

УДК 621.391

В.А. Лупандін

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків***МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТАТИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗПІЗНАВАННЯ З НАВЧАННЯМ НА ОСНОВІ СКЛАДНОГО ЕТАЛОННОГО ОПИСУ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ЗАСОБАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ**

*Розроблена методика оцінювання якості синтезованих алгоритмів розпізнавання образів з навчанням в автоматизованих засобах радіомоніторингу, яка дозволяє врахувати неточність поділу вибіркового ознакового простору, що виникає при синтезі правил прийняття рішень за рахунок погрешностей оцінювання усереднених функцій правдоподібності або їхніх параметрів.*

**Ключові слова:** розпізнавання образів, радіомоніторинг, прийняття рішень.

**Вступ**

Створення сучасних автоматизованих засобів радіомоніторингу пов'язане з необхідністю функціонального об'єднання всіх пристроїв, що забезпечують процес розпізнавання джерел розвідувальних зведень, в апаратно-програмний комплекс розпізнавання (АПКР), який функціонує за єдиним задумом і реалізує принципи адаптивного навчання як на етапі створення, так і при підготовці до бойового застосування у конкретному регіоні і безпосередньо в ході роботи.

В основу алгоритмічної частини АПКР покладений спеціально розроблений «складний еталонний опис» [1] об'єктів розвідки і методи перевірки складних статистичних гіпотез. Складний еталонний опис побудований у припущенні того, що образи складаються з множини різнотипних об'єктів (радіовипромінювань), що розпізнаються, які задані частотними, часовими й іншими ознаками, що спостерігаються на виході систем пошуку радіовипромінювань по частоті, пеленгування (визначення місця розташування), селекції засобу радіомоніторингу. Еталони образів являють собою сукупності можливих значень або (і) інтервали можливих значень їхніх ознак, при цьому інтервали можливих еталонних значень ознак радіовипромінювань можуть бути як пересічними, так і не пересічними.

Статистичні алгоритми розпізнавання, які задані складним еталонним описом, дозволяють при розпізнаванні радіовипромінювань та їх джерел уникати проміжних рішень, зокрема щодо об'єктів, які спостерігаються. У алгоритмах, що запропоновані у попередніх роботах, складний еталонний опис побудований у припущенні про те, що види і параметри апріорних розподілів відомі. Однак у практиці створення систем розпізнавання радіовипромінювань такий випадок зустрічається порівняно рідко.

**Аналіз літератури.** В [2 – 5] розроблені методики параметричного і непараметричного синтезу алгоритмів розпізнавання з навчанням, які при перевірці складних статистичних гіпотез забезпечують формування і використання оцінок невідомих апріорних (еталонних) розподілів ознак радіовипромінювань об'єктів, що розпізнаються, або їхніх параметрів. Особливістю методик є те, що при появі кожного нового об'єкту кожного разу синтезується нове вирішальне правило. Це дозволяє, витративши один раз час на навчання (синтез алгоритмів) в подальшому при кожному прийнятті рішень підвищити якість рішень та знизити час на їх прийняття. Але не визначено, як проводити оцінювання якості синтезованих алгоритмів та які алгоритми краще застосовувати.

**Мета статті** – розробка методики аналізу синтезованих параметричних і непараметричних алгоритмів розпізнавання з навчанням, радіовипромінювань і їхніх джерел, яка дозволить оцінити якість отриманих алгоритмів, а також використовувати отримані результати для оцінювання якості обробки сигналів в автоматизованих засобах радіомоніторингу.

### Основна частина

Метод синтезу алгоритмів розпізнавання з навчанням радіовипромінювань і їхніх джерел базується на введеному складному еталонному описі образів у виді  $\mathfrak{S}$ - мірних спільних апіорних умовних щільностей імовірності змішаного типу еталонних векторів  $s$  незалежних ознак  $s_j, j \in \{1, 2, \dots, \mathfrak{S}\}$ , для кожного з  $L$  образів  $U_i, i \in \{1, 2, \dots, L\}$ :

$$w_i(s) = W(s|U_i) = \prod_{j=1}^{\mathfrak{S}} \left[ \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} P_{ijr} W_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr}) + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} P_{ijd} \delta(s_j - s_{ijd}) \right]; \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^{R_{ij}} P_{ijr} + \sum_{d=1}^{D_{ij}} P_{ijd} = 1, \quad \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} P_{ijr} + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} P_{ijd} = 1,$$

$\forall i \in \{1, 2, \dots, L\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, \mathfrak{S}\}$ , де  $w_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr})$  – апіорні щільності розподілу ознаки  $s_j$  на кожному з  $R_{ij}$  еталонних інтервалів  $[s'_{ijr}, s''_{ijr}]$ ,  $r \in \{1, 2, \dots, R_{ij}\}$ ;  $\delta(s_j - s_{ijd})$  – функції Дірака, як щільність імовірності математичного сподівання  $s_{ijd}$  кожного з  $D_{ij}$  можливих дискретних еталонних значень ознаки  $s_j$ ,  $d \in \{1, 2, \dots, D_{ij}\}$ ;  $p_{ijr}$  і  $p_{ijd}$  – апіорні умовні імовірності спостереження  $r$ -го інтервалу або  $d$ -го значення при спостереженні образу  $U_i$  у матриці ознаки  $s_j$ ;  $I_{ijr(d)} \in [0, 1]$  – коефіцієнти, що характеризують відносний ступінь інформативності  $r$ -го інтервалу або  $d$ -го значення ознаки  $s_j$  при розпізнаванні образу  $U_i$ .

Вирішальні правила, одержані в результаті синтезу по розробленому методу, припускають порівняння з порогом статистик відносин  $\Lambda_i(x) = w_i(x)/w_q(x)$  усереднених функцій правдоподібності виду:

$$w_i(x) = W(x|U_i) = \int_{S_i} w_i(s) W(x|s) ds, \quad (2)$$

де  $w_i(x)$  – усереднена за еталонним описом  $w_i(s)$  функція правдоподібності;  $W(x|s)$  – залежна від значень вектора параметрів  $s$  функція правдоподібності вибірки, що спостерігається;  $S_i$  – область визначення образу  $U_i$  у просторі ознак  $S$ .

Синтез алгоритмів розпізнавання з навчанням заснований на формуванні еталонного опису невідомого образу за допомогою наявної інформації (джерелом якої є навчальна вибірка). У наслідку чого, у вирішальному правилі застосовуються не самі щільності імовірності  $w_i(x)$ , а їхні оцінки, отримані в процесі навчання. Для цього, вважаючи ознаки і вибірки, що спостерігаються, незалежними,

застосовуючи фільтруючу властивість функції Дірака, з (1), (2) маємо:

$$w_i(x) = \prod_{j=1}^{\mathfrak{S}} \left[ \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} P_{ijr} \int_{S_{ij}} w_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr}) \times W(x|s_j) ds_j + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} P_{ijd} W(x|s_{ijd}) \right]. \quad (3)$$

Для одержання оцінок щільності імовірності  $w_i^*(x)$  необхідно в (3) замість

$$\int_{S_{ij}} w_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr}) W(x|s_j) ds_j, \quad W(x|s_{ijd}), \quad P_{ijr}$$

і  $p_{ijd}$  підставити їхні оцінки.

При аналізі синтезованих алгоритмів розпізнавання з навчанням, вирішувалися дві основні задачі: прогнозування вірогідності прийнятих рішень і оцінювання адекватності отриманих непараметричних алгоритмів потенційним вирішальним правилам.

Перша задача вирішувалася із застосуванням методики аналітичного дослідження синтезованих алгоритмів розпізнавання з навчанням, яка пов'язана з пошуком повної імовірності помилки  $p_{\text{пом}}$  виду [3]:

$$P_{\text{пом}} = \sum_{i=1}^L P_{\text{пом}i} = \sum_{i=1}^L p_i \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^L P\{\gamma_q | U_i\},$$

$$\bigcup_{i=1}^L X_i = X, \quad \bigcap_{i=1}^L X_i = \emptyset, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1. \quad (4)$$

В ідеальному випадку, при цілком відомих компонентах усереднених функцій правдоподібності  $w_i(x)$ , вхідні до (4) повні імовірності  $P\{\gamma_q | U_i\}$  прийняття помилкових рішень  $\gamma_q$  при спостереженні образу  $U_i$  визначені як усереднені за еталонними описами образів умовні імовірності помилок [6]:

$$P\{\gamma_q | U_i\} = P\{x \in X_q | s \in S_i\} = \int_{S_i} w_i(s) \int_{X_q} W(x|s \in S_i) dx ds, \quad (5)$$

або

$$P\{\gamma_q | U_i\} = \int_{X_q} \int_{S_i} w_i(s) W(x|s \in S_i) ds dx = \int_{X_q} w_i(x) dx. \quad (6)$$

Отримані вирази для повної імовірності помилки синтезованих параметричних і непараметричних алгоритмів з навчанням. Наприклад,  $p_{\text{пом}}$  для синтезованого непараметричного алгоритму з усередненням функції правдоподібності методом гістограм має вигляд:

$$P_{\text{пом}}^* = \frac{1}{\Xi} \sum_{i=1}^L \frac{1}{\mathfrak{S}-1} \times \left. \times \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq i}}^L \sum_{m \in X_q^*} \prod_{j=1}^{\mathfrak{S}} \left[ \sum_{r=1}^{R_{ij}} I_{ijr} \sum_{k=K'_j}^{K''_j} \Xi_{ijrk} \delta_{mk} + \sum_{d=1}^{D_{ij}} I_{ijd} \sum_{k=K'_j}^{K''_j} \Xi_{ijdk} \delta_{mk} \right] \right\}, \quad (7)$$

де  $\delta_{mk}$  – символ Кронекера ( $\delta_{mk}=1$  при  $m=k$ ;  $\delta_{mk}=0$  при  $m \neq k$ ).

У виразі (7)  $\sum_{m \in X_q} (\cdot)$  являє собою аналог кратного інтеграла, який звичайно утруднює знаходження імовірності помилок вигляду (4). Незважаючи на те, що для рішення (7) не вимагається інтегрування, однак підсумовування за областями  $X_q^*$  обумовлює необхідність визначення приналежності до одного з

$L$  образів, що розпізнаються, кожного з  $\prod_{j=1}^3 K_j$  дискретних елементів вибіркового простору  $X$ .

Пошук повної імовірності помилки не дозволяє врахувати неточність поділу простору  $X$  на області  $X_q^*$ , яка викликана дискретністю статистичних функцій правдоподібності [3 – 5]. Для отримання більш суворих оцінок робочих характеристик застосовувалася методика аналізу синтезованих алгоритмів розпізнавання на основі статистичного моделювання. Тестування алгоритмів проводилося по контрольній вибірці для образів з заздалегідь відомими видами і параметрами апріорних розподілень  $w_i(s, s'_i, s''_i)$  при відомій функції правдоподібності вибірки  $W(x | s)$ .

У цьому випадку алгоритми навчаються по контрольній (навчальній) вибірці. Разом з тим відповідно до [3] знаходяться вектори усереднених функцій правдоподібності  $w_i(x)$  і їхніх відносин  $[\Lambda_i(x)]$ . Повна імовірність  $p^{**}_{пом}$  помилки синтезованого алгоритму оцінюється відповідно до (4), (5). Однак інтеграли обчислюються по областях  $X_q^*$ , а не по  $X_q$ .

Маючи результати контрольного навчання, порівнюємо синтезований алгоритм із відповідним йому потенційним вирішальним правилом. При цьому по (4), (5) оцінюється показник  $p^{**}_{пом}$  синтезованого алгоритму для областей  $X_q^*$  і імовірність  $p_{пом}$  для областей  $X_q$  потенційного алгоритму. Далі визначається різниця  $\Delta p_{пом} = |p^{**}_{пом} - p_{пом}|$ .

Для порівняння якості синтезованих алгоритмів між собою, проведено математичне моделювання. При моделюванні покладалося, що спостерігаються два образи  $L=2, i \in \{1, 2\}$ , які розподілені за законом  $w_i(s, s'_i, s''_i)$ . Кожний з образів спостерігається в просторі однієї ознаки  $s_i$  на одному інтервалі ( $R_i=1, i \in \{1, 2\}$ ) еталонних значень  $[s'_i, s''_i]$ . Функція  $w_i(s, s'_i, s''_i)$  являє собою щільність імовірності випадкової величини  $s$ , розподіленої рівномірно в інтервалах  $[s'_i, s''_i]$ , а функція  $W(x|s)$  правдоподібності вибірки, що спостерігається, розподілена за гауссовським законом з математичним сподіванням  $s$  і середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$ .

Задача полягала в оцінці на основі навчальної вибірки усередненої функції правдоподібності і порівнянні синтезованого в такий спосіб алгоритму з відповідним йому потенційним вирішальним правилом.

Для рішення даної задачі були сформовані навчальні вибірки для двох образів обсягом  $\Xi_1, \Xi_2$  випадкової величини  $x$ , які розподілені за рівнорозподілом, та були синтезовані параметричні та непараметричні алгоритми розпізнавання. Оцінювався показник  $p^{**}_{пом}$  синтезованих алгоритмів для областей  $X_q^*$  і імовірність  $p_{пом}$  для областей  $X_q$  потенційного алгоритму. Далі визначалася різниця

$$\Delta p_{пом} = \left| p^{**}_{пом} - p_{пом} - \frac{p_2}{s''_2 - s'_2} \times \int_{s'_2}^{s''_2} F\left(\frac{x_{п} - s}{\sigma}\right) ds + \frac{p_1}{s''_1 - s'_1} \int_{s'_1}^{s''_1} F\left(\frac{x_{п} - s}{\sigma}\right) ds \right|, \quad (8)$$

де  $p^{**}_{пом}$  визначалася як:

$$p^{**}_{пом} = p_1 \alpha + p_2 \beta = p_1 - \frac{p_1}{s''_1 - s'_1} \times \int_{s'_1}^{s''_1} F\left(\frac{x_{п}^* - s}{\sigma}\right) ds + \frac{p_2}{s''_2 - s'_2} \int_{s'_2}^{s''_2} F\left(\frac{x_{п}^* - s}{\sigma}\right) ds, \quad (9)$$

а порогове значення  $x_{п}$  знаходилось за умови:

$$x_{п} = \arg \min_x \{ \Lambda(x) = p_1/p_2 \},$$

$$\Lambda(x) = \frac{\int_{S_2} w_2(s, s'_2, s''_2) W(x | s) ds}{\int_{S_1} w_1(s, s'_1, s''_1) W(x | s) ds}.$$

При моделюванні, образи, що розпізнавались, розташовувалися на різних відстанях в метриці ознаки. Тому для порівняння алгоритмів бралися максимальні значення величини  $\Delta p_{пом}$ .

На рис. 1 зображені графіки залежності максимальної величини  $\Delta p_{пом \max}$  від обсягу навчальної вибірки. З графіків видно, що при збільшенні обсягу вибірки якість навчання зростає.

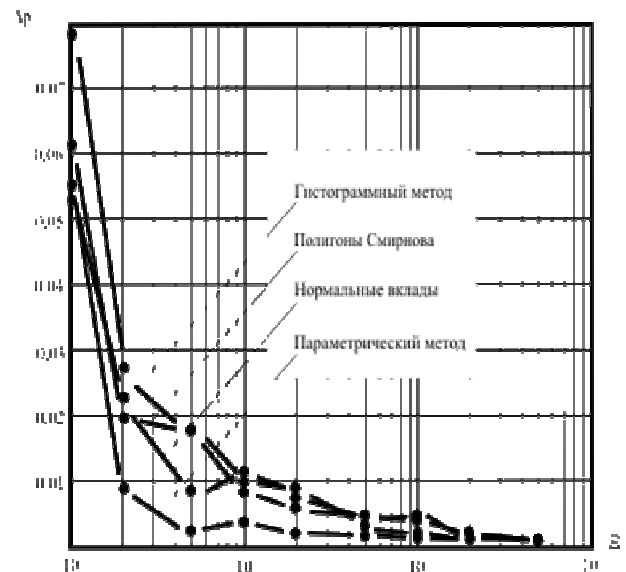


Рис. 1. Графік залежності  $\Delta p_{пом}$  від обсягу вибірки, що навчає

Аналіз показав, що коли вибірка, яка навчас, дорівнює 20–1000 вимірювань, доцільно використовувати параметричні алгоритми розпізнавання.

Серед непараметричних алгоритмів в гіршу сторону можна відзначити алгоритми з усередненням методом гістограм.

Методи нормальних внесків і полігони Смирнова в цілому мають приблизно однакові погрішності.

Однак при великих обсягах ( $N > 1000$ ) вибірки величини  $\Delta r_{\text{пом max}}$  у параметричних і непараметричних алгоритмах мало відрізняються друг від друга, тому доцільно застосування гістограмного методу через його простоту і мінімальну кількість математичних операцій.

Використання малих вибірок (до 20 вимірів) недоцільно у зв'язку з низькою якістю синтезованих алгоритмів.

### Висновок

Таким чином, розроблена методика оцінювання якості синтезованих алгоритмів розпізнавання з навчанням джерел радіовипромінювань в автоматизованих засобах УКХ РР.

Особливістю запропонованої методики є те, що вона розроблена на основі комплексного застосування методик аналітичного оцінювання якості синтезованих алгоритмів та елементів статистичного моделювання.

Методика дозволяє спростити розрахунки та врахувати неточність поділу вибіркового ознакового простору, яка виникає при синтезі правил прийняття рішень за рахунок погрішностей оцінювання усереднених функцій правдоподібності або їхніх параметрів, які застосовуються в синтезованих алгоритмах розпізнавання.

### Список літератури

1. Певцов Г.В. Алгоритм обучения системы распознавания образов, заданных сложными эталонными описаниями / Г.В. Певцов, В.А. Лупандин, Д.А. Колисниченко // *Збірник тез доповідей I наукової конференції молодих вчених Харківського військового університету 13-14 листопада 2002 року.* – Х.: ХВУ, 2003. – С. 66.

2. Певцов Г.В. Параметрическое обучение многоальтернативных алгоритмов распознавания радиоизлучений и их источников, заданных сложными эталонными описаниями / Г.В. Певцов, В.А. Лупандин, Д.А. Колисниченко // *Системы обработки информации: Зб. науч. праць.* – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 1. – С. 24-28.

3. Певцов Г.В. Синтез непараметрических алгоритмов распознавания групп радиоизлучений с оценением усредненных функций правдоподобия методом гистограмм / Г.В. Певцов, В.А. Лупандин // *Системы обработки информации: Зб. науч. праць.* – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 3. – С. 23-33.

4. Певцов Г.В. Синтез непараметрических алгоритмов распознавания образов, заданных сложными эталонными описаниями, на основе аппроксимации статистических усредненных функций правдоподобия полигонами Смирнова / Г.В. Певцов, В.Л. Русских, В.А. Лупандин // *Системы обработки информации: Зб. науч. праць.* – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 5. – С. 28-32.

5. Певцов Г.В. Синтез алгоритмов распознавания групп радиоизлучений с обучением на основе непараметрического оценивания усредненных функций правдоподобия методом нормальных вкладов / Г.В. Певцов, В.А. Лупандин, Д.И. Уманец // *Системы обработки информации: Зб. науч. праць.* – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 4. – С. 109-113.

6. Певцов Г.В. Синтез алгоритмов многоальтернативного распознавания образов на основе проверки сложных статистических гипотез по критерию максимума апостериорной вероятности / Г.В. Певцов, В.А. Лупандин // *Известия вузов. Радиоэлектроника.* – 2001. – Т.44, № 11. – С. 77-80.

Надійшла до редколегії 23.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Певцов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА СТАТИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ С УЧЕБОЙ НА ОСНОВЕ СЛОЖНОГО ЭТАЛОННОГО ОПИСАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В.А. Лупандин

*Разработана методика оценивания качества синтезированных алгоритмов распознавания образов с обучением в автоматизированных средствах радиомониторинга, которая позволяет учесть неточность деления выборочного признакового пространства, которое возникает при синтезе правил принятия решений за счет погрешностей оценивания усредненных функций правдоподобности или их параметров.*

**Ключевые слова:** распознавание образов, радиомониторинг, принятие решений.

### METHOD AND RESULTS OF EVALUATION OF QUALITY OF STATISTICAL ALGORITHMS OF RECOGNITION WITH STUDIES ON BASIS OF DIFFICULT STANDARD DESCRIPTION IN THE AUTOMATED FACILITIES OF RADIOMONITORING

V.A. Lupandin

*The method of evaluation of quality of the synthesized algorithms of recognition of patterns is developed with teaching in the automated facilities of radiomonitoring, which allows to take into account inaccuracy of division of sample indicational space which arises up at the synthesis of decision-making rules due to the errors of evaluation of averaged functions of plausibility or their parameters.*

**Keywords:** recognition of patterns, radiomonitoring, decision-making.