими початковими умовами через неможливість досягнення заданої нев'язки і зациклювання обчислень. Саме тому ані простір ЛСП, ані ЛСЧ ми не можемо рекомендувати як ефективний простір ознак, тим більше при великій кількості

Таблиця. Імовірність правильного розпізнавання навчальної вибірки

Кількість ознак	Простір ознак							
	АКФ (дк) ¹	КЛП (дк) ²	КЛП ³	ЛСП-НР	ЛСЧ-НР	КВ	ЛСП	ЛСЧ
2	0,562	0,25	0,25	0,25	0,25	0,375	0,375	0,375
3	0,562	0,375	0,375	0,375	0,375	0,75	0,375	0,375
4	0,75	0,65	0,71	0,71	0,75	0,906	1	1
5	0,71	0,843	0,875	0,875	0,906	0,968	1	1
6	0,78	0,875	0,968	0,968	0,84	1	1	1
7	0,937	0,875	0,937	0,937	0,906	1	1	1
8	0,9	0,937	0,937	0,937	0,937	1	1	1
9	0,937	0,9	0,937	0,937	0,937	1	1	1
10	0,968	0,875	0,937	1	1	1	1	1
11	0,906	0,937	0,968	1	1	1	1	1
12	0,937	0,937	1	1	1	1	1	1
13	0,937	0,968	1	1	1	1	1	1
14	0,937	0,968	1	1	1	1	1	1
15	0,967	0,968	1	1	1	1	1	1
16	0,968	1	1	1	1	1	1	1
17	0,968	1	1	1	1	1	1	1
18	0,968	1	1	1	1	1	1	1
19	0,968	1	1	1	1	1	1	1
20	0,968	1	1	1	1	1	1	1
21	0,968	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1

Примітка.

¹ Як ознаки використовувався вибіркового набір значень АКФ заданої кількості, які відбиралися з послідовних рядів, що утворювалися з 1000 значень АКФ фонореспірограм. Відбір ознак з повного послідовного ряду значень АКФ здійснювався за дисперсійним критерієм [1].

² Як ознаки використовувався вибіркового набір КЛП заданої кількості, які відбиралися з максимального незмінного повного набору КЛП (відповідно до моделі лінійного прогнозування 1000-го порядку, застосованої до послідовних рядів, що утворювалися із значень АКФ фонореспірограм). Відбір ознак з повного набору КЛП здійснювався за дисперсійним критерієм.

³ Як ознаки використовувався повний поточний набір КЛП (відповідно до заданого в експерименті порядку моделі лінійного прогнозування послідовних рядів, що утворювалися з 1000 значень АКФ фонореспірограм). КЛП розраховувалися за алгоритмом Левінсона–Дарбіна [1].



ті класів і неминучому зростанні порядку моделі лінійного прогнозування.

Наступним за ефективністю виявився простір КВ, в якому достатньо визначити $P=6$ ознак. Обчислення КВ дуже просте, оскільки вони автоматично визначаються разом з КЛП при використанні алгоритму Левінсона–Дарбіна. Але, як показують експерименти, КВ мають дуже погані характеристики векторного квантування (середня квадратична похибка майже не зменшується при зростанні кількості кластерів від 1 до 4096 і більше, і залишається з таким самим порядком, що й дисперсія навчаль-

ної вибірки). Так само незадовільними є характеристики інтерполяції КВ [9]. Саме тому при збільшенні кількості класів сигналів можна очікувати істотне погіршення імовірності правильного розпізнавання та зростання необхідної кількості ознак.

Висновки

З погляду на сказане вище, ми рекомендуємо використовувати простори ЛСП-НР і ЛСЧ-НР, які показали результати, кращі за КЛП, КЛП (дк) та АКФ (дк). Так, кількість

ознак, необхідна для 100 %-ного розпізнавання навчальної вибірки в просторах ЛСП-НР і ЛСЧ-НР становить $P=10$. Більше того, простори ЛСП-НР і ЛСЧ-НР мають найкращі характеристики векторного квантування та інтерполяції порівняно з рештою просторів, які розглядалися в наших працях [10, 11], а їх обчислення при використанні матричної форми методу ЛСП-НР є надзвичайно простим і швидким.

Перспективи подальших досліджень полягають у розбитті фаз “вдих–видих” на окремі ділянки: фазу “вдих” і фазу “видих”, та у визначенні ефективності класифікації кожної фази.

О.И. Павлов, А.С. Бондаренко

РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ ФОНЕНДОСКОПИИ В ПРОСТРАНСТВЕ ЛИНЕЙНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАИВЫСШЕЙ РЕГРЕССИИ

Исследованы два новых эффективных пространства преобразований – пространство линейных спектральных проекций наивысшей регрессии и пространство линейных спектральных частот наивысшей регрессии, а также классические пространства линейных спектральных проекций, линейных спектральных частот, коэффициентов отражения и коэффициентов линейного прогнозирования. Дано сравнение результатов построения классификаторов сигналов фонендоскопии при использовании отображения образов в пространство решений с минимальной среднеквадратичной погрешностью.

O.I. Pavlov, A.S. Bondarenko

RECOGNITION OF PHONENDOSCOPE SIGNALS IN THE LINEAR SPECTRUM PARAMETERS DOMAIN OF THE HIGHEST REGRESSION

In this paper, we study two new effective domains – linear spectrum projections of the highest regression and the linear spectrum frequency of the highest regression. We also consider classic domains of equivalent parameters and reflection coefficients. Furthermore, we compare the results of classifiers structure of phonendoscope signals by using imaging into the solution space with a minimum mean square error.

1. *Кирпаченко В.Т., Кражановский В.В., Кражановский В.В.* (мл.) Алгоритмы адаптивной и ранговой классификации шумов дыхания // Науч. тр. II конф. с междунар. участием "Информационные технологии в охране здоровья и практической медицине". – К., 2002. – С. 69–71.
2. *Бондаренко А.С., Павлов О.І., Шарпан О.Б.* Розпізнавання сигналів фонендоскопії в просторі автокореляційних функцій та коефіцієнтів лінійного прогнозування // Вісн. НТУУ "КПІ". Сер. радіотехніки і радіоапаратобудування. – 2010. – № 40. – С. 21–26.
3. *Павлов О.И.* Прямое П-преобразование в линейном предсказании речи // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – № 12. – С. 53–66.
4. *Павлов О.И.* Упрощение реализации метода линейных спектральных пар (частот) в линейном предсказании речи // Тр. 3-й Междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Т. 3. – М., 2000. – С. 128–132.
5. *Павлов О.И.* Быстрый алгоритм и графическое представление прямого преобразования в методе линейных спектральных частот высшего порядка // Там же. – С. 132–136.
6. *Павлов О.И.* Алгоритм быстрого прямого П-преобразования и особенности его математического аппарата // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2001. – № 2. – С. 61–73.
7. *Павлов О.И.* Обратное П-преобразование в линейном предсказании речи // Там же. – № 1. – С. 61–73.
8. *Павлов О.И.* Алгоритм быстрого обратного П-преобразования // Там же. – № 8. – С. 67–77.
9. *Павлов О.И.* Свойства линейных спектральных частот высших порядков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 117. – С. 62–64.
10. *Павлов О.И.* Межкадровая интерполяция спектральной огибающей речевого сигнала в пространстве линейных спектральных частот наивысшей регрессии // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 56–69.
11. *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 // Пр. 9-ї Всеукр. міжнар. конф. "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів". – К., 2008. – С. 189–192.
12. *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.
13. *Ахмед Н., Рао К.Р.* Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Пер. с англ.; Под ред. И.Б. Фоменко. – М.: Связь, 1980. – 248 с.
14. *Ljung L.* System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall, 1987. – P. 278–280.

Рекомендована Радою
радіотехнічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
16 грудня 2009 року