

УДК 621.391.82

В. С. НАКОНЕЧНИЙ, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ Й МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

**Здійснено порівняльний аналіз методів статистичного розпізнавання з метою вибору найбільш ефективного з них у разі функціонування системи розпізнавання за умов обмеженого часу та невизначеності законів розподілу вектора ознак. Як один із таких методів запропоновано модифікований кореляційний алгоритм, що за результатами порівняльного аналізу показав певні переваги порівняно з відомими методами розпізнавання. Досліджено залежності якісних показників запропонованих методів від кількості ознак розпізнавання та кількості вибірок вектора ознак для різних законів їх розподілу.**

**Ключові слова:** ознака; вектор ознак; метод розпізнавання.

### Вступ

При проектуванні та створенні систем розпізнавання постає надзвичайно важлива проблема вибору методу розпізнавання, який може базуватися або на правилах, що впливають з експериментального знання предметної області, або на статистичних властивостях початкової вибірки. З огляду на обмеженість відношення сигнал/шум і відсутність апріорних даних про закони розподілу вимірюваних ознак об'єктів радіолокаційного моніторингу (ОРЛМ) розробка методу радіолокаційного розпізнавання (РЛР) зводиться до розв'язання статистичної задачі розпізнавання типу ОРЛМ перетворенням вхідної інформації у вихідну з ухваленням рішення про те, до якого типу належать розпізнавані ОРЛМ [1; 2]. Як вхідна інформація можуть використовуватися такі характеристики розпізнаваних об'єктів, як ефективна площа розсіювання; радіальна швидкість; висота польоту; довжина вимірюваного радіолокаційного далекомірного портрета (РЛДП) ОРЛМ; кількість максимумів цього портрета й відстані між ними — параметри, які описують форму ОРЛМ; коефіцієнт кореляції вимірюваного РЛДП ОРЛМ з еталонним РЛДП кожного  $i$ -го класу.

Через помилковий вибір методу розпізнавання може невинувато зрости обсяг вхідної ознакової інформації та кількість вибірок цих ознак, що неминуче призведе до зростання обчислювальних витрат, а отже, і тривалості процесу ухвалення рішення про тип досліджуваного ОРЛМ. Остання обставина дуже важлива при розробці систем РЛР, які мають працювати в реальному масштабі часу.

### Розв'язання даної проблеми

Для розв'язання поставленої проблеми необхідно проаналізувати різні методи розпізнавання типу ОРЛМ із метою вибору найбільш ефективного. Саме такий аналіз є одним із головних етапів роботи систем розпізнавання в реальному масштабі часу.

Методи класифікації ОРЛМ, застосовувані при розпізнаванні, можуть різнитися за кількістю етапів, необхідних для ухвалення рішення, а також за характером і ступенем урахування статистики ознак, сигналів і завад.

За етапністю розрізняють методи одно- та багатоетапного ухвалення рішень. *Одноетапне* ухвалення рішень передбачає обов'язкову видачу оцінки  $k = \hat{l}$  класу  $l$  відомого алфавіту з припустимою вірогідністю. До *багатоетапності* ухвалення рішень можуть спонукати такі міркування:

- доцільність відмови від видачі рішення на першому етапі за відсутності додаткового набору ознак;
- доцільність ухвалення попереднього, менш точного рішення, коли ще немає додаткового набору ознак;
- необхідність узагальнити попередні рішення, отримані в різні моменти часу або від різних джерел інформації.

За ступенем урахування статистичних закономірностей розрізняють *лінгвістичні* та *статистичні* методи розпізнавання. За характером урахування статистичних закономірностей серед статистичних методів виокремлюють *параметричні* (баєсівські і не баєсівські), *непараметричні* і *нейрокомп'ютерні* методи.

*Лінгвістичні методи* не враховують статистики ознак для розпізнавання. Ознаки, які вводяться, піддають опису в якісному плані, часто двійковими цифрами 0 або 1. Опис ознак мовою алгебри логіки — лінгвістичний (мовний, кодовий, синтаксичний), становить у цьому разі основу розпізнавання.

*Баєсівські параметричні алгоритми*, на відміну від параметричних не баєсівських, враховують не тільки статистику параметрів завад, флуктуацій сигналів і ознак, а й відповідні гіпотези щодо апріорних імовірностей  $P_i$  різних елементів алфавіту класів. Баєсівські алгоритми враховують імовірнісні закони розподілу вектора ознак

розпізнавання, забезпечуючи найнижчу ймовірність похибки. Проте для їх застосування необхідно знати апіорні ймовірності розподілу ознак розпізнавання, що на практиці дуже важко реалізувати. Структура методів і пристроїв обробки сигналів у цьому випадку визначається з математичного розрахунку.

**Статистика ознак сигналів**, не гауссівська в загальному випадку, устанавлюється за допомогою натурального експерименту, математичного або фізичного моделювання. Упровадження цієї статистики можна тлумачити як навчання щодо розпізнавання, як адаптацію до конкретних умов розпізнавання.

**Непараметричні алгоритми** синтезуються евристично без явного формулювання припущень стосовно конкретних статистичних розподілів, причому в деяких випадках їх можна розглядати як евристичне спрощення параметричних баєсівських методів.

**Нейрокомп'ютерні методи** розпізнавання характеризуються попередньо заданою універсальною структурою з великою кількістю невідомих параметрів, що коригуються в процесі адаптації. Методи нейрокомп'ютерного розпізнавання мають поряд із перевагами певні недоліки. Так, на якість навчання і функціонування штучної нейромережі (ШНМ) істотно впливає:

- а) зміна відношення сигнал/шум;
- б) мінливість (шуми) РЛДП залежно від ракурсу ОРЛМ;
- в) неточність оцінки дальності до ОРЛМ.

Сукупність перелічених чинників характеризує адитивну (шуми) і мультиплікативну (шум РЛДП, часткова невизначеність дальності ОРЛМ, «блукання» РЛДП відносно центра «вікна» спостереження) складові перешкоди розпізнавання ОРЛМ за їхніми далекомірними портретами. Тому в реальних умовах радіолокаційного розпізнавання постає необхідність експериментального врахування адитивних і мультиплікативних перешкод щодо функціонування ШНМ. Окрім того, обчислювальні витрати при нейрокомп'ютерному розпізнаванні вдвічі чи навіть утричі перевищують обчислювальні витрати в разі кореляційного розпізнавання [3]. Тому сьогодні немає сенсу застосовувати методи нейрокомп'ютерного розпізнавання за умов реального масштабу часу. Саме тому в цій статті їх аналіз не проводиться.

**Мета статті** — здійснити порівняльний аналіз ефективності різних методів розпізнавання при їх функціонуванні за умов обмеженого часу. Аналіз ефективності розпізнавання охоплює методи Кейпона, Баеса, відстань Махаланобіса, «тепловий шум» у плані їх порівняння з розробленим модифікованим кореляційним методом.

За результатами проведеного математичного моделювання досліджено залежності якісних по-

казників розпізнавання від кількості  $n$  вибірок вектора ознак розпізнавання та кількості  $P$  самих ознак для різних законів розподілу цього вектора ознак.

За умов обмеженого часу та апіорної невизначеності параметрів законів розподілу вектора ознак розпізнавання постає необхідність у пошуку методів, що найбільшою мірою наближаються до оптимальних. Із [2; 4] відомо, що серед одноетапних непараметричних методів РЛР найбільшу ймовірність правильного розпізнавання (ІПР) забезпечують евристичні алгоритми обчислення відстаней, зокрема **метод відстань Махаланобіса (Mh)** [3].

$$K = \arg \min_n (S - S_{en})^* \cdot P_n^{-1} \cdot (S - S_{en}), \quad (1)$$

де  $S$  і  $S_{en}$  — вектор відповідно вимірюваних ознак і ознак  $n$ -го еталона ( $n = 1, \dots, N$ );

$P_n$  — оціночна кореляційна матриця відхилень вектора вимірюваних ознак від еталонного вектора  $n$ -го класу,  $P_n = \left\{ (S - S_{en})(S - S_{en})^* + I_{ш} \right\}$ ;  $I_{ш}$  — діагональна матриця дисперсій власних шумів  $p$  каналів виміру ознак розпізнавання,  $I_{ш} = (S_{ш1}^2, S_{ш2}^2, \dots, S_{шp}^2)$ .

Недолік таких методів полягає в необхідності пошуку мінімуму, а це, у свою чергу, потребує використання чисел, зниження шумів округлення й зрізання, а також обернення в реальному масштабі часу великої кількості  $N$  кореляційних матриць  $P_n$ .

Саме тому становлять інтерес евристичні методи оцінювання сумарної потужності ознак розпізнавання, які збігаються з ознаками еталона.

Характерні представники таких методів — це відомі в цифровому спектральному аналізі

#### **алгоритми Кейпона (Кр)**

$$K = \arg \max_n \frac{1}{S_{en}^* \cdot P^{-1} \cdot S_{en}}, \quad (2)$$

а також «тепловий шум» (Th)

$$K = \arg \max_n \frac{1}{S_{en}^* \cdot (P^{-1})^2 \cdot S_{en}}, \quad (3)$$

де  $P = S \cdot S_{en} + I_{ш}$  — оціночна кореляційна матриця вимірюваних ознак розміром  $p \times p$ .

Ефективність цих методів, як і алгоритму (1), залежить від відношення сигнал/шум, що висуває жорсткі вимоги стосовно точності виміру всіх ознак, використовуваних при розпізнаванні. Але алгоритми (2) і (3), на відміну від (1), дають змогу скоротити часові та обчислювальні витрати завдяки оцінюванню однієї оберненої кореляційної матриці  $P^{-1}$  замість  $N$  матриць  $P_n$ . Це особливо важливо в разі великої розмірності вектора ознак  $S$  за умов роботи системи РЛР у реальному масштабі часу.

Метод Баєса (Bc) у матричному вигляді подається так:

$$K = \frac{e^{(S_{ei}^* P^{-1} S_{ei})}}{\sqrt{(2\pi)^P D}} \quad (4)$$

Ефективність методів розпізнавання (1) – (4) було оцінено порівняно з розробленим *модифікованим кореляційним методом (Kn)*

$$K = \frac{1}{L} \cdot \frac{\sum_{l=1}^L (S_l - \bar{S}_l) \cdot (S_{en} - \bar{S}_{en})}{\sigma_s \cdot \sigma_{en}} \quad (5)$$

де  $L$  — кількість виконань при розпізнаванні випробувань;  $(S_l, \bar{S}_l)$  —  $l$ -й відповідно прийманий і усереднений за  $p$  вектор ознак;  $(S_{en}, \bar{S}_{en})$  — відповідно  $n$ -й і усереднений вектор еталонних ознак;  $\sigma_s$  і  $\sigma_{en}$  — середньоквадратичне відхилення відповідно різниці  $(S_l, \bar{S}_l)$  і  $(S_{en} - \bar{S}_{en})$ .

Для оцінювання ефективності розпізнавання методів (1) – (5) виконано експеримент, в якому за ознаки розпізнавання було взято відліки РЛДП макетів літаків, заздалегідь виміряні в безлунової камері за допомогою розробленого автором цієї статті експериментального вимірювального комплексу [5; 6]. Виміряні РЛДП було розбито на 11 відліків ( $P = 11$ ), кількість яких дорівнює розмірності вектора  $S$  ознак. Далі згідно з (1) – (5) методами математичного моделювання здійснювалося порівняння кожного із семи виміряних векторів  $S$  ознак розпізнавання з еталонним  $S_{en}$ . Кількість  $n$  вибірок вектора ознак майже втричі перевищувала розмірність самого цього вектора, тобто було взято  $n = 30$ . Кількість  $P$  ознак розпізнавання дорівнювала семи ( $P = 7$ ). При цьому кореляційний зв'язок між попередньою і наступною ознакою задавався мінімальний.

За таких умов математичного моделювання при  $n = 30$  значення ІПР для всіх аналізованих методів було максимальне, що доводить, по-перше, велику інформативність відліків РЛДП як ознак для розпізнавання, а по-друге, засвідчує реальну змогу застосування для розпізнавання всіх запропонованих методів Kp, Th, Mh, Kn і Bc.

На наступному етапі моделювання задачу розпізнавання було значно ускладнено. Для цього як еталонні РЛДП було взято РЛДП одного й того самого макета літака, але з незначними відмінностями за амплітудами спектральних сплесків (різне підвісне озброєння макетів літаків).

У результаті проведеного експерименту було визначено ІПР залежно від кількості  $n$  вибірок вектора ознак розпізнавання для методів (1) – (3) і (5), (рис. 1).

Аналізуючи рис. 1, доходимо висновку, що при  $n \leq 9$  для всіх аналізованих методів спостерігається зростання ІПР. Так, при  $n = 5$  значення ІПР для

методу Kn становить 0,97. Для цього випадку спостерігається перевага методу Kn порівняно з методами Kp і Mh майже на 8% (те саме значення ІПР методи Kp і Mh забезпечують при  $n = 8$ , а метод Th при  $n = 12$ ).

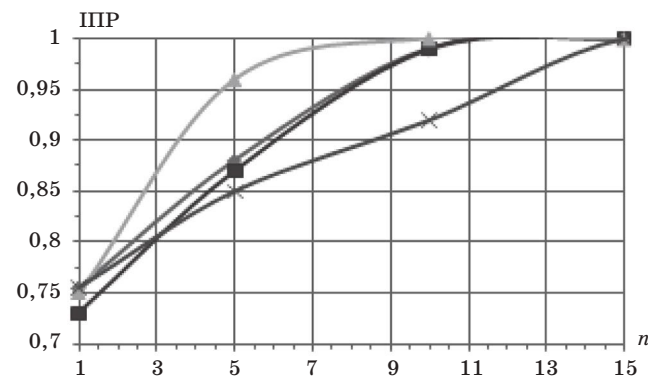


Рис. 1. Графіки залежностей ІПР від кількості  $n$  вибірок вектора ознак (— Kp, ■ Mh, ▲ Kn, × Th)

Результати проведеного математичного моделювання показують високу ефективність розпізнавання макетів літаків адаптивними методами Kn, Kp і Mh при порівняно невеликій ( $n \approx 10$ ) кількості вибірок вектора ознак, а також можливість застосування цих методів для розпізнавання в радіолокаційних системах супроводу в реальному масштабі часу.

Проте в разі роботи РЛС у реальних умовах, коли існують різного роду перешкоди, показник сигнал/шум може знизитися, що неминуче призведе до зниження роздільної здатності РЛС за дальністю, а отже, і до зниження інформативності вимірюваного нею РЛДП ОРЛМ. Окрім того, за умов обмеженої ширини спектра зондувального сигналу РЛС інформативність РЛДП також залежить від ракурсу ОРЛМ, різко знижуючись зі збільшенням курсового кута. Тому поряд із РЛДП доцільно використовувати й інші ознаки розпізнавання, вимірювані в РЛС супроводу, такі як швидкість і висота польоту ОРЛМ, його ефективна поверхня розсіювання тощо. Різноманітність таких ознак розпізнавання тягне за собою і відмінність законів їх розподілу. Тому постає необхідність у порівняльному аналізі ефективності методів радіолокаційного розпізнавання за різних ознак і різних законів їх розподілу.

Для порівняльного оцінювання запропонованих методів розпізнавання для різних законів розподілу вектора ознак було здійснено математичне моделювання вимірюваних ознак із подальшим ухваленням рішення про тип об'єкта, що має такі самі ознаки.

Вектор  $S$  ознак розпізнавання було змодельовано для кожного конкретного випадку за допомогою датчика випадкових чисел із рівномірним, нормальним законами та законом розподілу Лапласа [7; 8]. Інформативність кожного з елементів



вектора  $S$  ознак задавалася відповідним амплітудним множником. При цьому було змодельовано досить складну ситуацію, коли еталонні значення трьох з восьми ознак розпізнавання мали близькі значення математичного сподівання, тобто ступінь перекриття ознак розпізнавання становив близько 0,6. Кількість розпізнаваних об'єктів дорівнювала восьми, третій еталон макета було обрано як «робочий». Кількість вибірок ознак розпізнавання дорівнювала десяти ( $n = 10$ ), коефіцієнт  $\rho$  міжознакової кореляції мав мінімальне значення ( $\rho = 0,01$ ). Якість розпізнавання характеризувалася оцінним значенням ІПР, що в кожному випробуванні становило  $l_0/l$ , де  $l_0$  — кількість правильних рішень;  $l$  — кількість випробувань із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_v$  величини  $l_0/l$ , що характеризує вірогідність знайденого значення ІПР при  $l = 50$ . Таку саму кількість випробувань було виконано і для розрахунку значення  $\sigma_v$ .

У результаті математичного моделювання було здобуто залежності оцінних значень ІПР від розмірності  $P$  вектора ознак для нормального

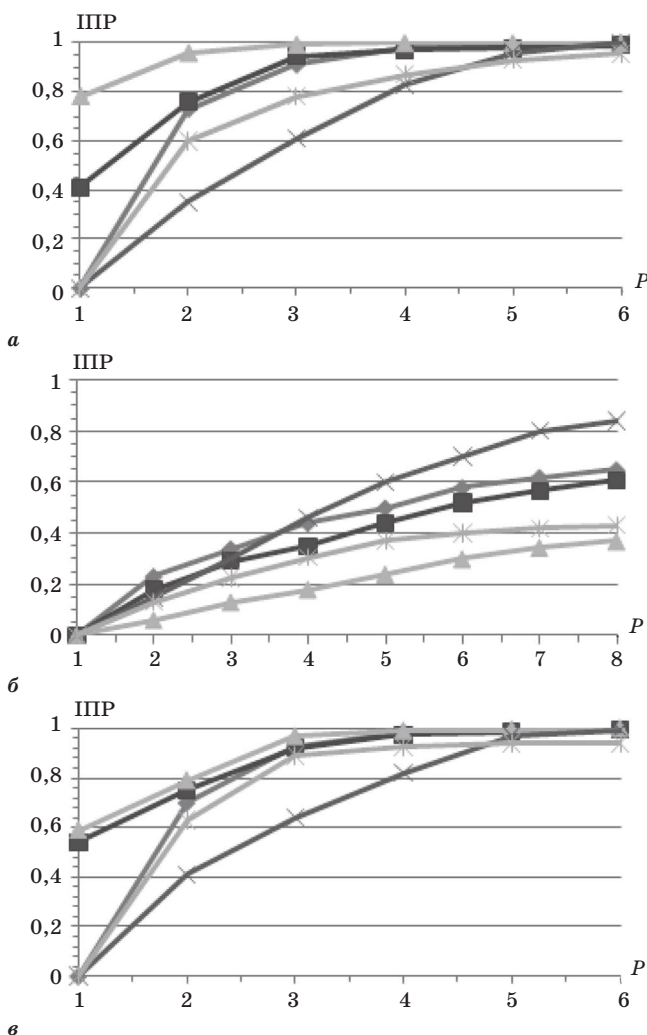


Рис. 2. Графіки залежностей ІПР від розмірності  $P$  вектора ознак для нормального (а), рівномірного (б) законів розподілу вектора ознак та для закону розподілу вектору ознак за Лапласом (в) (◆ Кр, ■ Мh, ▲ Вc, × Кп, \* Th)

(рис. 2, а), рівномірного (рис. 2, б) законів його розподілу та закону розподілу за Лапласом (рис. 2, в).

Аналіз графіків, наведених на рис. 2, показує, що для всіх методів розпізнавання значення ІПР зростає зі збільшенням кількості вимірюваних ознак. Так, для нормального закону розподілу за Лапласом (див. відповідно рис. 2, а, в) значення ІПР для методів Вc, Кр, Мh і Кп досягає максимуму при  $P = 6$ . Таке саме значення ІПР за методом Th дістаємо тільки при  $P > 8$ .

У разі рівномірного закону розподілу (рис. 2, б), при  $P > 4$  маємо значно більше значення ІПР, обчислене за методом Кп, ніж у разі застосування всіх інших методів.

Зокрема, повільне зростання ІПР для методів Кр, Th і Мh пояснюється тим, що при рівномірному законі розподілу вектора ознак немає чітко визначеного глобального максимуму, а отже, потрібно значно більше часу на розрахунок ІПР цими методами.

Що ж до методу Байєса, то він взагалі тут недоцільний.

Результати математичного моделювання, для рівномірного закону розподілу (див. рис. 2, б) показують, що метод Кп при  $P = 8$  забезпечує значення ІПР, яке дорівнює 0,82, що відповідно на 15; 21; 38 і 43% перевищує аналогічний показник для методів Кр, Мh, Th і Вc.

### Висновки

Аналіз результатів здійсненого математичного моделювання показує, що при проектуванні та розробці систем розпізнавання, які мають працювати в реальному масштабі часу, найдоцільніше застосовувати розроблений модифікований кореляційний метод, що забезпечує набагато вищу ефективність, ніж методи Кр, Мh, Th і Вc, використовуючи обмежену кількість як ознак розпізнавання, так і вибірок цих ознак.

### Література

1. Небабин, В. Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В. Г. Небабин, В. В. Сергеев. — М.: Радио и связь, 1984. — 121 с.
2. Ширман, Я. Д. Радиолокационное распознавание: учеб. пособие по курсу «Теоретические основы радиолокации» / [Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Леценко, Г. Д. Братченко]. — ХВУ, 1994. — 122 с.
3. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик. — М.: Высш. шк., 1989.
4. Ширман, Я. Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / [Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Леценко и др.] // Радиолокация и радиометрия. — 2000. — № 2, вып. 3. — 97 с. — (Сер. «Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. Радиотехника»).

5. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипник.— М.: Высш. шк., 1989.

6. Мордвицев, Н. В. Исследование возможности измерений радиолокационных дальностных портретов воздушных целей при использовании современных методов цифрового спектрального анализа / Н. В. Мордвицев, В. С. Наконечный, К. В. Садовый // Контрольно-измерительные приборы и автоматика.— 2005.— Вып. май/июнь.— С. 43–47.

7. Наконечный, В. С. Шляхи підвищення інформативності радіолокаційних дальнісних пор-

третів повітряних об'єктів оперативного спостереження / В. С. Наконечний, В. А. Дружинін // Сучасний захист інформації.— 2013.— № 2.— С. 78–81.

8. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов.— М.: Радио и связь, 1982.— 624 с.

9. Горяинов, В. Т. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов / В. Т. Горяинов, А. Г. Журавлев; под ред. В. И. Тихонова.— М.: Сов. радио, 1980.— 544 с.

В. С. Наконечный

#### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Проведен сравнительный анализ методов статистического распознавания с целью выбора наиболее эффективного из них при функционировании системы распознавания в условиях ограниченного времени и неопределенности законов распределения вектора признаков. В качестве одного из таких методов предложен модифицированный корреляционный алгоритм, который по результатам сравнительного анализа показал определенные преимущества по сравнению с известными методами распознавания. Исследованы зависимости качественных показателей предлагаемых методов от числа признаков распознавания и количества выборок вектора признаков для различных законов их распределения.

**Ключевые слова:** признак; вектор признаков; метод распознавания.

V. S. Nakonechny

#### ANALYSIS OF EFFECTIVENESS AND ABILITY OF USE OF UP-TO-DATE TECHNIQUES OF OBJECTS RECOGNITION OF RADIOLOCATING MONITORING

In the article the comparative analysis of statistical recognition methods was provided with the aim of selecting the most effective recognition in the operation of the system in conditions of limited time and uncertainty of the laws distribution of the feature vector. As one of the methods was proposed modified correlation algorithm, which in the comparative analysis was shown certain advantages over known methods of recognition. The dependence of quality indicators of proposed methods on the number of the recognition signs and the number of samples feature vector in case of different laws of their distribution.

**Keywords:** sign; vector of signs; method of recognition.

