

А.І. Ільницький, О.І. Бурба, О.О. Пасічник

Статистичні характеристики інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж

Рассмотрены основные задания при радиомониторинге и распознавании телекоммуникационных сетей и информационные признаки параметров сигналов. Высокая эффективность радиомониторинга с минимальными информационными потерями обеспечивается при оптимальном количестве информационных признаков.

Ключевые слова: радиомониторинг, распознавание, телекоммуникационные сети, информационные признаки, оценки параметров, сигналы, источники излучения.

Розглянуто основні завдання при радіомоніторингу і розпізнаванні телекомунікаційних мереж та інформаційні ознаки параметрів сигналів. Висока ефективність радіомоніторингу з мінімальними інформаційними втратами забезпечується оптимальною кількістю інформаційних ознак.

Ключові слова: радіомоніторинг, розпізнавання, телекомунікаційні мережі, інформаційні ознаки, оцінки параметрів, сигнали, джерело випромінювання.

Вступ. У процесі ведення радіомоніторингу (РМ) телекомунікаційних мереж (ТКМ), їх ідентифікації, визначення технічних характеристик і фазового стану (їх цінності, ступеня загрози або безпеки) одним із завдань є їх класифікація й розпізнавання [1]. Як викладено в [2], найбільш ефективно це завдання може бути виконано на основі положень, методик та алгоритмів, що реалізують структурно-системний метод, де під класифікацією розуміють поділ всієї множини об'єктів і джерел на неперетинні класи, а під розпізнаванням – віднесення досліджуваного об'єкта до того чи іншого класу. При цьому використовується відомий набір інформаційних ознак (ІО): технічних; групових та індивідуальних; статичних і динамічних; кількісних або якісних та ін.

Ефективність процесів розпізнавання при використанні структурно-системного підходу потребує максимальної кількості радіотехнічних ІО, що надають практично повну характеристику об'єкта РМ: діапазон робочих радіочастот, види модуляції, структура сигналів, параметри сигналів (частотні, фазові, амплітудні, часові), потужність каналів, режими роботи, кількість абонентів тощо. Тобто, має бути сформований повний опис об'єкта максималь-

но можливим набором ІО, що дає можливість з високою ймовірністю здійснити розпізнавання об'єкта й визначити його фазовий стан.

Аналіз досліджень та публікацій

При синтезі систем розпізнавання дослідники зіштовхуються з досить складним і неоднозначним завданням відбору ІО, що формують окремі та повну характеристики об'єкта РМ [2]. При цьому актуальними завданнями, що підлягають дослідженню й вирішенню, є визначення розмірності ознакового простору для опису об'єктів РМ і їх фазового стану; обчислення мінімально необхідного й максимального набору ІО, що формують відповідні характеристики; визначення максимальної кількості однотипних об'єктів РМ в системі розпізнавання.

До цього часу формалізована постановка цього завдання практично відсутня, а її вирішення передбачає: зменшення до мінімуму (оптимізації) кількості необхідних ІО для опису характеристик об'єктів РМ без істотного збільшення ймовірності похибки розпізнавання; можливість використання простих алгоритмів розпізнавання; зменшення ймовірності похибки розпізнавання.

Сьогодні відомі два основних підходи до складання достатньо повних характеристик [3]:

- перший полягає в тому, що з самого початку ставиться завдання повного опису з невеликою кількістю ознак значної інформативності. Однак всі використовувані при цьому методи засновані на евристичних та емпіричних підходах, тобто формування характеристик визначається досвідом та інтуїцією розробника або експерта;

- другий полягає у тому, що з великої кількості вихідних ІО, за встановленим критерієм ефективності відбирається мінімально не обхідна кількість найбільш корисних ознак для розпізнавання. Однак за обов'язковою наявністю зв'язку між критеріями ефективності ІО та ймовірністю похибки розпізнавання функціональної залежності між ними не встановлено. Це не дає можливості оцінити зміну ймовірності похибки розпізнавання після мінімізації опису.

Постановка завдання

На підставі викладеного постає потреба коректно описати процедуру відбору та визначення інформативності ІО і мінімізувати (оптимізувати) їхній простір у процесі розпізнавання джерел та об'єктів ТКМ.

Інформаційні ознаки мають відповідати таким основним вимогам [4]:

- формуватися на основі аналізу оцінок параметрів і характеристик джерел випромінювань, доступних для виміру й відображати найбільш істотні для розпізнавання властивості джерел та об'єктів ТКМ;

- мати високий ступінь стійкості в просторі й часі, що обумовлено значною тривалістю пошуку джерела чи об'єкта в даному районі або даному стані;

- мати зрозумілий фізичний зміст і чітке математичне або логічне трактування (логічне розпізнавання);

- розмірність ознакового простору має бути обрана раціонально, оскільки від її значення залежить величина імовірності і часу розпізнавання;

- інформаційні ознаки за багаторівневого розпізнавання повинні мати можливість трансформуватися в інші, більш загальні, що дозволяє перейти від розпізнавання джерел випро-

мінювання до розпізнавання типів об'єктів та їхнього стану. Тобто кожна ознака має бути корельованою не тільки з джерелом, але через нього й з об'єктами ТКМ, до складу яких воно входить організаційно або функціонально. Цю властивість назовемо *зв'язністю джерела та об'єкта*;

- кількість відібраних ознак не повинна впливати на рівень і кількість інформації, що отримується, та має забезпечити певний запас упевненості в правильності прийняття рішення.

Відбір, формування й класифікація ІО – це процедури обробки сигнальної інформації, необхідні для розпізнавання джерел і об'єктів.

Сьогодні не існує теоретично обґрунтованих методів, які б вирішували завдання відбору й виділення найбільш інформативних системних ознак для опису об'єктів ТКМ, визначених для розпізнавання. Вирішення цього фундаментального завдання безпосередньо пов'язано зі змістом, вкладеним у поняття інформативності радіомоніторингу ТКМ [2].

Взагалі ІО – це специфічні характеристики, параметри або їх комбінації, надані у вигляді вихідних даних про радіотехнічні системи, системи управління і зв'язку об'єктів ТКМ, отримані в результаті фізичних або математичних перетворень даних попереднього радіо- або науково-технічного моніторингу.

Наукове завдання відбору і виділення ІО ускладнюється фактором невизначеності вихідних даних, різноманітністю інформації, з якої потрібно відібрати тільки ту частину, яку можна систематизувати й упорядкувати для забезпечення необхідної величини імовірності правильного прийняття рішення. При цьому окремо виділяють ознаки належності і стану. Ознаки належності характеризують віднесення прийнятих сигналів до певного класу джерел випромінювань або об'єктів ТКМ, а ознаки стану – фазовий стан об'єктів на визначений момент часу. Якщо ознаки належності можна вважати тривалими, то ознаки стану практично нетривалі та визначаються динамікою розвитку подій та часом пошуку джерела або об'єкта на місцевості.

Крім того, використовуються також групові та індивідуальні ІО радіоелектронних засобів (РЕЗ). Групові ознаки характеризує їхня належність до групи РЕЗ або групи об'єктів. Індивідуальні ознаки характеризує належність випромінювання до конкретного джерела ТКМ, що дозволяє контролювати не тільки кількість первинних джерел, але і їх переміщення. Також ознаки можуть бути кількісними і якісними, детермінованими й статистичними. Однак у більшості випадків розпізнавання як джерел, так і об'єктів ТКМ проводиться за умов невідзначеності вихідних даних і є статистичним [5].

Мета

Метою та основним сенсом статті є розгляд статистичних характеристик інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж, а також визначення оптимальної кількості інформаційних ознак $n_{\text{опт}}$ у вибірці спостереження обсягом N .

Основний матеріал

Для досягнення зазначеної мети необхідно врахувати: групові та індивідуальні закони розподілення оцінок параметрів джерел випромінювання; відстань між середніми значеннями однотипних параметрів суміжних джерел; числові характеристики законів розподілення оцінок параметрів джерел випромінювань (математичне очікування та дисперсію) тощо.

Для вирішення завдання мінімізації (оптимізації) простору ІО необхідно розглянути принципovu можливість та умови розділення і розпізнавання однотипних джерел радіовипромінювання за довільним параметром x . При цьому слід звернути особливу увагу, що під час РМ отримуються не значення параметрів сигналів, а їх оцінки, які мають бути за умовами Крамера-Рао незміщеними та ефективними [6, 7].

Відомо [8], що розподіл усіх статистичних оцінок параметра x можна описати рівнянням

$$P(x) = \sum_{i=1}^n Q_i P_i(x), \quad (1)$$

де Q_i – апіорна ймовірність наявності сигналів i -го джерела; $P_i(x)$ – індивідуальне розподілення ймовірності для i -го джерела.

Якщо розпізнавання здійснюється серед однотипних джерел випромінювання з нормальним (гауссівським) законом щільності розподілу, то можна вважати, що $Q_i = Q_i$ і вираз (1) матиме такий вигляд:

$$P(x) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-m-(2k+1)\Delta m)^2}{2\sigma^2} \right] + \exp \left[-\frac{(x-m+(2k+1)\Delta m)^2}{2\sigma^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

де m та σ – математичне очікування і дисперсія оцінки параметра x ; $2\Delta m$ – відстань між середніми значеннями параметрів, усереднення за усіма джерелами при $k = 0, 1, 2, \dots$

Необхідною умовою розділення сигналів є багатомодальність сумарного закону розподілення [9].

Для подальшого аналізу введемо позначення $\psi = (x-m)$ і знайдемо екстремум функції $P(\psi)$ з умови, що

$$\frac{dP(\psi)}{d\psi} = 0. \quad (3)$$

І, як видно, рішення (3) у подальшому дасть можливість мінімізувати кількість ознак n та отримати їх раціональну або оптимальну величину $n_{\text{опт}}$.

Відомо, що значення $\psi = 0$ відповідає екстремуму функції і є коренями при будь-яких σ і Δm . Нехтуючи тривіальними рішеннями $\psi = \infty$, подамо (3) у вигляді

$$\psi \left(\frac{\exp(\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} + \frac{\exp(-\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} \right) - \Delta m \left(\frac{\exp(\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} - \frac{\exp(-\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} \right) = 0. \quad (4)$$

Такому виразу еквівалентне рівняння

$$\psi \operatorname{ch} \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right] - \Delta m \operatorname{ch} \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right] = 0. \quad (5)$$

Внаслідок того, що $\operatorname{ch}(\psi) \neq 0$, вираз (5) може бути наданий як

$$\frac{\psi}{(2k+1)\Delta m} = th \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right]. \quad (6)$$

Коренями отриманого трансцендентного рівняння є абсциса точок перетинання лівої і правої частин, коли рішення для $\psi = 0$ існує завжди.

Дослідження рішень рівняння (6) дозволяє отримати умову багатомодального розподілу параметрів:

$$\frac{1}{ch^2 \left[\frac{\psi(2k+1)\Delta m}{\sigma^2} \right]_{\psi=0}} \times \frac{(2k+1)\Delta m}{\sigma^2} > \frac{1}{(2k+1)\Delta m}, \quad (7)$$

при тому, що $ch(0) = 1$.

Рішення (7) описує умову багатомодальності:

$$\left[(2k+1)\Delta m \right]^2 > \sigma^2 \quad \text{або} \quad (2k+1)\Delta m > \sigma. \quad (8)$$

При $k = 0$ умова розділення сигналів суміжних джерел випромінювання за обраним параметром буде визначатися нерівністю:

$$\Delta m > \sigma. \quad (9)$$

Отримані умови (8) і (9) визначають принципіву можливість розділення сигналів одностипових джерел за параметром x .

Однак реально у процесі ведення РМ немає можливості отримати обсяг вибірки, достатній для побудови закону розподілення, і визначити точки екстремуму сумарного закону. Тому алгоритми індивідуального розпізнавання мають враховувати обмеження у часі аналізу та обсягу вибірки. Найбільш прийнятний тут є пороговий алгоритм, сутність якого полягає у тому, що вимірюється середнє значення параметра x , навколо якого створюється строб розміром $\frac{\pm \Delta x}{2}$ і надається умовний номер джерела ви-

промінювання. Всі результати, що потрапили у цей строб, стосуються джерела з цим умовним номером; ті, що не потрапили – до сигналів інших джерел з іншим умовним номером. При цьому можливі похибки як першого, так і другого роду, імовірності яких можна визначити і розрахувати [3, 5, 10].

З урахуванням наведеного, ймовірність істинного індивідуального розпізнавання джере-

ла A_i за параметром x буде визначатися ймовірністю влучення результатів виміру параметрів сигналів i -го джерела в область, визначеною величиною Δx , та ймовірністю влучення у строб сигналів суміжних джерел (завад):

$$P_{\text{пр}i} = P(A_i) \left[1 - \left(P \sum_{j=1}^m A_j \right) \right], \quad (10)$$

де $P(A_i) = \int_{m_i - \Delta x/2}^{m_i + \Delta x/2} w_i(x) dx$. При цьому $P \left(\sum_{j=1}^m A_j \right) -$

сумарна ймовірність влучення у строб завадових сигналів; w_i – щільність розподілу ймовірності оцінки параметра x .

Зрозуміло, що залежно від розміру строба відбувається перерозподіл величини похибок першого та другого роду, і, відповідно, ймовірності істинного індивідуального розпізнавання. Існує оптимальне значення величини $\Delta x_{\text{опт}}$, при якому ймовірність коректного індивідуального розпізнавання має максимальну величину [3]. При цьому отриманими залежностями можна користуватися тільки тоді, коли відомі значення σ та Δm . Ці параметри розподілення можуть бути отримані експериментально на підставі обробки даних попереднього РМ, які забезпечать визначення середніх значень $\Delta m x$ для найбільш масових джерел радіовипромінювань.

Величина σx розраховується як сумарна дисперсія нестабільності параметрів $\sigma_{\text{нест}}^2$, впливу шумів $\sigma_{\text{шум}}^2$, похибок вимірювальних пристроїв $\sigma_{\text{вим}}^2$:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{\text{нест}}^2 + \sigma_{\text{шум}}^2 + \sigma_{\text{вим}}^2}. \quad (11)$$

Отже, процедури розрахунку ймовірності істинного індивідуального розпізнавання полягають у наступному: визначається оптимальне значення відношення $\Delta x/\sigma$; розраховується відношення $\Delta m/\sigma$; за величинами $\Delta x/\sigma_{\text{опт}}$ та $\Delta m/\sigma$ визначається величина $P_{\text{пр}}$.

Розглянуті процедури не є оптимальними, однак при достатньо великій щільності джерел випромінювань у зоні РМ, вони найбільш раціональні [10, 11].

Якщо у процесі розпізнавання джерел ТКМ використовується кілька параметрів ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), то виникає необхідність дослідження і визначення залежностей між величиною ймовірності істинного розпізнавання, кількістю оцінок параметрів сигналів ІО та кількістю інформаційних ознак.

Як приклад можна навести такі параметри випромінювань як значення несучої частоти сигналу, його тривалість, частота (період) повторення, спектральні характеристики та інші, що формують їх радіотехнічний опис. Виникає питання щодо визначення необхідної кількості отриманих оцінок параметрів і мінімізації ознакового простору.

Для цього можна скористатися величиною середнього значення ймовірності розпізнавання джерел випромінювань:

$$P_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_{p_i}, \quad (12)$$

де N – кількість типів джерел; P_{p_i} – ймовірність розпізнавання джерела i -го типу, яка характеризується відношенням кількості випадків істинного розпізнавання до загальної кількості спроб.

При автоматизованому розпізнаванні вимірювання k -го параметра здійснюється з точністю, що визначається величиною дискретного інтервалу Δx_k . При цьому оцінка k -го параметру може приймати будь-яке значення з інтервалу $-\frac{x_{k_{\max}} - x_{k_{\min}}}{\Delta x_k}$.

Якщо ввести допоміжну бінарну функцію $\delta(m-i)$:

$$\delta(m-i) = \begin{cases} 1 & \text{при } m = i, \\ 0 & \text{при } m \neq i, \end{cases} \quad (13)$$

то ймовірність розпізнавання джерела i -го типу при вимірюванні k -го параметра визначатиметься як

$$P_{p_i} = \frac{\sum_{x_{k_{\min}}}^{x_{k_{\max}}} \delta(m-i)}{x_{k_{\max}} - x_{k_{\min}}}. \quad (14)$$

У випадку, коли відома ймовірність розподілення за кожним параметром, то ймовірність

розподілення за сукупністю параметрів визначатиметься за формулою додавання ймовірностей [8]:

$$P\left(\sum_{k=1}^n A_k\right) = \sum_{k=1}^n P(A_k) - \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n P(A_k A_j) + \sum_{k=1}^{n-2} \sum_{j=k+1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n P(A_k A_j A_i) - \dots + (-1)^{n-1} P\left(\prod_{k=1}^n A_k\right). \quad (15)$$

Для визначення кількості параметрів, що підлягають вимірюванню, необхідно знайти середню ймовірність розподілення за кожним параметром і розставити їх у порядку зменшення, а потім розрахувати ймовірність розпізнавання за двома, трьома і подальшими параметрами.

Наприклад, якщо відомі ймовірності розподілення за трьома параметрами $P(x_1) = 0,5$; $P(x_2) = 0,4$; $P(x_3) = 0,3$, то загальна ймовірність розпізнавання розраховуватиметься так:

$$P\left(\sum_{k=1}^3 A_k\right) = P(x_1) + P(x_2) + P(x_3) - P(x_1)P(x_2) - P(x_2)P(x_3) - P(x_1)P(x_3) - P(x_1)P(x_2)P(x_3) \approx 0,79.$$

Досвід, логічні міркування і теоретичні розрахунки показують, що в ідеальному випадку зі збільшенням кількості ІО ймовірність розпізнавання як джерел, так і об'єктів ТКМ, має збільшуватися. Однак, це справедливо тільки частково.

Так, за законами теорії ймовірності і математичної статистики, при збільшенні кількості ІО значною мірою починає проявлятися вплив похибок розпізнавання першого і другого роду, які накопичуються і зростають [2, 10]. У результаті ймовірність похибки розпізнавання збільшується, а ймовірність правильного розпізнавання зменшується, що підтверджується результатами статистичного моделювання, наведеного в [2], і аналізу впливу величини розмірності n простору ІО та обсягу вибірки N на ймовірність розпізнавання для джерел радіовипромінювання за довільним параметром x (рис.1).

Статистичне моделювання визначення залежності між величиною ймовірності коректного розпізнавання та кількістю оцінок параметрів сигналів здійснено в середовищі *Math*

lab з використанням наведених процедур (10) – (12) за такими обмеженнями і умовами: кількість параметрів $n = \overline{1,14}$; Ю (оцінки параметрів) сигналів статистично незалежні; щільність імовірності розподілення параметрів відома $w_i = 0,8$; багатомодальність відсутня; значення $\Delta x_i/\sigma_i$ та $\Delta m_i/\sigma_i$ розраховані та нормовані до одиниці; розмір строба селекції $\frac{\pm \Delta x_i}{2}$ для кожного з параметрів визначено; кількість вибірок – три з обсягами N , рівними 20, 100 та 500 значень.

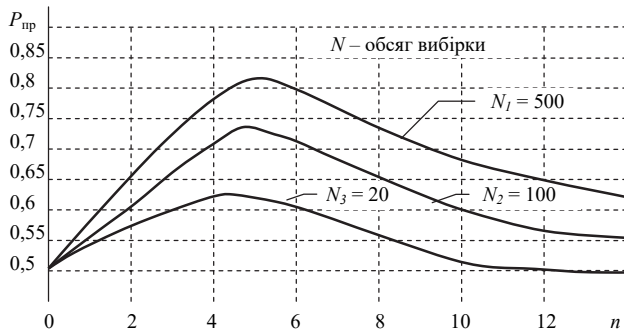


Рис. 1. Залежність ймовірності розпізнавання джерел радіовипромінювання від розмірності простору ознак

На підставі аналізу поданих залежностей можна зробити висновок, що оптимальна кількість Ю має складати величину n , яка дорівнює 4 – 5 одиниць, що обумовлено стабілізацією мінімального рівня похибок першого та другого роду [2].

Інший шлях оптимізації ознакового простору, який підтверджує коректність зробленого висновку, описано у [3], де наведено відповідний математичний підхід і графічні залежності мінімізації ознакового простору (рис. 2), отримані з урахуванням інформаційних втрат $\Delta I_n(H)$ за відповідними значеннями ентропії $H(A_i/x_k)$.

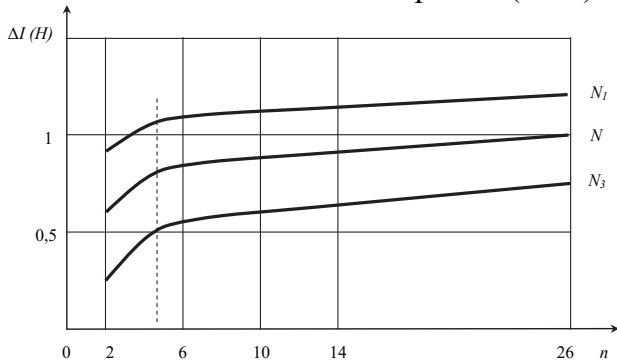


Рис. 2. Залежність інформаційних втрат від розмірності простору ознак

Як видно з графічних залежностей (див. рис. 2), мінімальні інформаційні втрати також забезпечуються при оптимальній кількості Ю, яка складатиме величину n , що дорівнює 4 – 5 одиниць.

Висновки. Основними завданнями радіомоніторингу є виявлення і аналіз радіовипромінювань з розпізнаванням та ідентифікацією джерел сигналів і завад, вимір параметрів сигналів і завад, визначення розташування джерел радіосигналів та завад на місцевості тощо за умов часткової або повної невизначеності.

Під час радіомоніторингу використовуються інформаційні радіотехнічні ознаки параметрів джерел радіовипромінювання, при цьому визначаються не їхні кількісні характеристики, а отримані статистичні оцінки цих параметрів, які мають задовольняти умови Крамера–Рао і бути незміщеними та ефективними.

Ефективність радіомоніторингу визначається величиною ймовірності вірного розпізнавання, залежною від кількості інформаційних ознак n та обсягу вибірки спостереження N .

Висока ефективність радіомоніторингу з максимальною величиною ймовірності істинного розпізнавання та мінімальними інформаційними втратами забезпечується оптимальною кількістю інформаційних ознак, де n дорівнює 4–5 одиниць при достатньо великому обсязі вибірки спостереження N .

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: Задачи, методы, средства. – Горячая линия–Телеком, 2006. – 504 с.
2. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Воениздат, 2001. – 456с.
3. Анисимов В.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. шк., 1983.– 295с.
4. Вартапесян В.А. Радиоэлектронная разведка. – М.: Воениздат, 1991. –254 с.
5. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. – М.: Вузовская книга, 2007. – 355 с.
6. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Вища шк., 1976. – 432 с.
7. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004, – 320 с.

8. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
9. *Кузьмин С.З.* Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 328 с.
10. *Радзиевский В.Г., Сирота А.А.* Теоретические основы радиоэлектронной разведки. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.

11. *Конахович Г.Ф., Бабак В.П., Фисенко В.М.* Специальный радиомониторинг. – М.: Додэка-XXI, 2007. – 383 с.

Поступила 14.11.2016

E-mail: oleg_burba@ukr.net

© А.И. Ильницкий, О.И. Бурба, О.О. Пасечник, 2016

А.И. Ильницкий, О.И. Бурба, О.О. Пасечник

Статистические характеристики информационных признаков источников излучения при радиомониторинге телекоммуникационных сетей

Введение. В процессе радиомониторинга (РМ) телекоммуникационных сетей (ТКС), их идентификации, определения технических характеристик и фазового состояния (их ценности, степени угрозы или безопасности) одной из задач является их классификация и распознавание [1]. Как изложено в [2], наиболее эффективно она может быть решена на основании положений, методик и алгоритмов, реализующих структурно-системный метод, где под классификацией понимают разделение всего множества объектов и источников на непересекающиеся классы, а под распознаванием – определение исследуемого объекта к тому или другому классу. При этом используется известный набор информационных признаков (ИП): технических; групповых и индивидуальных; статических и динамических; количественных или качественных и др.

Эффективность процессов распознавания при использовании структурно-системного подхода требует максимально возможного количества радиотехнических ИП, представляющих собой практически полную характеристику объекта РМ: диапазон рабочих радиочастот, виды модуляции, структуру сигналов, параметры сигналов (частотные, фазовые, амплитудные, временные), мощность каналов, режимы работы, количество абонентов, т.е., должно быть сформировано полное описание объекта максимально возможным набором ИП, что позволяет с высокой вероятностью осуществить распознавание объекта и определить его фазовое состояние.

Анализ исследований и публикаций

При синтезе систем распознавания исследователи сталкиваются с довольно сложной и неоднозначной задачей отбора ИП, формирующих отдельные и полные характеристики объекта РМ [2]. При этом актуальны задачи определения размерности признакового пространства для описания объектов РМ и определение их фазового состояния; вычисления минимально необходимого и максимального наборов ИП, формирующих соответствующие характеристики; определение максимального количества однотипных объектов РМ в системе распознавания.

Сегодня формализованная постановка этой задачи практически отсутствует, а ее решение предполагает уменьшение до минимума (оптимизации) количества необхо-

димых ИП для описания характеристик объектов РМ без существенного увеличения вероятности ошибки распознавания; возможность использования простых алгоритмов распознавания; уменьшение вероятности ошибки распознавания.

Известны два основных подхода к составлению достаточно полных характеристик [3]:

- первый подход заключается в том, что с самого начала ставится задача полного описания с небольшим количеством признаков значительной информативности. Однако все используемые при этом методы основаны на эвристических и эмпирических подходах, т.е. формирование характеристик определяется опытом и интуицией разработчика или эксперта;

- второй заключается в том, что из большого количества исходных ИП, по установленному критерию эффективности отбирается минимально необходимое количество наиболее полезных признаков для распознавания. Однако при обязательном наличии связи между критериями эффективности ИП и вероятностью ошибки распознавания функциональной зависимости между ними не установлено. Это не позволяет оценить изменение вероятности ошибки распознавания после минимизации описания.

Постановка задачи

На основании изложенного возникает необходимость корректно описать процедуру отбора и определения информативности ИП и минимизировать (оптимизировать) их пространство в процессе распознавания источников и объектов ТКС.

Информационные признаки должны соответствовать следующим требованиям [4]:

- формироваться на основе анализа оценок параметров и характеристик источников излучений, доступных для измерения и отражать наиболее существенные для распознавания свойства источников и объектов ТКС;

- иметь высокую степень устойчивости в пространстве и времени, что обусловлено значительной продолжительностью поиска источника или объекта в данном районе или данном состоянии;

- иметь понятный физический смысл и четкую математическую или логическую трактовку (логическое распознавание);

• размерность признакового пространства должна быть выбрана рационально, поскольку от ее значения зависит величина вероятности и времени распознавания;

• информационные признаки при многоуровневом распознавании должны иметь возможность трансформироваться в другие, более общие, что позволяет перейти от распознавания источников излучения к распознаванию типов объектов и их состояния, т.е. каждый признак должен быть коррелирован не только с источником, но через него и с объектами ТКС, в состав которых он входит организационно или функционально. Это свойство назовем *связностью источника и объекта*;

• количество отобранных признаков не должно влиять на уровень и количество получаемой информации и должно обеспечить определенный запас уверенности в правильности принятия решения.

Отбор, формирование и классификация ИП – это процедуры обработки сигнальной информации, необходимые для распознавания источников и объектов.

Сегодня не существует теоретически обоснованных методов, которые бы решали задачу отбора и выделения наиболее информативных системных признаков для описания объектов ТКС, определенных для распознавания. Решение этой фундаментальной задачи напрямую связано с содержанием, вложенным в понятие информативности радиомониторинга ТКС [2].

Вообще ИП – это специфические характеристики, параметры или их комбинации, предоставленные в виде исходных данных о радиотехнических системах, системах управления и связи объектов ТКС, полученных в результате физических или математических преобразований данных предварительного радио или научно-технического мониторинга.

Научная задача отбора и выделения ИП осложняется фактором неопределенности исходных данных, разнообразием информации, из которой следует отобрать только ту часть, которую можно систематизировать и упорядочить для обеспечения необходимой величины вероятности правильного принятия решения. При этом выделяют признаки принадлежности и состояния. Признаки принадлежности характеризуют отношение принятых сигналов к определенному классу источников излучений или объектов ТКС, а признаки состояния – фазовое состояние объектов на определенный момент времени. Если признаки принадлежности можно считать продолжительными, то признаки состояния практически непродолжительны и определяются динамикой развития событий и временем поиска источника или объекта на местности.

Кроме того, используются групповые и индивидуальные ИП радиоэлектронных средств (РЭС). Групповые признаки характеризуют их принадлежность к группе РЭС или группе объектов. Индивидуальные признаки характеризуют принадлежность излучения к конкретному источнику ТКС, что дает возможность контролировать не только количество первичных источников, но и

их перемещение. Признаки также могут быть количественными и качественными, детерминированными и статистическими. Однако в большинстве случаев распознавание как источников, так и объектов ТКС проводится в условиях неопределенности исходных данных и является статистическим [5].

Цель

Целью и основным смыслом статьи является рассмотрение статистических характеристик информационных признаков источников излучения при радиомониторинге телекоммуникационных сетей, а также определение оптимального количества информационных признаков $N_{\text{опт}}$ в выборке наблюдения объемом N .

Основной материал

Для достижения указанной цели необходимо учесть такие сведения: групповые и индивидуальные законы распределения оценок параметров источников излучения; расстояние между средними значениями однотипных параметров смежных источников; числовые характеристики законов распределения оценок параметров источников излучений (математическое ожидание и дисперсию) и пр.

Для решения задачи минимизации (оптимизации) пространства ИП необходимо рассмотреть принципиальную возможность и условия разделения и распознавания однотипных источников радиоизлучения по произвольному параметру x . При этом следует обратить особое внимание, что во время РМ приобретаются не значения параметров сигналов, а их оценки, которые должны быть по условиям Крамера–Рао несмещенными и эффективными [6, 7].

Известно [8], что распределение всех статистических оценок параметра x может быть описано уравнением вида

$$P(x) = \sum_{i=1}^n Q_i P_i(x), \quad (1)$$

где Q_i – априорная вероятность появления сигналов i -го источника; $P_i(x)$ – индивидуальное распределение вероятности для i -го источника.

Если распознавание осуществляется среди однотипных источников излучения с нормальным (гауссовским) законом плотности распределения, то можно считать, что и выражение (1) будет иметь следующий вид:

$$P(x) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-m-(2k+1)\Delta m)^2}{2\sigma^2} \right] + \exp \left[-\frac{(x-m+(2k+1)\Delta m)^2}{2\sigma^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где m и σ – математическое ожидание и дисперсия оценки параметра x ; $2\Delta m$ – расстояние между средними

значениями параметров, усредненные по всем источникам при $k = 0, 1, 2 \dots$

Необходимое условие разделения сигналов – много-модальность суммарного закона распределения [9].

Для дальнейшего анализа введем обозначения $\psi = (x - m)$ и найдем экстремум функции $P(\psi)$ из условия

$$\frac{dP(\psi)}{d\psi} = 0. \quad (3)$$

И, как видно, решение (3) в дальнейшем позволит минимизировать количество признаков n и получить их рациональную или оптимальную величину $n_{\text{опт}}$.

Известно, что значение $\psi = 0$ соответствует экстремуму функции и является корнями при любых σ и Δm . Пренебрегая тривиальными решениями $\psi = \infty$, представим (3) в виде:

$$\psi \left(\frac{\exp(\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} + \frac{\exp(-\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} \right) - \Delta m \left(\frac{\exp(\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} + \frac{\exp(-\psi(2k+1)\Delta m)}{\sigma^2} \right) = 0. \quad (4)$$

Этому выражению эквивалентно уравнение

$$\psi ch \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right] - \Delta m ch \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right] = 0. \quad (5)$$

Вследствии того, что $ch(\psi) \neq 0$, выражение (5) может быть представлено как

$$\frac{\psi}{(2k+1)\Delta m} = th \left[\frac{(2k+1)\Delta m \psi}{\sigma^2} \right]. \quad (6)$$

Корнями полученного трансцендентного уравнения будет абсцисса точек пересечения левой и правой частей, при этом решение для $\psi = 0$ существует всегда.

Исследование решений уравнения (6) дает возможность получить условие многомодального распределения параметров

$$\frac{1}{ch^2 \left[\frac{\psi(2k+1)\Delta m}{\sigma^2} \right]_{\psi=0}} \times \frac{(2k+1)\Delta m}{\sigma^2} > \frac{1}{(2k+1)\Delta m}, \quad (7)$$

при том, что $ch(0) = 1$.

Решение (7) описывает условие многомодальности:

$$\left[(2k+1)\Delta m \right]^2 > \sigma^2 \quad \text{или} \quad (2k+1)\Delta m > \sigma. \quad (8)$$

При $k = 0$ условие разделения сигналов смежных источников излучения по выбранному параметру будет определяться неравенством

$$\Delta m > \sigma. \quad (9)$$

Полученные условия (8) и (9) определяют принципиальную возможность разделения сигналов однотипных источников по параметру x .

Однако реально в процессе ведения РМ нет возможности получить объем выборки, достаточный для построения закона распределения и определить точки экстремума суммарного закона. Поэтому алгоритмы индивидуального распознавания должны учитывать ограничения во времени анализа и объема выборки. Наиболее приемлемый здесь пороговый алгоритм, сущность которого заключается в том, что измеряется среднее значение параметра x , вокруг него создается строб размером $\frac{\pm \Delta x}{2}$ и предоставляется условный номер источника излучения. Все результаты, попавшие в этот строб, относятся к источнику с этим условным номером; те, что не попали, относятся к сигналам других источников с другим условным номером. При этом возможны ошибки как первого, так и второго рода, вероятности которых можно определить и рассчитать [3, 5, 10].

С учетом изложенного, вероятность истинного индивидуального распознавания источника A и по параметру x будет определяться вероятностью попадания результатов измерения параметров сигналов i -го источника в область, определенной величиной Δx , и вероятностью попадания в строб сигналов смежных источников (помех):

$$P_{\text{при}} = P(A_i) \left[1 - \left(P \sum_{j=1}^m A_j \right) \right], \quad (10)$$

где $P(A_i) = \int_{m_i - \Delta x/2}^{m_i + \Delta x/2} w_i(x) dx$. При этом $P \left(\sum_{j=1}^m A_j \right)$ – суммарная вероятность попадания в строб помеховых сигналов; w_i – плотность распределения вероятности оценки параметра x .

Понятно, что в зависимости от размера стога происходит перераспределение величины погрешностей первого и второго рода, и, соответственно, вероятности истинного индивидуального распознавания. Существует оптимальное значение величины $\Delta x_{\text{опт}}$, при котором вероятность корректного индивидуального распознавания имеет максимальную величину [3]. При этом полученными зависимостями можно пользоваться только тогда, когда известны значения σ и Δm . Эти параметры распределения могут быть получены экспериментально на основании обработки данных предварительного РМ, которые обеспечат определение средних значений $\Delta m x$ для наиболее массовых источников радиоизлучений.

Величина σ_x рассчитывается как суммарная дисперсия нестабильности параметров $\sigma_{\text{нест}}^2$, влияния шумов $\sigma_{\text{шум}}^2$, ошибок измерительных устройств $\sigma_{\text{изм}}^2$:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{\text{нест}}^2 + \sigma_{\text{шум}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2}. \quad (11)$$

Итак, процедуры расчета вероятности истинного индивидуального распознавания заключаются в следующем: определяется оптимальное значение отношения $\Delta x/\sigma$, рассчитывается отношение $\Delta m/\sigma$, по величинам $\Delta x/\sigma_{\text{опт}}$ и $\Delta m/\sigma$ определяется величина $P_{\text{пр}}$.

Рассмотренные процедуры не являются оптимальными, однако при достаточно большой плотности источников излучений в зоне РМ, они наиболее рациональны [10, 11].

Если в процессе распознавания источников ТКС используется несколько параметров ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), то возникает необходимость исследования и определения зависимостей между величиной вероятности истинного распознавания, количеством оценок параметров сигналов ИП и количеством информационных признаков.

В качестве примера можно привести такие параметры излучений как значение несущей частоты сигнала, его продолжительность, частота (период) повторения, спектральные характеристики и другие, формирующие их радиотехническое описание. Возникает вопрос об определении необходимого количества полученных оценок параметров и минимизации признакового пространства.

Для этого можно воспользоваться величиной среднего значения вероятности распознавания источников излучений:

$$P_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_{p_i}, \quad (12)$$

где N – количество типов источников; P_{p_i} – вероятность распознавания источников i -го типа, которая характеризуется отношением количества случаев истинного распознавания к общему количеству попыток.

При автоматизированном распознавании измерения k -го параметра осуществляется с точностью, определяемой величиной дискретного интервала Δx_k . При этом оценка k -го параметра может принимать какое-либо значение из интервала $\frac{x_{k_{\max}} - x_{k_{\min}}}{\Delta x_k}$.

Если ввести вспомогательную бинарную функцию $\delta(m-i)$

$$\delta(m-i) = \begin{cases} 1 & \text{при } m=i, \\ 0 & \text{при } m \neq i, \end{cases} \quad (13)$$

то вероятность распознавания источника i -го типа при измерении k -го параметра будет определяться как

$$P_{p_i} = \frac{\sum_{x_{k_{\min}}}^{x_{k_{\max}}} \delta(m-i)}{\frac{x_{k_{\max}} - x_{k_{\min}}}{\Delta x_k}}. \quad (14)$$

В случае, когда известна вероятность распределения по каждому параметру, то вероятность распределения по совокупности параметров будет определяться по формуле сложения вероятностей [8]:

$$P\left(\sum_{k=1}^n A_k\right) = \sum_{k=1}^n P(A_k) - \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n P(A_k A_j) + \sum_{k=1}^{n-2} \sum_{j=k+1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n P(A_k A_j A_i) \dots + (-1)^{n-1} P\left(\prod_{k=1}^n A_k\right). \quad (15)$$

Для определения количества параметров, подлежащих измерению, необходимо найти среднюю вероят-

ность распределения по каждому параметру и расставить их в порядке убывания, а затем рассчитать вероятность распознавания по двум, трем и дальнейшим параметрам.

Например, если известны вероятности распределения по трем параметрам $P(x_1)=0,5$; $P(x_2)=0,4$; $P(x_3)=0,3$, то общая вероятность распознавания будет рассчитываться так:

$$P\left(\sum_{k=1}^3 A_k\right) = P(x_1) + P(x_2) + P(x_3) - P(x_1)P(x_2) - P(x_2)P(x_3) - P(x_1)P(x_3) - P(x_1)P(x_2)P(x_3) \approx 0,79.$$

Опыт, логические рассуждения и теоретические расчеты показывают, что в идеальном случае с увеличением количества ИП вероятность распознавания как источников, так и объектов ТКС, должна увеличиваться. Однако это справедливо только отчасти.

Так, по законам теории вероятности и математической статистики, при увеличении количества ИП в значительной степени начинает проявляться влияние погрешностей распознавания первого и второго рода, которые накапливаются и возрастают [2, 10]. В результате вероятность ошибки распознавания увеличивается, а истинного распознавания уменьшается. Это подтверждается результатами приведенного в [2] статистического моделирования и анализа влияния величины размерности n пространства ИП и объема выборки N на вероятность распознавания для источников радиоизлучения по произвольному параметру x (рис. 1).

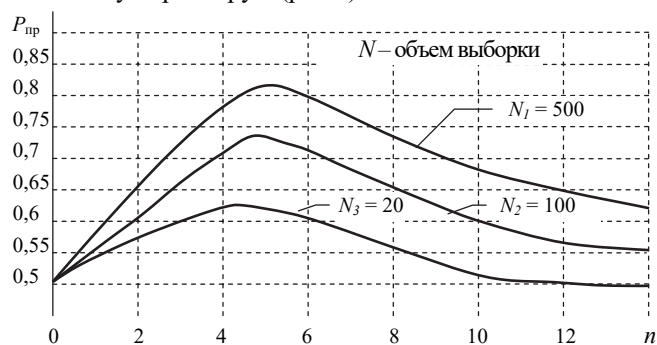


Рис. 1. Зависимость вероятности распознавания источников радиоизлучения от размерности пространства признаков

Статистическое моделирование определения зависимости между величиной вероятности корректного распознавания и количеством оценок параметров сигналов осуществлено в среде *Mathlab* с использованием приведенных ранее процедур (10) – (12) по таким ограничениям и условиям: количество параметров $n = \overline{1, 14}$; ИП (оценки параметров) сигналов статистически независимы; плотность вероятности распределения параметров известна $w_i=0,8$; многомодальность отсутствует; значение $\Delta x_i/\sigma_i$ и $\Delta m_i/\sigma_i$ рассчитаны и единично нормированы; размер строка селекции $\frac{\pm \Delta x_i}{2}$ для каждого из

параметров определены; количество выборок – три с объемами N , равными 20, 100 и 500 значений.

На основании анализа приведенных зависимостей можно сделать вывод, что оптимальное количество ИП должно составлять величину n , равную 4–5 единиц, что обусловлено стабилизацией минимального уровня погрешностей первого и второго рода [2].

Другой путь оптимизации признакового пространства, подтверждающий правильность вывода, описан в [3], где приведен соответствующий математический подход и графические зависимости минимизации признакового пространства (рис.2), полученные с учетом информационных потерь $\Delta I_n(H)$ по соответствующим значениям энтропии $H(A_i/x_k)$.

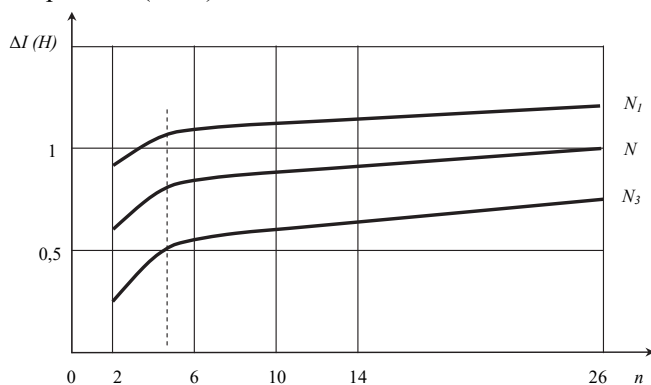


Рис. 2. Зависимость информационных потерь от размерности пространства признаков

UDC 004.93'11

A.I. Ilnitskiy, O.I. Burba, O.O. Pasichnyk

The Statistic Characteristics of the Information Sources Emission Indication During Radio Monitoring of the Telecommunication Nets

Keywords: radio monitoring, detection, telecommunication networks, information signs, estimation of parameters, signals, sources of radiation.

Introduction. The efficiency of the structural and systemic approach requires the maximum number of radio information signs. The most complete radio characteristics of the object are: range of operating frequencies, modulation types, structure signals, signal parameters (frequency, phase, amplitude, temporal) power channel modes, the number of subscribers, and more. That must have formed a full description of the object, maximum possible set of information signs, which enables a high probability recognition of the object and its phase state determination.

Purpose. The scientific problem of the formation signs selection and allocation compounded by uncertainties of input data, a variety of information from which to select, organizing and arranging for the required value of probability of correct decision.

Methods. The statistical characteristics of the information signs of the radiation sources at the radio telecommunications networks are examined and the optimal number of informational signs n_{opt} a sample volume of observations N are determined.

The main task during the radio monitoring and recognition of the telecommunications networks and information signs signal parameters is observed.

Results. The high performance radio monitoring with minimal information loss is provided at the optimum amount of information signs.

Как видно из графических зависимостей (см. рис.2) минимальные информационные потери также обеспечиваются при оптимальном количестве ИП, которое будет составлять величину n , равную 4–5 единиц.

Заключение. Основными задачами радиомониторинга является выявление и анализ радиоизлучений с распознаванием и идентификацией источников сигналов и помех, измерение параметров сигналов и помех, определение расположения источников радиосигналов и помех на местности в условиях частичной или полной неопределенности.

При радиомониторинге используются информационные радиотехнические признаки параметров источников радиоизлучения, при этом определяются не их количественные характеристики, а полученные статистические оценки этих параметров, которые должны удовлетворять условиям Крамера–Рао и быть несмещенными и эффективными.

Эффективность радиомониторинга определяется величиной вероятности корректного распознавания, зависящей от количества информационных признаков n и объема выборки наблюдения N .

Высокая эффективность радиомониторинга с максимальной величиной вероятности корректного распознавания и минимальными информационными потерями обеспечивается при оптимальном количестве информационных признаков, где n равно 4–5 единиц при достаточно большом объеме выборки наблюдения N .