

# 一种基于 I/Q 失配的辐射源指纹提取方法

张 敏<sup>1</sup>, 罗正华<sup>2</sup>, 黄建刚<sup>2</sup>, 眭超亚<sup>2</sup>, 张子翔<sup>1</sup>

(1. 电信科学技术第五研究所有限公司, 四川成都 610020;

2. 成都大学信息科学与工程学院, 四川成都 610106)

**摘 要:** 针对现有的辐射源识别方法的不足, 利用辐射源自身 I/Q 失配指纹特征的可检测、可重现、不变的特性, 提出一种基于 I/Q 失配的新型射频指纹特征提取方法. 该方法是一种基于信号空间的指纹特征提取方法, 它需要对信号的信噪比进行估计. 综合考虑, 采用基于特征值分解的信噪比估计方法. 实验仿真结果表明, 在相同的信噪比条件下, 基于 I/Q 失配的射频指纹特征提取方法比双谱、Hilbert-Huang 变换信号特征提取方法具有更加优越的射频指纹识别性能.

**关键词:** 辐射源识别; I/Q 失配; 指纹特征; 信噪比估计

**中图分类号:** TN975

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2020)04-0717-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.04.013

## A Fingerprint Extraction Method Based on I/Q Imbalance

ZHANG Min<sup>1</sup>, LUO Zheng-hua<sup>2</sup>, HUANG Jian-gang<sup>2</sup>, SUI Chao-ya<sup>2</sup>, ZHANG Zi-xuan<sup>1</sup>

(1. The Fifth Institute of Telecommunications Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610020, China;

2. School of Information Science and Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)

**Abstract:** In view of the shortcomings of the existing method of identification of radiant sources, a novel feature extraction method based on I/Q mismatch is proposed, which can be detected, reproducible and invariable by using the I/Q mismatch fingerprint of the source. This method is a fingerprint feature extraction method based on signal space. It needs to estimate the signal-to-noise ratio of the signal. Through comprehensive consideration, the SNR estimation method based on eigenvalue decomposition is adopted. The experimental simulation results show that, under the same signal to noise ratio, the radio frequency fingerprint feature extraction method based on I/Q mismatch is superior to the dual spectrum and Hilbert-Huang transform signal feature extraction methods.

**Key words:** emitter recognition; I/Q imbalance; fingerprint characteristics; SNR estimation

## 1 引言

随着通信技术的飞速发展和移动通信设备的普及, 无线通信已成为当代社会不可或缺的重要组成部分. 在近年里, 无线通信的辐射源识别技术得到国内外的广泛关注. 辐射源识别是使用接收的信号识别不同的无线电发射机, 也称为信号指纹识别<sup>[1]</sup>. 信号指纹特征是由于辐射源内部器件之间的细微差异产生的<sup>[2]</sup>, 不依赖于信号所承载的信息内容, 类似于人体指纹特征, 辐射源指纹特征具有可检测、可重现、不变化的特点, 是通信设备的物理层本质特征, 且很难被篡改.

辐射源指纹特征识别在军事和民用两个领域都有

很大的应用价值<sup>[3]</sup>. 在军用领域, 信息战已成为现代战争的主要形式, 随着各种常规或特殊类型通信设备使用面积的不断扩大, 在错综复杂的通信信号中准确、及时地识别出敌方的通信设备信号, 从而对敌方的通信设备进行目的地追踪、监视和打击, 是信息战胜利的决定因素. 应用辐射源指纹特征识别可以通过对通信信号进行细微特征提取, 并根据细微特征对辐射源个体进行有效的识别, 从根本上提高对敌方目标的侦察和对抗能力. 在民用领域, 辐射源指纹特征识别可以应用于无线网络安全、无线电管理和设备诊断等方面. 在无线网络安全方面, 将无线网络的安全措施扩展到物理层, 通过无线信号的细微特征进行识别, 可以极大地

提升无线系统的安全性能;在无线电管理方面,应用辐射源个体识别技术,可以将非法电台和合法电台有效地区分开,并对非法电台进行侦听;在设备诊断方面,应用辐射源个体识别技术,可以对缺乏设备故障检测工具的通信设备进行定位,并快速排除故障.除此之外,辐射源指纹识别还可以应用在探矿系统、传感器网络的路由设计等方面.

信号指纹特征提取方法大体上可以分为两类<sup>[4]</sup>:一类是暂态信号特征提取方法,提取非稳定工作状态下的信号特征;另一类是稳态信号特征提取方法,提取稳定工作状态下的信号特征.暂态信号特征提取方法主要是提取瞬态信号的幅值、陡度、瞬时幅度的变化轨迹特征以及持续时间等.但由于非稳定工作状态的持续时间极短,因此暂态信号特征提取方法对于识别信号起始点的检测精度要求极高,使得获取暂态特征的成本昂贵,且抗噪能力和识别性能一般,所以,人们更加偏向研究稳态信号特征提取.

稳态特征的提取主要是从设备的噪声输出差异、杂散特性差异、调制参数差异以及载波偏移等方面出发,对接收信号进行时频分析,将设备间的细微差异放大,以达到射频源识别的目的<sup>[5,6]</sup>.目前,“指纹”特征提取的主要方法有:①双谱法,利用其本身的相位保持和尺度变换特性以及时间平移不变特性,可以将除相位以外的所有信息完整地呈现出来;②小波分析法,小波分析是一种典型的时频分析方法,利用时间和尺度参数对信号进行重构,可以对信号进行细致探究;③Wigner-Ville 分布分析法,它也是一种经典的时频分析方法,可以完美地展现信号的瞬时功率谱特征;④经验模态分解(EMD)方法,它也是一种时频分析方法,它可以分析非平稳非线性信号,将其与 Hilbert 谱联合起来就是 Hilbert-Huang 变换方法.在这些方法中,性能较优越的有 Hilbert-Huang 变换和双谱分析,但也都存在一些缺点.由于 EMD 的理论存在缺陷,使得 Hilbert-Huang 变换存在识别效果不佳,抗噪能力弱的问题,双谱分析虽对高斯噪声具有很强的抑制能力,但其具有计算量庞大、复杂度高的缺点.

在对硬件缺陷深入研究的过程中,发现在设备的制造过程中,会存在 I/Q 失配差异,且不能被完全控制和消除,即使使用相同的生产和组装程序,它们的 I/Q 失配也不会相同<sup>[7,8]</sup>. I/Q 失配是发射机固有特征,一旦信号发射机的硬件制造完成,它的不平衡特征是非时变的,而且,射频信号“指纹”特征很难被复制和克隆,因此,能够作为发射机射频信号“指纹”特征.本文在此基础上,研究了辐射源指纹提取方法,仿真结果表明,该方法可以识别不同的无线电发射器,且识别性能很好.

## 2 I/Q 失配模型

受硬件制造过程不完善的影响,在正交调制器中会存在 I/Q 失配的问题. I/Q 失配主要包括相位失配和增益失配. 相位失配表现为两路载波信号不是绝对正交,即相位差不等于  $90^\circ$ ,会造成调制后的两路信号存在交叠. 增益失配是指两路载波的幅度不完全相同,从而,造成接收机的接收性能恶化. 图 1 为存在 I/Q 失配的正交调制器模型.

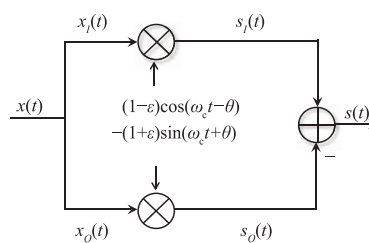


图1 I/Q正交调制器

如图 1 所示,在该模型中,  $\varepsilon$  和  $\theta$  分别为正交调制器的增益失配和相位失配参数. 输入信号  $x(t) = x_I(t) + jx_Q(t)$ ,  $x_I(t)$  是同相分量,  $x_Q(t)$  是正交分量. 正交调制器可以是数字调制(如正交幅度调制),则输入的信号  $x_I(t)$  和  $x_Q(t)$  为数字基带信号;该调制器也可以是模拟单边带调制,则输入的信号  $x_I(t)$  为模拟信号. 调制完成后的输出信号为:

$$s(t) = x_I(t)(1 + \varepsilon)\cos(2\pi f_c t + \theta) - x_Q(t)(1 - \varepsilon)\sin(2\pi f_c t - \theta) \quad (1)$$

将式(1)经过三角函数展开,整理可得:

$$s(t) = s_I(t)\cos(2\pi f_c t) - s_Q(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (2)$$

其中,

$$s_I(t) = x_I(t)(1 + \varepsilon)\cos(\theta) + x_Q(t)(1 - \varepsilon)\sin(\theta) \quad (3)$$

$$s_Q(t) = x_I(t)(1 + \varepsilon)\sin(\theta) + x_Q(t)(1 - \varepsilon)\cos(\theta) \quad (4)$$

$s(t)$  的复数形式可以表示为  $s_B(t) = s_I(t) + js_Q(t)$ . 将  $s_B(t)$  表示成  $x(t)$  的式子可以得到:

$$\begin{aligned} s_B(t) &= s_I(t) + js_Q(t) \\ &= \alpha[x_I(t) + jx_Q(t)] + \beta[x_I(t) - jx_Q(t)] \\ &= \alpha x(t) + \beta x^*(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos\theta + j\varepsilon\sin\theta \\ \beta &= \varepsilon\cos\theta + j\sin\theta \end{aligned} \quad (6)$$

图 2 显示的是 I/Q 失配对 QPSK(正交相移键控)信号的影响.

从图 2 中可以明显地看到, I/Q 失配使星座发生了旋转和变形.

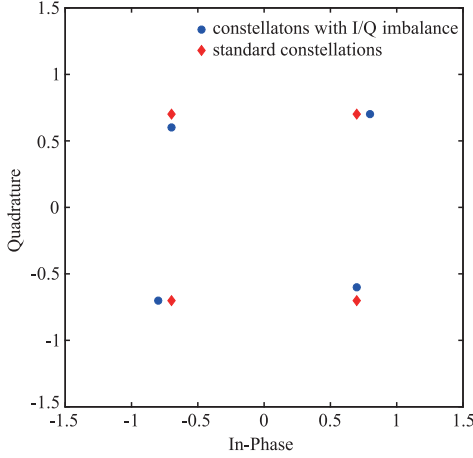


图2 I/Q失配的影响

### 3 特征提取

针对 I/Q 失配模型, Brik 提出了一种 PARADIS<sup>[9]</sup> 指纹特征提取算法, 该算法的基本思想是求得接收信号的星座, 并将该星座与标准星座进行比较, 以达到指纹特征提取的目的, 但是, 该方法只适用于数字调制, 且受信噪比影响较大. 在对 I/Q 失配模型深入研究的基础上, 本文提出一种新的基于信号空间的指纹特征提取算法, 该算法不仅适用于数字调制、模拟调制, 对噪声也具有一定的鲁棒性.

假设接收信号只受到了加性高斯白噪声的污染, 则接收信号可表示为:

$$\begin{aligned} r(t) &= s_B(t) + v(t) \\ &= \alpha x(t) + \beta x^*(t) + v(t) \end{aligned} \quad (7)$$

在式(7)中,  $v(t)$  为高斯白噪声. 对  $r(t)$  取复共轭可得:

$$r^*(t) = \beta^* x(t) + \alpha^* x^*(t) + v^*(t) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可以得到

$$\begin{aligned} Y(t) &= \begin{bmatrix} r(t) \\ r^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta^* & \alpha^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x^*(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(t) \\ v^*(t) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{A}X(t) + \mathbf{V}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

若  $x(t)$  与  $x^*(t)$  均满足:

$$E[x^2(t)] = E[x_I^2(t) + 2jx_I(t)x_Q(t) - x_Q^2(t)] = 0$$

则  $X(t)$  的自相关矩阵可以表示为:

$$\begin{aligned} R_X &= E[X(t)X(t)^H] \\ &= E \begin{bmatrix} x(t)x^*(t) & x(t)x(t) \\ x^*(t)x^*(t) & x^*(t)x(t) \end{bmatrix} \\ &= \sigma_x^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (10)$$

在式(10)中,  $\sigma_x^2 = E[|x(t)|^2]$  是  $x(t)$  的能量. 还有

$$\begin{aligned} R_Y &= E[Y(t)Y(t)^H] \\ &= E[\mathbf{A}X(t)X(t)^H \mathbf{A}^H] + E[\mathbf{V}(t)\mathbf{V}(t)^H] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sigma_x^2 \begin{bmatrix} \alpha\alpha^* + \beta\beta^* & 2\alpha\beta \\ (2\alpha\beta)^* & \alpha\alpha^* + \beta\beta^* \end{bmatrix} + \sigma_v^2 \mathbf{I} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_s^2 + \sigma_v^2 & 2\alpha\beta\sigma_x^2 \\ (2\alpha\beta)^* \sigma_x^2 & \sigma_s^2 + \sigma_v^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

在式(11)中,  $\sigma_s^2 = (\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)\sigma_x^2$  是  $s_B(t)$  的能量,  $\sigma_v^2$  是噪声能量, 可以得到

$$\frac{2\alpha\beta\sigma_x^2}{\sigma_s^2 + \sigma_v^2} = \frac{2\alpha\beta \frac{\sigma_x^2}{\sigma_s^2}}{1 + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_s^2}} = \frac{2\alpha\beta}{(\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)} \frac{1}{1 + \frac{1}{\text{SNR}}} \quad (12)$$

在式(12)中,  $\frac{\sigma_s^2}{\sigma_v^2} = \text{SNR}$ , 即

$$\frac{2\alpha\beta}{(\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)} = \frac{2\alpha\beta\sigma_x^2}{\sigma_s^2 + \sigma_v^2} \times \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}}\right)$$

其中,  $\frac{2\alpha\beta\sigma_x^2}{\sigma_s^2 + \sigma_v^2}$  由式(11)可得, 若可以估计得到 SNR 的值,

则可以求到  $\frac{2\alpha\beta}{(\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)}$  的值. 令  $\Phi = \frac{2\alpha\beta}{(\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)}$ ,  $\Phi$  只与  $\alpha, \beta$  的值有关, 将式(6)中  $\alpha, \beta$  的值代入  $\Phi$  中化简可得:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{2\alpha\beta}{(\alpha\alpha^* + \beta\beta^*)} \\ &= \frac{\varepsilon(\cos^2\theta - \sin^2\theta) + j(1 + \varepsilon^2)\sin\theta\cos\theta}{(\cos^2\theta + \varepsilon^2\sin^2\theta) + (\varepsilon^2\cos^2\theta + \sin^2\theta)} \\ &= \frac{\varepsilon\cos 2\theta + \frac{j}{2}(1 + \varepsilon^2)\sin 2\theta}{1 + \varepsilon^2} \\ &= \frac{\varepsilon\cos 2\theta}{1 + \varepsilon^2} + j \frac{1}{2}\sin 2\theta \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)化简结果可得  $\Phi$  只与  $\varepsilon, \theta$  的值有关. 若不同的  $\varepsilon, \theta$  求得的  $\Phi$  不同, 那么就可以将  $\Phi$  的值作为“指纹特征”, 以此对不同的电台进行识别. 由于  $\varepsilon, \theta$  足够小, 对于不同的  $\varepsilon, \theta$ ,  $\frac{\varepsilon\cos 2\theta}{1 + \varepsilon^2}, \frac{1}{2}\sin 2\theta$  值一定是不一样的, 即不同的  $\varepsilon, \theta$  求得的  $\Phi$  不同.

由以上的分析可得: 若可以估计得到信号的 SNR 值, 就可以将  $\Phi$  的值作为电台信号的“指纹特征”.

### 4 信噪比 SNR 估计

本文采用基于特征值分解的信噪比估计方法<sup>[10,11]</sup>. 特征值分解的基本思想就是对接收信号进行空间划分, 将其划分为信号子空间和噪声子空间, 这两个子空间是通过对接收信号的自相关矩阵进行特征值分解得到的, 在此基础上, 对信噪比进行估计. 考虑到白高斯噪声污染, 接收信号可以表示为

$$f(t) = s_B(t) + v(t) \quad (14)$$

可以得到  $f(t)$  的自相关矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_f &= E[f(t)f(t)^H] \\ &= E\{[s_B(t) + v(t)][s_B(t) + v(t)]^H\} \\ &= E[s_B(t)s_B(t)^H] + E[v(t)v(t)^H] \\ &= \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_v \end{aligned} \quad (15)$$

在式(15)中,  $\mathbf{R}_s$  和  $\mathbf{R}_v$  分别为  $m$  阶信号和噪声的自相关矩阵(其中,  $m$  采用 MDL 算法进行估计). 由于  $\mathbf{R}_f$  与  $\mathbf{R}_s$  为共轭对称阵,  $\mathbf{R}_v$  为对角阵, 均可以进行特征值分解, 即:

$$\mathbf{R}_f = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_v = \mathbf{V}(\mathbf{A}_s + \mathbf{A}_v)\mathbf{V}^H = \mathbf{V}(\mathbf{A}_f)\mathbf{V}^H \quad (16)$$

在式(16)中,

$$\mathbf{A}_s = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_p, 0, \dots, 0)_{m \times m}$$

$$\mathbf{A}_v = \text{diag}(\sigma_v^2, \sigma_v^2, \dots, \sigma_v^2)_{m \times m}$$

即

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_f &= \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_v \\ &= \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & 0 \\ & \ddots & & & \vdots \\ & & \lambda_p & & \\ \vdots & & & \lambda_{p+1} & \\ & & & & \ddots \\ 0 & \dots & & & & \lambda_m \end{bmatrix}_{m \times m} \\ &= \begin{bmatrix} r_1 + \sigma_v^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ & & r_p + \sigma_v^2 & \\ \vdots & & & \sigma_v^2 \\ & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & & 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix}_{m \times m} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可以得到, 由  $m$  个特征值组成的含噪子空间, 对其进行划分可以得到, 由前  $p$  个特征值组成的信号子空间, 后  $m-p$  个特征值组成的噪声子空间. 那么, 噪声功率和信噪比的估计式可表示为:

$$p_n = \sigma_n^2 = \frac{1}{m-p} \sum_{k=p+1}^m \lambda_k \quad (18)$$

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i - p \times \sigma_n^2}{m \times \sigma_n^2} \quad (19)$$

在 MATLAB 上用本文的基于特征值分解的信噪比估计方法, 对不同调制方式的信号进行信噪比估计, 在每个信噪比值下进行 200 次蒙特卡洛实验, 最终得到的信噪比估计相对误差曲线如图 3 所示.

从图 3 中可以看出, 利用基于特征值分解的信噪比估计方法估计出来的信噪比的估计值与真实值之间的相对误差较小, 表明该算法估计性能很好.

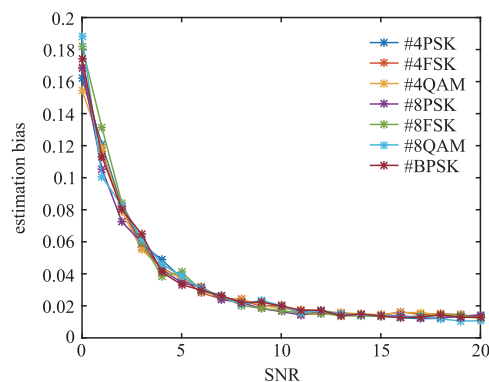


图3 信噪比估计相对误差曲线图

## 5 实验分析

### 5.1 仿真验证

为验证本文提出的特征提取算法的有效性, 对算法进行实验仿真, 其识别流程图如图 4 所示. 在整个仿真过程中, 需要对提取的特征进行分类, 而本文的重点是研究特征提取算法, 分类器直接采用所需训练数据较少的多分类支持向量机<sup>[12]</sup>.

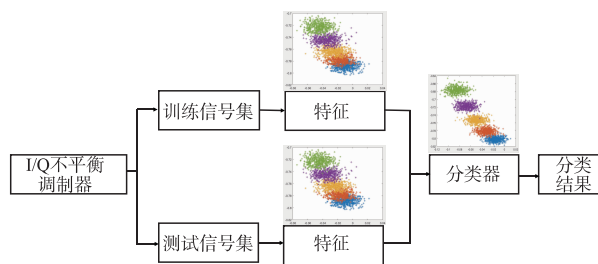


图4 识别流程

用计算机模拟五个模拟调制器的 I/Q 失配信号, 其参数设置如表 1 所示. 其中, 每个发射器产生 400 个信号, 将产生的信号划分为两个部分, 一半构成训练集信号, 另一半构成测试集信号. 为了进一步讨论本文特征提取算法的识别性能, 还对信号进行双谱变化<sup>[13,14]</sup>和 Hilbert-Huang<sup>[15,16]</sup>变换来提取信号特征, 并利用同一分类器对三种方法的最终识别性能做比较.

表 1 I/Q 失配参数表

序号	#1	#2	#3	#4	#5
$\varepsilon_t$	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19
$\theta_t$	3.0	3.2	3.4	3.6	4.0

当信噪比为 8dB 时, 本文所提方法的识别效果图如图 5 所示. 由图 5 可得, 本文的特征提取方法能够很好地区分出不同的无线电发射器.

从图 5 中可以看出, 本文的特征提取方法能够很好地区分出不同的无线电发射器. 此外, 将本文的方法与双谱、Hilbert-Huang 变换信号特征提取方法在不同的信

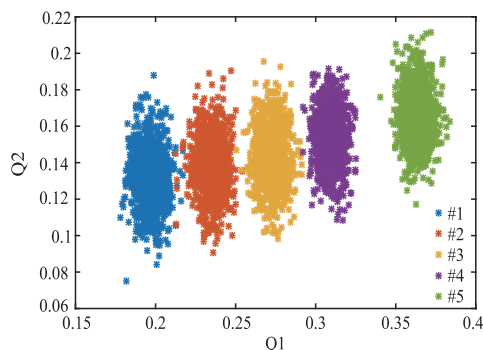


图5 SNR=8dB 识别效果图

噪比条件下进行比较,正确识别率如图 6 所示,相比之下,本文的方法的识别性能更好。

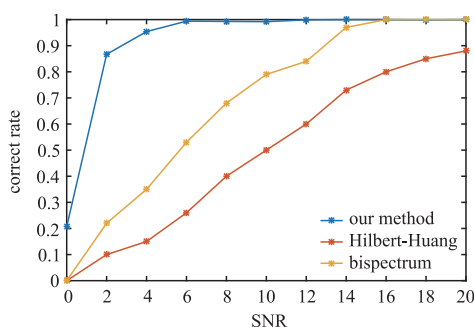


图6 不同信噪比条件下的正确识别率

## 5.2 真实实验

在实测试验中,选择了四款同种型号、同一厂家生产的 FM 电台进行实测数据的实验. FM 电台的中心频率选择为 100MHz,信号的带宽为 25kHz. 接收机的采样频率为 201.2kHz,信道带宽为 100kHz. 每个电台采取 30 个信号样本,总共有 120 个原始信号样本,每次的采样时间为 5s,每个样本的采样点数为 1 006 000. 从每个电台的 30 个样本中随机抽取 15 个样本,一共 60 个样本,组成样本集. 首先,采用基于特征值分解的信噪比估计方法对样本集信号进行信噪比估计值,然后,用本文的基于 I/Q 失配的指纹提取方法提取出样本信号的指纹特征,所提取的特征结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出,基于 I/Q 失配的指纹提取方法提取到的指纹特征具有很好的区分能力,电台指纹特征的差异比较明显。

从每个电台的 30 个样本中随机抽取 15 个样本组成样本集,余下的样本组合成为测试集,运用本文所提方法对训练集样本进行特征提取,再利用测试集进行分类识别,得到 4 个实际电台数据的识别率. 结果如表 2 所示。

表 2 4 个实际电台信号的识别率

电台	#1	#2	#3	#4
识别率 (%)	86.7	87.4	100	88.1

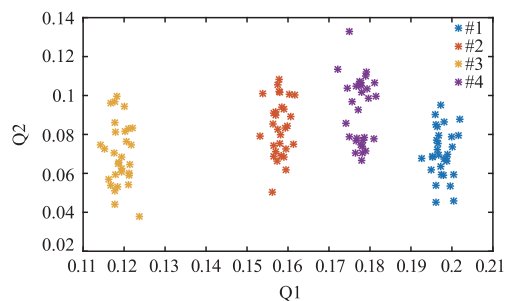


图7 实际电台识别效果图

## 6 结论

本文提出了一种基于 I/Q 失配的辐射源识别特征提取方法. 首先,基于 I/Q 调制器模型对射频指纹的来源进行了分析. 然后,提出了一种基于信号空间的特征提取新方法. 该方法不需要解调,同时适用于数字和模拟调制信号. 最后,将该方法与现有的双谱变化和 Hilbert-Huang 变换特征提取算法进行了对比分析. 结果表明,本文所提算法具有更好的识别性能。

## 参考文献

- [1] 张旻,钟子发,王若冰. 通信电台个体识别技术研究[J]. 电子学报,2009,37(10):2125-2129.  
ZHANG Min, ZHONG Zi-fa, WANG Ruo-bing. Research on individual identification technology of communication radio[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2125-2129. (in Chinese)
- [2] 汤博,许士敏,闻年成. 通信电台个体识别技术研究[J]. 舰船电子工程,2011,31(4):15-17.  
TANG Bo, XU Shi-min, WEN Nian-cheng. Research on individual identification technology of communication radio[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(04): 15-17. (in Chinese)
- [3] 徐书华. 基于信号指纹的通信辐射源个体识别技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.  
XU Shu-hua. Research on individual identification technology of communication emitter based on signal fingerprint[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] 许丹,柳征,姜文利. 窄带信号中的放大器“指纹”特征提取:原理分析及 FM 广播实测实验[J]. 电子学报,2008,36(5):927-932.  
XU Dan, LIU Zheng, JIANG Wen-li. Feature extraction of amplifier "fingerprint" in narrow band signals: principle analysis and FM broadcasting experiments[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 927-932. (in Chinese)
- [5] 孙娜. 通信电台细微特征研究[D]. 北京:北京邮电大学,2010.



- SUN Na. Fine features of radio station [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010. (in Chinese)
- [6] Brik V, Banerjee S, Gruteser M, et al. Wireless device identification with radiometric signatures [A]. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. US: ACM, 2008. 116 – 127.
- [7] Valkama M, Renfors M, Koivunen V. Blind signal estimation in conjugate signal models with application to I/Q imbalance compensation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(11): 733 – 736.
- [8] Song P, Gong F, Zhang H. Blind estimation algorithms for I/Q imbalance in direct down-conversion receivers [A]. IEEE 88th Vehicular Technology Conference [C]. US: IEEE, 2018. DOI:10.1109/VTCFall.2018.8690669.
- [9] Li Y L, Li B B, Liu M Q. Radio transmitter fingerprint identification based on modified LS-EVD algorithm [A]. IEEE International Conference on Signal Processing [C]. US: IEEE, 2010. 1378 – 1381.
- [10] 杨鹏, 彭耿, 柳征, 等. 一种新的基于特征值分析的盲信噪比估计方法 [J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(3): 5 – 10.  
YANG Peng, PENG Geng, LIU Zheng. A new blind signal to noise ratio estimation method based on eigenvalue analysis [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24(3): 5 – 10. (in Chinese)
- [11] 许华, 樊龙飞, 郑辉. 一种 QAM 信号的盲信噪比估计算法 [J]. 电子学报, 2005, 33(4): 184 – 187.  
XU Hua, FAN Long-fei, ZHENG Hui. A blind SNR estimation algorithm for QAM signals [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(4): 184 – 187. (in Chinese)
- [12] Cherkassky V. The nature of statistical learning theory [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 38(4): 409 – 409.
- [13] 蔡忠伟, 李建东. 基于双谱的通信辐射源个体识别 [J]. 通信学报, 2007, 28(2): 75 – 79.  
CAI Zhongwei, LI Jiandong. Based on bispectrum for individual identification of communication emitter [J]. Journal of Communications, 2007, 28(2): 75 – 79. (in Chinese)
- [14] 陈昌孝, 何明浩, 王志斌, 等. 基于双谱分析的雷达辐射源个体特征提取 [J]. 航天电子对抗, 2007, 23(5): 1046 – 1049.
- CHEN Changxiao, HE Minghao, WANG Zhibin, et al. Individual feature extraction of radar emitter based on bispectral analysis [J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2007, 23(5): 1046 – 1049. (in Chinese)
- [15] Chen W W. Multi-component LFM signal detection and parameter estimation based on Radon-HHT [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(6): 1097 – 1101.
- [16] 盖强, 张海勇, 徐晓刚. Hilbert-Huang 变换的自适应频率多分辨分析研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(3): 181 – 184.  
GAI Qiang, ZHANG Hai-yong, XU Xiao-gang. Adaptive frequency multi-resolution analysis of Hilbert-Huang transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 181 – 184. (in Chinese)

#### 作者简介



**张敏** 女, 1992 年 6 月出生, 四川绵阳人. 2016 年、2019 年分别毕业于南京理工大学、电信科学技术第五研究所, 获工学学士、工学硕士学位, 主要研究方向为信号处理.  
E-mail: 790105116@qq.com



**罗正华** 男, 1966 年 4 月出生, 重庆永川人. 高级工程师, 中国通信学会高级会员. 1987 年、1990 年分别在北京航空学院、邮电科学研究院获工学学士、工学硕士学位. 现为成都大学信息科学与工程学院副院长, 主要从事无源探测、无线通信等方面的研究工作.

**黄建刚** 男, 1970 年 10 月出生. 高级工程师. 1994 年、2003 年分别在武汉大学、电子科技大学获工学学士、工学硕士学位. 现为成都大学信息科学与工程学院教师, 主要从事无线自组织网络方面的研究工作.

**眭超亚** 女, 1990 年 12 月出生, 重庆忠县人. 现为成都大学硕士研究生, 主要从事深度学习及其在雷达、通信系统中的应用等相关研究.

**张子翀** 男, 1994 年 6 月出生, 四川攀枝花人. 2016 年毕业于长春理工大学光电工程学院, 其后于 2019 年毕业于电信科学技术第五研究所, 现就职于中国电子科技集团第五十四研究所, 从事通信信号处理方向研究.