doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2013.07.009

基于瞬时频率畸变特性的 FSK 电台指纹特征提取*

黄渊凌**,郑 辉

(盲信号处理重点实验室,成都 610041)

摘 要:为解决 FSK 电台个体识别问题,需要从辐射源信号上提取特征构成辐射源指纹。通过分析构成 FSK 电台的各个模块的畸变特性,阐明了 FSK 电台指纹产生机理,建立了基于瞬时频率的指纹信号模型,并根据信号模型设计了基于辅助参数的最小二乘算法以完成 FSK 频率畸变特性参数的估计,从而构建指纹特征完成对 FSK 电台的识别。对仿真信号和实际信号的识别测试试验表明,该算法具备辐射源个体识别能力,对实际环境下的 4 个 FSK 电台的识别率大于 96%,优于双谱类方法。

关键词:辐射源指纹识别;频移键控;瞬时频率;最小二乘估计;色噪声;支持向量机

中图分类号:TN911.23 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 - 893X(2013)07 - 0868 - 05

FSK Radio Fingerprints Extraction Based on Distortions of Instantaneous Frequency

HUANG Yuan-ling, ZHENG Hui

(Science and Technology on Blind Signal Processing Laboratory, Chengdu 610041, China)

Abstract: Radio frequency fingerprints (RFFs) are extracted from radio frequency (RF) signals to uniquely identify individual FSK radios. In this paper, the module imperfections in FSK transmitters are analyzed to show how RFFs are generated. A signal model about the instantaneous frequency is constructed to describe the RFFs. Then the least square method with auxiliary variables is used to estimate the parameters which characterize the distortions in instantaneous frequency of FSK signals. The RFFs are constructed using the estimates and used to identify individual FSK radios. The tests for simulated signals and real-world signals show that the proposed method is able to uniquely identify individual radios. Specifically, the identification accuracy for 4 FSK radios in practical scenarios exceeds 96%, which outperforms the bi-spectrum approaches.

Key words: radio frequency fingerprinting; frequency shift keying (FSK); instantaneous frequency; least square estimation; colored noise; support vector machine

1 引 言

辐射源指纹识别,也称特定辐射源识别(Specific Emitter Identification, SEI)利用发射机差异体现在射频信号上的特征来构造用以描述辐射源个体身份的“指纹”,从而完成对辐射源目标个体的识别。由于这种射频指纹不依赖传输信息内容,且难以准确“克隆”,因而在电子和通信辐射源目标识别、敌我识别和网络安全认证等领域具备应用价值。

频移键控(FSK)调制是常用的通信调制方式之一。相比采用其他数字调制方式的辐射源,采用 FSK 调制的发射机具备一些独特的性质。文献[1]总结了 FSK 电台指纹特征的来源和表现形式,提出将调制频率、频移间距、码元速率和码元过渡时间作为指纹特征来完成电台个体识别,并展示了这些特征的区分能力。对采用频率切换方式实现的非连续相位(NCP)FSK 调制信号而言,调制频率和频移间距的测量可具备较高的精度,但对于目前更常采用

* 收稿日期:2013 - 02 - 07;修回日期:2013 - 04 - 23 Received date:2013 - 02 - 07; Revised date:2013 - 04 - 23
** 通讯作者:newhyl@163.com **Corresponding author**: newhyl@163.com

的连续相位(CP)FSK 信号而言,这些参数的精确测量很难实现;另一方面,码元过渡时间等特征尽管能够表述 FSK 调制过程中的一些暂态特性,但未能体现暂态特性的机理本质,从而使得其区分能力受限。文献[2]提出从双谱变换的角度来提取 FSK 电台特征,提供了观察辐射源差异的新视角,但未能从机理上说明双谱变换的差异表述能力,且需要较多的数据累积才能得到较为稳定的双谱。

辐射源指纹特征来源于发射机的非理想特性。本文从构成 FSK 发射机的各个模块的非理想特性出发,建立描述发射机误差特性的瞬态频率信号模型,以模型参数来描述辐射源的差异,再采用基于辅助变量的最小二乘算法实现色噪声中的模型参数估计,以构造指纹特征,从而完成对 FSK 电台的识别。由于特征经由机理模型获得,可以更好地反映其本质特性,从而获得较好的区分能力和识别性能。

文章论述结构为:第 2 节介绍 FSK 发射机指纹的产生机理,第 3 节阐述 FSK 信号非理想特性的信号模型和指纹特征提取算法,第 4 节给出仿真和试验结果,最后进行总结。

2　FSK 电台指纹产生机理

FSK 发射机通常由基带调制信号生成模块、FM 调制器和射频变频模块构成,如图 1 所示。基带调制信号的生成一般通过数字电路实现,其误差特性不存在明显特征。基带调制信号生成后,经过数模转换(DAC)产生模拟的待调制信号,送入调频(FM)调制器进行调频。经过 FM 调制器产生 FSK 调制信号以后,再通过混频器将信号变换到射频,最后进行滤波和放大送往天线发射出去。FM 调制器、混频器和射频本振、射频滤波器和射频功放都采用模拟电路实现,而模拟电路元器件的特性与设计指标往往存在差异且无法控制,因此模拟电路的误差特性能够反映该发射机的独特性质,从而构成描述发射机个体身份的"指纹"特征。但并非所有误差特性都能在射频信号上获取,因此需要分析误差特性在射频信号上的表现形式。

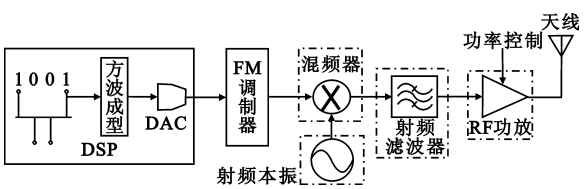


图 1　FSK 发射机构成

Fig. 1 Components of a FSK transmitter

对 FM 调制器而言,可采用锁相频率合成器来实现频率调制[3]。构成锁相频率合成器的电路元器件和工作环境的差异,将导致输出频率响应的差异。事实上,由于锁相环的跟踪特性,FSK 频率转换时将存在一定的暂态效应,这些效应的差异将构成用以实现电台个体识别的指纹特征。采用二阶环路的 FM 调制器的频率传输函数可表示为[4]

$$H(s)=\frac{2\zeta\omega s+\omega^2}{s^2+2\zeta\omega s+\omega^2} \tag{1}$$

设 FM 调制器输入为理想方波成型的双极性信号 $q(t)$,其输出信号的瞬时频率为 $w(t)$,则

$$W(s)=H(s)Q(s) \tag{2}$$

其中,$W(s)$为 $w(t)$的拉氏变换,$Q(s)$为 $q(t)$的拉氏变换。相应的输出相位为 $p(t)=\int_{-\infty}^{t}w(t)\mathrm{d}t$,因此调制器输出信号可表示为

$$s_R(t)=\Gamma\cos(p(t)) \tag{3}$$

调制器的个体特征主要体现在 $H(s)$及其所塑造的瞬时频率 $w(t)$上。

在变频器部分,射频本振将带来相位噪声,相位噪声的特性也可能构成指纹特征。关于相位噪声指纹的讨论已另文讨论,这里暂不考虑。此外,混频器也可能产生载波泄漏和寄生谐波,其特性也可能构成指纹特征。由于寄生谐波为倍频信号,极容易被后端滤波器滤除,而载波泄露通常极其微弱,这里也暂不考虑。则变频器输出信号可表示为

$$s_R(t)=\Gamma\cos(\omega_c t+p(t)+\phi(t)) \tag{4}$$

其中,Γ 为信号幅度,ω_c 为射频频率,$\phi(t)$为相位噪声,假定频率源为自由振荡器,则相位噪声 $\phi(t)$可建模为维纳过程[5]。相应的复信号形式为 $s(t)=\Gamma\exp(\mathrm{j}(\omega_c t+p(t)+\phi(t)))$。

射频滤波器对信号将起到抑制带外成分的作用。如果等效到基带上,可近似视为对瞬时频率 $w(t)$进行低通滤波。设 $\lambda(t)$为等效的低通滤波器,若令

$$\chi(t)=w(t)\otimes\lambda(t),\ \varphi(t)=\int_{-\infty}^{t}\chi(t)\mathrm{d}t,$$

则滤波后信号可表示为

$$s(t)=A\exp(\mathrm{j}(\omega_c t+\varphi(t)+\phi(t)))$$

在功放部分,由于器件的非理想特性,功放将存在非线性特性。文献[6]指出功放的非线性特性将产生指纹特征。对窄带输入信号 $s_R(t)$,可用泰勒级数来描述功放的非线性特性:

$$y_R(t)=\sum_{m=0}^{\infty}a_m s_R(t)^m \tag{5}$$

由于倍频成分不在信号发射频带内,将被滤除,且容易受旁带干扰,仅考虑式(5)中的基频成分。如果取 M(M 为奇数)阶近似,则功放输出信号的复数表示为

$$y(t) = \exp(\mathrm{j}(\omega_c t + \varphi(t) + \phi(t))) \cdot \sum_{m=0}^{(M-1)/2} \frac{1}{2^{2m}} C_{2m+1}^{m} a_{2m+1} \Gamma^{2m+1} \tag{6}$$

由此可见,功放非线性特性对恒包络的 FSK 信号并无显著影响,这实际上意味着无法从 FSK 发射信号中了解功放器件的特性信息,从而无法构建功放的指纹特征。这是 FSK 电台相比 PSK 和 QAM 等非恒包络调制电台的不同之处。

综合以上讨论可知,对于 FSK 电台而言,其指纹特征主要来源于 FM 调制器和变频器(包括本振和混频器),并主要体现在 FSK 发射信号的瞬时频率上。此外,功率控制(例如突发信号的产生和关断)和开机所导致的暂态特性也蕴含可区分电台个体的指纹特征。对暂态信号指纹特征提取已有较多文献阐述,本文不列入讨论范围。

3 FSK 发射机指纹特征提取

3.1 信号模型

在接收端,如果采用一定精度的频率源和 ADC 量化,则接收机对信号的畸变影响可以忽略。根据式(6),下变频后得到的基带采样信号可以表示为

$$y(n) = A\exp(\mathrm{j}(\omega_o n + \varphi(n) + \phi(n))) + v(n) \tag{7}$$

其中,$v(n)$为方差为 σ_v^2 的高斯白噪声,ω_o 为频偏且 $\omega_o \ll \omega_d$。如果信噪比足够高,则

$$\begin{aligned} y(n) &= (A + \tilde{v}(n))\exp(\mathrm{j}(\omega_o n + p(n) + \phi(n))) = \\ &\tilde{A}\left(\frac{A + \tilde{v}_{\mathrm{I},n}}{\tilde{A}} + \mathrm{j}\frac{\tilde{v}_{\mathrm{Q},n}}{\tilde{A}}\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_o n + p(n) + \phi(n))} \approx \\ &\tilde{A}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\tilde{v}_{\mathrm{Q},n}}{\tilde{A}}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_o n + p(n) + \phi(n))} = \\ &\tilde{A}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_o n + p(n) + \phi(n) + \frac{\tilde{v}_{\mathrm{Q},n}}{\tilde{A}})} \end{aligned} \tag{8}$$

其中,$\tilde{v}_{\mathrm{I},n} = \mathrm{Re}\{\tilde{v}_n\}$,$\tilde{v}_{\mathrm{Q},n} = \mathrm{Im}\{\tilde{v}_n\}$,$\tilde{A} = \sqrt{(A + \tilde{v}_{\mathrm{I},n})^2 + \tilde{v}_{\mathrm{Q},n}^2}$。因此,信号的瞬时相位

$$\chi(n) \approx \omega_o n + \varphi_n + \phi_n + \xi_n \tag{9}$$

其中,$\xi_n = \tilde{v}_{\mathrm{Q},n}/\tilde{A}$,由于 $\tilde{v}_{\mathrm{Q},n}$ 为方差为 $\sigma_v^2/2$ 的白高斯过程,ξ_k 可视为方差为 $1/(2\lambda_v)$ 的加性高斯白噪声,其中 $\lambda_v = A^2/\sigma_v^2$ 为信号的信噪比。

根据式(9),信号的瞬时频率可以表示为

$$\omega_n = \omega_o + \chi_n + \eta_n + \nu_n \tag{10}$$

其中,$\chi_n = \chi(nT_s)$为 FM 调制器输出的瞬时频率;$\nu_n = \xi_{n+0.5} - \xi_{n-0.5}$;$\eta_n = \phi_{n+0.5} - \phi_{n-0.5}$,当本振采用自由振荡器时,根据维纳过程定义,$\eta_n$ 为高斯白噪声[6]。

以 z 变换形式来表示系统模型,令 $\lambda(z^{-1}) = \lambda_0 + \lambda_1 z^{-1} + \cdots + \lambda_{N_\lambda} z^{-N_\lambda}$ 表示低通滤波处理,则有 $\chi_{n-N_\lambda/2} = \lambda(z^{-1}) w_n$。另外,根据式(1),FM 调制器的系统函数可表示为如下形式:

$$H(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \tag{11}$$

因此根据式(2),有

$$\chi_{n-N_\lambda/2} = \lambda(z^{-1}) H(z^{-1}) q_n \tag{12}$$

令 $G(z^{-1}) = \lambda(z^{-1})H(z^{-1})$,则 $G(z^{-1})$可以表示成以下形式:

$$G(z^{-1}) = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + \cdots + c_{N_\lambda+1} z^{-(N_\lambda+1)}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{13}$$

故式(10)可表示为

$$\omega_{n-N_\lambda/2} = \omega_o + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} q_n + \xi_{n-N_\lambda/2} \tag{14}$$

其中,$\xi_n = \eta_n + \nu_n$。因此要刻画 FSK 电台的频率畸变特性,只需要估计获取系数向量 $\boldsymbol{a} = [a_1, a_2]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{c} = [c_0, c_1, \cdots, c_{N_\lambda+1}]^{\mathrm{T}}$ 即可。由于 ξ_n 实际上为色噪声,因此问题变为色噪声中的参数估计问题。

3.2 指纹特征提取及识别

对于式(14)所表述的色噪声中的参数估计问题,采用逐数据递推的迭代最小二乘方法进行求解。令

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, c_0, c_1, \cdots, c_{N_\lambda+1}, (1 + a_1 + a_2)\omega_o]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{y}^{(n)} = [-\omega_{n-N_\lambda/2-1}, -\omega_{n-N_\lambda/2-2}, q_n, q_{n-1}, \cdots, q_{n-(N_\lambda+1)}, 1]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

则有

$$\omega_{n-N_\lambda/2} = \boldsymbol{y}^{(n)\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \xi_{n-N_\lambda/2} \tag{17}$$

为了获得参数的无偏一致估计,可以采用辅助变量法来完成最小二乘估计。令

$$\boldsymbol{y}^{*(n)} = [-x_{n-N_\lambda/2-1}, -x_{n-N_\lambda/2-2}, q_n, q_{n-1}, \cdots, q_{n-(N_\lambda+1)}, 1]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

假设 $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ 为 nT_s 时刻的参数估计结果,则辅助变量构造方式为

$$x_{n-N_\lambda/2} = \boldsymbol{y}^{*(n)\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)} \tag{19}$$

则可得基于辅助变量的迭代最小二乘递推公式[7]:

$$\boldsymbol{\Omega}^{(n+1)} = \frac{\boldsymbol{\Gamma}^{(n)}\boldsymbol{y}^{*(n+1)\mathrm{T}}}{1 + \boldsymbol{y}^{(n+1)\mathrm{TT}}\boldsymbol{\Gamma}^{(n)}\boldsymbol{y}^{*(n+1)\mathrm{T}}} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(n+1)} = (1 - \boldsymbol{\Omega}^{(n+1)}\boldsymbol{y}^{(n+1)\mathrm{T}})\boldsymbol{\Gamma}^{(n)} \quad (21)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n+1)} = \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)} + \boldsymbol{\Omega}^{(n+1)}(\boldsymbol{\omega}_{n+1} - \boldsymbol{y}^{*(n+1)\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}) \quad (22)$$

迭代初值的选取为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(0)} = \varepsilon \boldsymbol{I}_{N_\lambda+3,1}, \boldsymbol{\Gamma}^{(0)} = \alpha \boldsymbol{I}$$

其中,ε 为一足够小的实数,α 为一足够大的实数,$\boldsymbol{I}_{N\times 1}$为全 1 的 N 维列向量,$\boldsymbol{I}$ 为单位对角阵。

通过以上方法得到参数估计结果 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 以后,即可构造指纹特征向量 $\boldsymbol{f} = \hat{\boldsymbol{\theta}}$。如果频偏 ω_o 不是稳定的指纹特征参数(例如存在多普勒频偏),则选择 $\boldsymbol{f} = \hat{\boldsymbol{\theta}}(1:N_\lambda+3)$作为指纹特征向量。如果阶数过高(即 N_λ 较大)导致特征向量维数过大,可进一步采用 Fisher-LDA 方法进行降维[8],将降维结果作为指纹特征。

为了取得较好的识别效果,采用支持向量机(SVM)分类器代替传统的指纹匹配方法来完成最终的识别。具备识别方法为:先对已知辐射源身份的信号样本,提取指纹特征向量,将其送入 SVM 分类器进行训练;然后对未知辐射源身份的信号样本,提取其指纹特征向量,送入 SVM 分类器完成识别工作。

4　仿真和试验结果

为了验证所提算法的可行性和性能,进行两项实验:一是仿真产生多个 FSK 辐射源的射频信号,测试算法在不同信噪比情况下的识别性能;二是采用实际采集的 FSK 电台信号测试算法可行性和性能。

仿真 10 个 FSK 辐射源的情况,每个辐射源产生 400 个 FSK 信号样本。样本生成按照式(14)所述模型,各个辐射源的仿真参数设置如表 1 所示。这里 a_1 和 a_2 两个参数反映了 FSK 调频过程中瞬时频率的畸变特性,其细微差异则表现了发射机的细微差异。另外,反映低通效应的 $c_1,\cdots,c_{N_\lambda+1}$等参数置为 0,$c_0$ = 1,意味着低通效应的差异不考虑在指纹特性中。

表 1　10 个 FSK 辐射源的仿真参数

Table 1 Parameters characterizing the transmitter distortions of 10 FSK radios

编号	a_1	a_2
T1	0.102 0	−0.510 0
T2	0.102 2	−0.504 9
T3	0.102 4	−0.499 8
T4	0.102 6	−0.489 6
T5	0.102 8	−0.484 5
T6	0.103 0	−0.479 4
T7	0.103 2	−0.474 3
T8	0.103 4	−0.469 2
T9	0.103 6	−0.464 1
T10	0.103 6	−0.464 1

为了评估所提出的特征提取方法的性能,对所有辐射源,分别选取 200 个样本构成训练集,剩下的各 200 个样本构成测试集。对训练集样本,将所提出来的特征送入支持向量机(SVM)分类器进行训练,再对测试集样本进行特征提取,并送入 SVM 分类器进行识别,从而评估识别正确率。为了对比,按照文献[2]描述,计算信号的双谱,再按照矩形路径积分获得特征,再采用主成分分析(PCA)方法降维得到特征,最后送入 SVM 分类器进行识别,并统计其识别率。

图 2 给出了本文方法与文献[2]所提出来的双谱矩形积分(SIB)方法的识别性能比较。从图可见,本文方法具备较大的性能优势,而双谱 SIB 方法则几乎不可行,这主要是因为随机的信息数据调制对双谱造成了波动,且在数据长度有限的情况下,双谱还容易受噪声的影响,导致双谱计算结果存在较大误差,掩盖了双谱中蕴含的指纹信息。

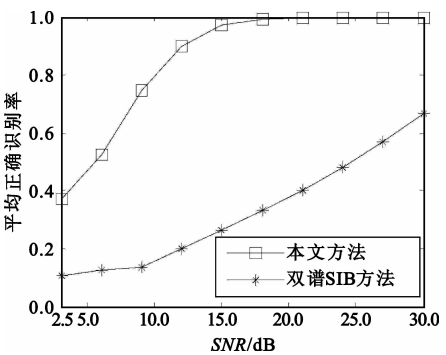


图 2　本文方法与双谱 SIB 方法的性比较

Fig.2 Performance comparison between the proposed approach and the SIB-bispectrum approach

为进一步验证算法在实际环境下的可行性和性能,采集 4 个 FSK 电台的辐射源信号,信号样本个数分别为 560、454、80 和 84,每个样本包括 200 个符号长度的 FSK 调制信号。取其中一半信号样本训练分类器,取另一半来测试识别性能。在采用所提出来的方法提取得到的参数向量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 后,再采用 Fisher LDA 方法降维,得到的特征的前二维显示结果如图 3 所示。从图可见,所提出来的方法所得到的特征具备较好的区分能力。为了对比,我们也采用文献[2]所提出来的双谱特征提取方法进行特征提取,并同样采用 SVM 分类器来测试识别性能。表 2 给出了两种方法的性能比较,可见本文方法具备较大的性能优势,而双谱方法由于可用数据较短(200 个符号),导致双谱计算结果受噪声和随机数据调制的影响较为严重,其特征的区分能力就受到局限,因而识

别效果不佳。

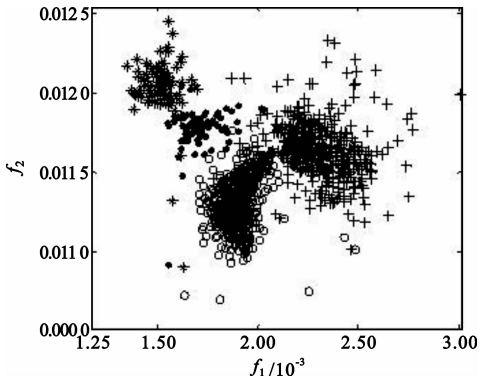


图 3 4 个 FSK 辐射源的指纹特征的前二维展示

Fig.3 View of the first two features extracted from samples of 4 FSK radios

表 2 本文方法和双谱特征方法的性能比较

Table 2 Performance comparison between the proposed approach and the bi-spectrum approach for real-word signals

方法	平均识别率
本文方法	96.23%
双谱方法	72.1%

最后需要说明的是,本文算法因采用迭代计算方法,因而可用的数据点数越多,则参数估计精度越高,识别性能越好,但同时算法所需要的计算时间也越多。另一方面,由于迭代最小二乘运算只需要进行小矩阵运算,其所需的储存空间和计算复杂度也远小于标准的最小二乘算法。

5 结 论

本文针对 FSK 电台个体识别问题,提出基于瞬时频率提取电台指纹特征。所提取得到的特征来源于对 FSK 电台非理想特性机理的分析,因而可较好地描述电台之间的本质差异。在特征提取方法的具体实现上,采用基于辅助变量的最小二乘方法实现了色噪声中的参数估计,从而提升了特征的区分能力。对仿真信号和实际信号的测试都表明,基于瞬时频率畸变特性的特征提取方法可获得描述电台个体身份的"指纹",从而实现电台个体识别。

应该指出的是,如果能将功率控制或开关机暂态特性与本文所述的瞬时频率畸变特性综合考虑,应可获得具备更高区分能力的指纹特征,这是可以进一步开展研究的方向。

参考文献:

[1] 王伦文,钟子发. 2FSK 信号"指纹"特征的研究[J]. 电讯技术,2003,43(3):45 – 48.
WANG Lun-wen, ZHONG Zi-fa. Study on fingerprint characters of 2FSK signal[J]. Telecommunications Engineering, 2003,43(3):45 – 58.(in Chinese)

[2] Xu Shuhua, Huang Benxiong, Xu Lina, et al. Radio Transmitter Classification using a New Method of Stray Features Analysis Combined with PCA [C]//Proceedings of 2007 IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA:IEEE,2007:1 – 5.

[3] 王智鹏,敬守钊. 基于锁相环的 2FSK 电路的设计及实现[J]. 现代电子技术,2007,30(12):175 – 177.
WANG Zhi-peng, JING Shou-zhao. Design and realization for 2FSK circuit based on PLL[J]. Modern Electronic Technique,2007,30(12):175 – 177.(in Chinese)

[4] 董在望. 通信电路原理[M]. 北京:高等教育出版社,2002:429 – 431.
DONG Zai-wang. Communication circuit fundaments[M]. Beijing: High Education Press,2002:429 – 431.(in Chinese)

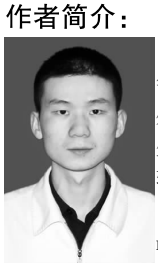
[5] Zhang W, Zhang X J, Zhou S D, et al. Analysis and mitigation of phase noise in centralized/de-centralized MIMO systems [M]//MIMO Systems, Theory and Applications. New York:InTech-Open Access Publisher,2011:335 – 349.

[6] 许丹. 辐射源指纹机理及识别方法研究[D].长沙:国防科技大学,2008.
XU Dan. Research on mechanism and methodology of specific emitter identification[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2008.(in Chinese)

[7] 刘党辉, 蔡远文, 苏永芝,等. 系统辨识方法及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
LIU Dang-hui, CAI Yuan-wen, SU Yong-zhi, et al. System identification and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.(in Chinese)

[8] 边肇祺,张学工.模式识别[M]. 2 版.北京:清华大学出版社, 2000.
BIAN Zhao-qi, ZHANG Xue-gong. Pattern recognition[M].2nd ed.Beijing:Tsinghua University Press,2000.(in Chinese)

作者简介:



黄渊凌(1982—),男,湖南资兴人,2005 年于清华大学获学士学位,2008 年于盲信号处理重点实验室获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为通信信号处理,尤其关注辐射源个体识别;

HUANG Yuan-ling was born in Zixing, Hunan Province, in 1982. He received the B.S. degree from Tsinghua University and the M.S. degree from Science and Technology on Blind Signal Processing Laboratory (BSPL) in 2005 and 2008, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns signal processing for communications and target identification, especially specific emitter identification.

Email:newhyl@163.com

郑 辉(1957—),男,江苏人,高级工程师、博士生导师,主要研究方向为盲信号处理、智能信息处理。

ZHENG Hui was born in Jiangsu Province, in 1957. He is now a senior engineer and also the Ph.D. supervisor. His research concerns blind signal processing and intelligent information processing.