

Идентификация сигналов источников радиоизлучений на основе метода обучения линейного порогового элемента

Введение. Радиочастотный ресурс (РЧР) Украины является важным стратегическим ресурсом государства. Он обеспечивает предоставление разнообразных телекоммуникационных услуг, являясь составной частью ряда технологий, влияющих как на эффективное функционирование экономики, так и на национальную безопасность государства, определяющих обороноспособность страны, ее информационную безопасность и технологическую независимость.

Государство управляет сферой использования РЧР с помощью системы соответствующих государственных органов на основе Законов Украины “Про телекомунікації”, “Про радіочастотний ресурс України” [1], Постановлениями Кабинета Министров Украины, другими нормативно-правовыми актами.

Среди ряда задач органов управления РЧР, одной из основных является обеспечение эффективного использования РЧР, что требует наличия информации о реальном состоянии использования РЧР. Получение такой информации достигается путем организации системы радиочастотного контроля (РЧК).

В настоящее время технической основой системы РЧК в Украине является автоматизированная система РЧК (АСРЧК) [2]. Организационную основу АСРЧК составляют стационарные посты. Мобильные комплексы (станции) радиомониторинга обеспечивают решение задач РЧК вне зон радиодоступа стационарных постов, а также для уточнения результатов РЧК в пределах городов.

Использование технических средств РЧК на стационарных и мобильных постах позволяет осуществлять контроль использования РЧР и выполнять измерения параметров электромагнитного излучения. В связи с этим определены следующие основные задачи РЧК [3].

- 1) систематический контроль и измерение параметров и характеристик радиоэлектронных средств (РЕС) и источников радиоизлучений;
- 2) проведение измерений, связанных с радиопомехами;
- 3) идентификация передатчиков и определение класса их излучения путем пеленгации и анализа сигналов;
- 4) выявление незаконно действующих передатчиков и подготовка предложений по прекращению их деятельности.

Для решения указанных задач средства РЧК оснащаются соответствующим оборудованием и программным обеспечением. При этом, наиболее предпочтительным режимом работы является автоматизированное решение задач РЧК и проведение измерений. Однако, в настоящее время, многие из операций обработки и анализа принятых сигналов при РЧК выполняются в ручном режиме, что требует

существенных временных затрат и наличия высококвалифицированных операторов для обеспечения необходимой точности результата.

В последние годы появилось оборудование РЧК, которое обеспечивает автоматизированную обработку и анализ принятых сигналов на основе хорошо себя зарекомендовавшего корреляционного метода. В частности, данный метод используется для решения задачи идентификации сигналов источников радиоизлучений (ИРИ) [4]. Однако, применение корреляционного метода, в данном случае, имеет ряд ограничений, связанных с видом модуляции сигналов и наполнением электронной базы данных РЭС, которые могут принимать участие в механизме создания радиопомех.

Постановка задачи. Задача идентификации сигналов ИРИ является одной из наиболее сложных задач РЧК по следующим причинам, во-первых, кратковременного излучения позывных сигналов, во-вторых, использования сокращенных или незарегистрированных позывных сигналов, и в значительной степени – трудности обработки радиосигналов, при передаче которых используются сложные методы кодирования, модуляции и уплотнения информации.

Целью задачи идентификации сигналов ИРИ является установление соответствия того, что в контрольной полосе частот работает именно тот передатчик, который там должен работать, и что параметры его излучения соответствуют тем, что были ему назначены. Результатом решения задачи является выявление нелегальных передатчиков и РЭС, которые нарушают Регламент радиосвязи.

Процесс принятия решений об идентификации сигналов ИРИ происходит в условиях неопределенности, быстро меняющейся сигнально-помеховой обстановки, учета большого числа противоречивых требований. В таких условиях хорошо себя зарекомендовали подходы, основанные на идеях и методах теории распознавания и классификации образов [5, 6].

Идентификация сигналов возможна при наличии некоторой исходной информации (или устройств, обеспечивающих ее получение при обучении) о сигналах, требующих классификации. Существующее оборудование РЧМК позволяет принимать сигналы с различными видами модуляции и проводить измерение следующих параметров радиоизлучений [2]:

- несущей (или центральной) частоты радиоизлучения;
- ширины занимаемой полосы частот радиоизлучения;
- уровня принятого сигнала;
- параметра модуляции (глубины модуляции для АМ сигналов, девиации частоты для ЧМ сигналов, девиации фазы для ФМ сигналов, разноса частот для частотной телеграфии).

Таким образом, система идентификации сигналов ИРИ может состоять из двух основных частей: входного устройства и устройства принятия решения (классификатора). Во входном устройстве происходит измерение

перечисленных параметров радиоизлучений и преобразование их в форму, удобную для дальнейшего анализа. Результаты этого преобразования дают n -мерный вектор

$$\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

который будем называть кодом объекта, где x_1, x_2, \dots, x_n – числовые значения признаков (параметров) радиоизлучений. Тогда совокупность векторов, соответствующих объектам R различных классов (образов), образуют отдельные области $R_i (i = \overline{1, R})$ в n - мерном пространстве кодов объектов.

Задача идентификации сигналов ИРИ состоит в построении в пространстве X^n поверхности, разделяющей множество областей R_i , отвечающих различным классам излучений. Это построение выполняется по появляющимся в процессе “обучения” векторам X , о каждом из которых “учитель” дополнительно сообщает классификатору о принадлежности его к конкретному классу. После построения такой поверхности новые вектора будут идентифицироваться классификатором в зависимости от их положений относительно разделяющей поверхности.

Разделяющие поверхности любого классификатора объектов можно полностью определить R скалярными функциями $g_1(X), \dots, g_R(X)$, которые называются дискриминантными функциями (ДФ) [5]. ДФ выбираются так, чтобы выполнялось условие:

$$\forall X \in R_i \quad g_i(X) > g_j(X) \quad \text{при } i, j = 1, 2, \dots, R, \quad i \neq j, \quad (2)$$

т.е. i -я – дискриминантная функция на области R_i принимает наибольшее значение по сравнению с другими ДФ. Тогда поверхность, разделяющая смежные области R_i и R_j , определяется уравнением

$$g_i(X) - g_j(X) = 0. \quad (3)$$

Простоты ради будем рассматривать линейные ДФ вида

$$g(X) = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i + \omega_{n+1} = X \cdot W + \omega_{n+1}, \quad (4)$$

где $\omega_i (i = 1, \dots, n)$ – весовые коэффициенты или компоненты вектора весов $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$.

Описание метода. Пусть $\mathbf{x} = \{X_1, \dots, X_M\}$ - конечное множество объектов $X_j (j = \overline{1, M})$, которые классифицированы так, что каждый объект принадлежит только одному из R классов (образов). Такая классификация разбивает \mathbf{x} на множество X_1, \dots, X_R так, что каждый объект принадлежит классу $i (i = \overline{1, R})$. Назовем X_i обучающими выборками. Если существует линейное правило классификации (ПК), правильно относящее каждый объект $X_i \in X_n$ к соответствующему классу, то подмножества X_1, \dots, X_R называются линейно разделимыми, и мы имеем дело с линейной классификацией.

Другими словами, если распознаваемые образы R_1, \dots, R_R в X^n линейно разделимы, то существуют такие линейные ДФ $g_1(X), \dots, g_R(X)$, что

$$g_i(X) > g_j(X) \quad \forall X \in X_i, \\ j = 1, \dots, R; \quad j \neq i \quad \forall i = 1, \dots, R \quad (5)$$

и можно машинным путем извлечь новые знания в форме распознающего правила (закономерности) $\Phi(X)$:

$$\Phi(X) = g_i(X) = \max\{g_1(X), g_2(X), \dots, g_R(X)\}, \text{ если } X \in X_i \quad (6)$$

В случае двух классов ($R=2$) искомые знания описываются в форме ПК:

$$\begin{cases} g(X) > 0, \text{ если } X \in X_1, \\ g(X) < 0, \text{ если } X \in X_2. \end{cases} \quad (7)$$

Обучение будем выполнять с помощью алгоритма извлечения классифицирующих знаний методом обучения линейного порогового элемента (ЛПЭ), реализующего подбор весов w_1, \dots, w_n .

Линейным пороговым элементом называется устройство, реализующее линейную ДФ вида (4) так, что на выходе ЛПЭ появляется сигнал "+1", если $g(X) > 0$, и "-1", если $g(X) < 0$. Блок-схема ЛПЭ показана на рис.1.

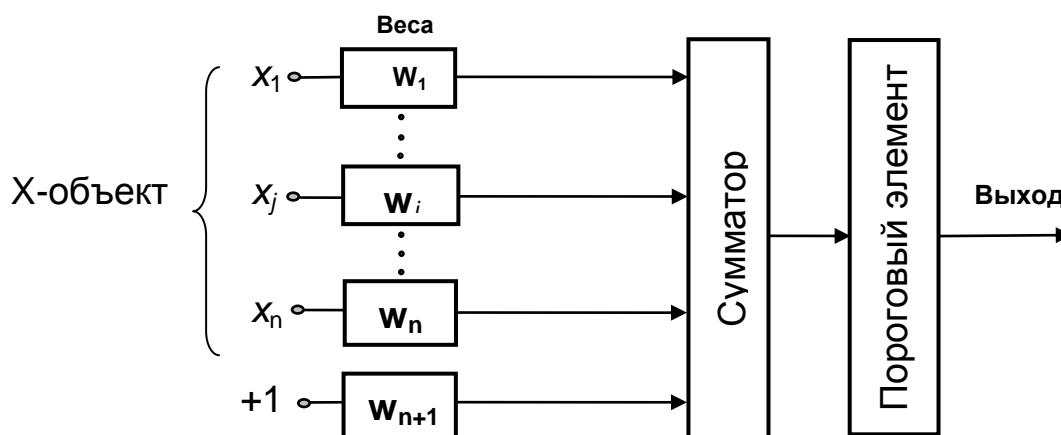


Рис.1. Блок-схема ЛПЭ

Задача состоит в том, чтобы "научить" ЛПЭ с помощью искомого алгоритма формировать на выходе "+1" при появлении на его входе объекта $X \in K_1$ и сигнал "-1" при появлении любого объекта $X \in K_2$.

Обучение ЛПЭ. Рассмотрим алгоритм, предусматривающий итерационный процесс корректировки весов w_i , соответствующий последовательному изменению положения и ориентации гиперплоскости, разделяющей классы K_1 и K_2 .

Для уяснения этого процесса введем расширенный вектор – объект Y :

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_D), \quad (8)$$

где $y_i = x_i$, $D = n + 1$, $y_D = +1$, $i = 1, 2, \dots, n$, и перейдем в новое пространство весов $W^D = \{w_1, \dots, w_n, w_{n+1=D}\}$.

В пространстве W^D линейная ДФ вида

$$g(X) = Y \cdot W = 0 \quad (9)$$

определяет гиперплоскость и называется плоскостью объекта (ПО). ПО делит пространство W^D на два класса так, что те из точек W , которые для объекта Y обеспечивают на выходе "+1", лежат по одну сторону гиперплоскости (положительная сторона), а по отрицательную сторону располагаются точки, дающие на выходе ЛПЭ "-1".

Предположение о линейной разделимости K_1 и K_2 означает, что существует вектор W , называемый решающим весовым вектором, такой что

$$\begin{cases} Y \cdot W > 0, & \text{для } \forall Y \in K_1, \\ Y \cdot W < 0, & \text{для } \forall Y \in K_2. \end{cases} \quad (10)$$

Вектор W можно определить по обучающей выборке с помощью алгоритмов с исправлением ошибок в процессе циклического предъявления обучающих объектов Y .

Если, например, для некоторого объекта $Y \in K_1$ с весом W на выходе ЛПЭ имеем "-1" (т.е. $Y \cdot W < 0$) вместо $Y \cdot W > 0$, что означает ошибку, или $Y \cdot W = 0$, т.е. выход не определен, то эту ошибку можно исправить, переноса W в точку на положительной стороне плоскости объекта. Это можно осуществить кратчайшим путем по линии, перпендикулярной к ПО (9), т.е. добавляя к W вектор объекта Y и получая, таким образом, новый весовой вектор W' равный

$$W' = W + CY, \quad (11)$$

где C – положительное число, называемое коэффициентом коррекции.

Для достаточно больших C точка весов W' перейдет на другую сторону гиперплоскости и $Y \cdot W' > 0$. Если бы W по ошибке попал бы на положительную сторону плоскости объекта, то тогда

$$W' = W - CY. \quad (12)$$

Обобщая выражения (11), (12), при $C = 1$ алгоритм обучения примет вид:

$$W_{n+1} = \begin{cases} W_n + Y_i, & \text{если } Y_i \in K_1 \text{ и } Y \cdot W < 0; \\ W_n - Y_i, & \text{если } Y_i \in K_2 \text{ и } Y \cdot W > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Начальный вектор W в алгоритме (13) выбирается случайно, либо равным 0.

Проиллюстрируем применение описанного метода для идентификации сигналов базовых станций цифровой сотовой радиосвязи стандарта CDMA-800 (класс радиоизлучения 1M25G1D) и GSM-900 (класс радиоизлучения 271KG7W), которые работают на радиочастотах передачи f_{CDMA} и f_{GSM} соответственно.

В качестве элементов x_i вектора признаков объекта $X_j = (x_1, x_2, \dots, x_5)$

будем использовать измеренные основные параметры радиоизлучений: значения частот передачи $x_1 - f_{\text{CDMA}}$, $x_2 - f_{\text{GSM}}$; полос частот на контрольном уровне $x_3 - B_{\text{к. CDMA}}$, $x_4 - B_{\text{к. GSM}}$; признак модуляции $x_5 - M_{\text{ф}}$ (фазовая модуляция для рассматриваемых радиоизлучений). При этом считаем, что признак принимает значение “1”, если соответствующий параметр находится в пределах установленной нормы, и – “0”, если параметр выходит за установленные пределы.

Сформируем обучающую выборку возможных ситуаций:

$X_1 = (1, 0, 1, 0, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта CDMA;

$X_2 = (0, 1, 0, 1, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта GSM;

$X_3 = (1, 0, 0, 1, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта CDMA;

$X_4 = (0, 1, 1, 0, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта GSM;

$X_5 = (1, 0, 0, 0, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта CDMA;

$X_6 = (0, 1, 0, 0, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта GSM;

$X_7 = (0, 0, 1, 0, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта CDMA;

$X_8 = (0, 0, 0, 1, 1)$ – радиоизлучение станции стандарта GSM.

Целью обучения ЛПЭ с использованием алгоритма (13) является нахождение такой линейной ДФ $g(X)$, разделяющей пространство объектов на два класса $X_1 = \{X_1, X_3, X_5, X_7\} \in K_1$ (радиоизлучение станции стандарта CDMA) и $X_2 = \{X_2, X_4, X_6, X_8\} \in K_2$ (радиоизлучение станции стандарта GSM), что:

$$g(X) = \begin{cases} +1, & \text{если } X \in K_1 \text{ (радиоизлучение станции стандарта CDMA),} \\ -1, & \text{если } X \in K_2 \text{ (радиоизлучение станции стандарта GSM).} \end{cases}$$

Для достижения поставленной цели составим обучающую выборку расширенных векторов объектов Y согласно (8) с указанием их принадлежности к образцу и поместим их в табл. 1.

Таблица 1

Обучающая выборка расширенных векторов объектов Y

№ п/п	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	Выход ЛПЭ
1	1	0	1	0	1	1	+1
2	0	1	0	1	1	1	-1
3	1	0	0	1	1	1	+1
4	0	1	1	0	1	1	-1
5	1	0	0	0	1	1	+1
6	0	1	0	0	1	1	-1
7	0	0	1	0	1	1	+1
8	0	0	0	1	1	1	-1

Принимая за начальный весовой вектор $W_0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ и $C = 1$, осуществляем итерации согласно алгоритма (13). Обучение заканчивается (т.е. алгоритм сходится) на 4-й итерации после 25-и

предъявленных объектов и с 12-ю исправлениями весов. В результате получены знания в форме следующей линейной классифицирующей ДФ:

$$g(Y) = 3y_1 - 3y_2 + 2y_3 - 2y_4 + 1 .$$

Заключение

На примере метода обучения линейного порогового элемента показана применимость технологии распознавания образов для задачи идентификации сигналов ИРИ. Исходя из этого, одним из перспективных направлений работы в этой области является использование искусственных нейронных сетей, что позволит реализовать параллельно распределенный процессор, обеспечивающий достоверную автоматическую идентификацию сигналов ИРИ.

Литература: 1. Збірник нормативно-правових актів у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом / уклад. В.І. Кіріченко, Н.А. Письменчук, М.В. Гріцаєнко та ін.; За ред. П.В. Слободянюка. – Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2006. – 800 с. 2. Ступак В. С. Основи радіочастотного контролю: Практичний посібник / В. С. Ступак, С. О. Долматов // За редакцією В. Ф. Олійника. – Київ: УДЦР, 2004. – 219 с. 3. Справочник по радиоконтролю. – Женева: МСЭ, 1995. – 442 с. 4. Ральников В. И. Идентификация источников помех с помощью корреляционного регистратора / В. И. Ральников, И. П. Харченко // Электросвязь. – 2001. - № 9. – С. 23 – 29. 5. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Ту Дж., Р. Гонсалес – М.: Мир, 1978. – 411 с. 6. Сироджа И. Б. Структурно-аналитические модели и алгоритмы распознавания и идентификации объектов управления / И. Б. Сироджа, В. Г. Тупало, С. В. Левин – К.: Техніка, 1993. – 204 с.