

基于多维信号特征融合的空间通信目标识别技术

徐书华¹, 徐丽娜²

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对空间通信目标个体识别问题, 在射频指纹分析的基础上提出了一种多维信号特征融合提取方法。首先分别在时域、频域和高阶谱域对截获的空间通信目标射频信号提取个体多维信号特征, 然后对提取的特征进行融合, 并应用支撑矢量机对个体进行分类识别, 最后采用实测数据对这种识别方案进行了验证。实验表明, 通过多维信号特征融合方法可以有效提取空间通信目标的个体信息, 并能获得良好的识别效果。

关键词: 多维特征融合; 通信目标识别; 支撑矢量机

中图分类号: TN973.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)09-0073-04

Space communication target identification based on multi-dimensional signal feature fusion

Xu Shuhua¹, Xu Lina²

(1. Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A multi-dimensional fusion feature based on radio frequency fingerprinting is proposed to identify individual space communication targets. At first, the multi-dimensional signal features are extracted from time domain, frequency domain and high-order spectra domain. Secondly, the extracted features are interfused and a support vector machine is used for individual identification. Then, the actual samples are used to demonstrate the proposed scheme. The experimental results show that the proposed scheme could extract individual feature effectively and obtain a high recognition rate.

Key words: multi-dimensional feature fusion; communication target identification; support vector machine

空间通信目标识别是现代通信安全领域的重要内容, 其识别结果的可靠性和精细程度是通信对抗体系先进程度的重要标志之一。在空间通信技术高速发展的前提下, 原有意义上的空间通信目标识别(如调制模式识别等)方法无法区分复杂信号环境下的同类空间通信目标个体。因此, 必须通过特定的高保真通信接收机分析侦测到的空间通信信号, 从中提取空间通信目标的射频信号特征, 实现对特定空间通信目标的个体识别。

从上世纪末开始, 国内外研究人员已发表了若干针对通信目标射频信号特征提取的相关文献^[1-5]。国外相关研究主要针对暂态通信信号中的开关机信号, 利用特征提取的分析方法实现个体识别, 而国内多数是从概念

上和局部特征进行研究, 由于难度较大, 尚没有突出的研究成果。

然而, 暂态通信信号特征的实际应用存在较大困难, 其主要原因在于暂态信号持续时间极短, 在非协作通信中信号定位困难, 而且暂态信号与噪声的相似性使得特征提取十分困难。考虑到正常通信时的稳态信号持续时间长, 信号检测和监控都比较容易, 因而稳态分析方法具有更加广泛的应用价值。因此, 本文提出利用稳态信号特征对空间通信目标进行个体识别。对充足信号长度的稳态空间通信信号分别在时域、频域和高阶谱域提取多维特征进行融合, 并结合基于现代机器学习算法的支撑矢量机作为识别器, 给出了完整的空间通信目标识别方法, 并通过实验验证了本方法的有效性。

1 空间通信目标识别方案

空间通信目标识别实质上是模式识别问题,其一般流程如图1所示。空间通信目标信号监测是指通过高保真接收机对射频信号进行检测、采样和量化,把监测到的空间信号转化成可分析处理的数字信号;射频信号预处理的目的是滤除噪声,对原始数字信号进行处理得到适合分析的目标数字信号;信号个体特征提取是在多种不同的变换域(时域、频域、高阶谱域等)对数字信号进行变换,提取能够反映目标个体本质的特征,并将所得的多维信号特征进行融合,得到适合分类的空间目标个体特征;分类识别过程是通过现代机器学习算法等在特征空间中把被识别目标划归为某一类特定的个体;在得到对未知空间通信目标的识别结果后,由安全决策处理模块对该未知目标进行安全分析,并作出相应的应对机制。

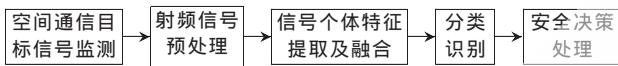


图1 空间通信目标模式识别过程

1.1 空间通信信号特征的定义

从空间通信目标个体识别的流程来看,其技术难点在于射频信号个体特征的提取,即从接收到的通信信号中提取反映空间目标个体设备特点的细微特征。该细微特征应具备以下特点:

- (1)检测性,即能够从截获信号中通过有限次的观测检测出来;
- (2)稳定性,即不因时间推移或环境条件的变化而发生显著的变化;
- (3)完备性,即能够反映通信目标的个体属性,并能够应用多维特征来描述;
- (4)唯一性,即任意两部设备所提取的特征值应该不相等。

根据信号指纹的定义,可以将具有上述特点的信号特征称为空间通信信号的个体特征或者射频指纹,这是对空间通信目标个体进行有效识别的主要依据。理论上,由于空间通信设备(如卫星、机载电台等)在元器件性能、生产工艺及安装调试等方面的随机性,必然使得该设备的射频信号具有区别于其他设备的个体特点。即使是来自同一条生产线的任意两部型号完全相同的通信装备,在通信发射机工作过程中,它们所发射的调制信号包含某些细微特征。根据通信信号具有的反映电台个体特点的技术特征,在一定范围内侦察和识别电台已经有应用实例^[7]。

1.2 信号特征的提取依据

综上所述,在实际空间通信目标识别过程中,利用暂态信号特征进行个体识别面临信号捕捉和特征提取的难题。由于空间通信发射机的稳态信号持续时间长,信号检测和监控都比较容易,因此,本方案主要针对稳

态空间通信信号,从以下三个角度来提取空间通信目标的个体特征。

(1)载频偏差的个体差异

无论采取何种调制方式,空间通信目标发射的射频信号总存在载频。载频的偏差和稳定度取决于通信发射设备的本振源,其不同的制造精度和调试过程将会造成空间目标个体的差异。

(2)调制参数的个体差异

由于采用的元器件不同,不同空间通信设备的调制参数将产生细微的差异(如PSK信号的码速率等)。只要保证测量精度,就可以提取调制参数作为目标个体特征。

(3)杂散特性的个体差异

每台空间通信设备由于元器件的差异,将具有不同的非线性特性,从而产生不同杂散成分,包括互调频率、谐波频率、寄生调制等。对这些杂散特征的提取是空间通信目标个体识别的主要依据之一。

2 多维稳态信号特征提取方法

本方案依据稳态射频信号的常规特征和杂散特性来提取空间通信目标的个体特征。前者主要包括通信信号载频和码速率等调制参数;后者主要包括从频域和高阶谱域提取的杂散信号特征。信号特征提取方法描述如下。

2.1 通信信号载频和调制参数提取

载频估计有多种方法,本方案采用相位拟合方法对较长时间监测得到的空间通信信号进行载频估计^[6],将此参数标记为 f_c 。对于调制参数的提取,针对实验研究对象(如机载FM/FSK通信电台),本方案采用码速率分析方法来获取通信目标个体特征差异,并应用适用于非协作通信条件的小波分析法来进行码速率估计^[6],将此参数标记为 R_B 。

2.2 频域杂散特征提取

空间通信设备的一部分非线性噪声会以各种不同的调制方式附加在射频信号上,使得接收信号在频域产生微小变化,从而产生大量的杂散频率分量。为捕获不同发射机个体的这种差异,本方案应用HHT(Hilbert Huang Transform)时频法发掘信号个体的杂散频率成分,其特征提取步骤描述如下:

(1)假定监测到的目标信号为 $x(t)$,按照EMD(Empirical Mode Decomposition)算法将其表示为本征模态函数 c_i 和余量函数 r_n 之和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

(2)对每一个本征模态函数 c_i 进行Hilbert变换,构造其解析信号,得到瞬时频率 $\omega_i(t)$,并将原始信号 $x(t)$ 表示为:

$$x(t) = \text{Re} \left[\sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \right] \quad (2)$$

(3) $a_i(t)e^{j\int \omega(t)dt}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 满足本征模态函数条件, 计算其 Hilbert 变换 $H_i(\omega, t)$, 得到 $x(t)$ 的完整 Hilbert 时频谱:

$$H(\omega, t) = \sum_{i=1}^n H_i(\omega, t) \quad (3)$$

(4) 根据 Hilbert 时频谱, 可得到信号 $x(t)$ 的 Hilbert 边缘谱 $h(\omega)$:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (4)$$

其中, T 为信号采样持续时间。Hilbert 边缘谱 $\{h(\omega)\}$ ($\omega=1, \dots, P$) 反映了每个频点上的幅值分布, 本方案采用上述该特征来反映空间通信设备个体在在频域表现出的杂散特性差异。

2.3 高阶谱杂散特征提取

实际上, 经过编码和调制后的空间通信信号由于受到发射机杂散特性的影响, 监测到的射频信号将更多地表现为不规则的非平稳、非线性和非高斯性, 本方案采用高阶谱分析法来表征通信信号个体中的非规则成分。特征提取步骤描述如下^[7]:

(1) 计算采样信号 $\{x(n)\}$ 的傅里叶变换矢量 $X(\omega)$, 设:

$$\Omega = \left[\frac{q\pi}{2^d} : d = \lfloor \log_2 T - 1 \rfloor, \right. \\ \left. 0 \leq q < 2^d, d, q \in Z \right] \quad (5)$$

其中, $\omega \in \Omega$, T 为信号长度, Z 表示整数域。

(2) 计算 $\{x(n)\}$ 的直接双谱 $B(\omega)$:

$$B(\omega) = B(\omega_1, \omega_2) = X(\omega_1)X(\omega_2)X(\omega_1 + \omega_2) \quad (6)$$

(3) 计算 $\{x(n)\}$ 的积分双谱特征 $y(l) = \sum_{S_l} B(\omega_1, \omega_2)$ ($l=1, 2, \dots, N$)。其中, S_l 是双谱的矩形积分路径。

(4) 采用流形约简算法对高维双谱特征 $\{y(l)\}$ ($l=1, 2, \dots, N$) 进行降维, 得到适合识别器的相对较低维高阶谱特征 $\{y(l)\}$ ($l=1, \dots, M, M < N$)。

2.4 多维信号特征融合

对从不同角度提取的常规信号特征 (包括载频和码速率) 和杂散特征 (包括杂散频率成分和双谱) 进行融合, 即将两大类特征矢量拉直合并为单一特征矢量, 然后对其进行归一化处理, 并定义为空间通信设备的稳态信号特征, 标记为:

$$\mathbf{x} = \{f_c, R_B, h(\omega), y(l)\} (\omega=1, P; l=1, \dots, M)$$

3 机器学习识别器设计

在空间通信目标识别实际应用过程中, 由于实际获得的观测数据样本较少, 而基于机器学习算法的 SVM (Support Vector Machine) 识别器对小样本数据具有良好的分类能力和推广能力。因此, 本方案应用 SVM 分类器进行空间通信目标个体识别。

作为一种核函数分类器, SVM 通过核函数将输入矢量由低维特征空间映射到高维特征空间, 将原始输入

空间的非线性可分问题转化为高维空间的线性可分问题, 其判决函数的一般形式为:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^S \omega_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + \omega_0 \right\} \quad (7)$$

其中, S 为支撑向量的个数, $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_S$ 为权系数, 核函数 $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})$ 为描述样本特征矢量 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}_i 相似性程度的非线性函数。

SVM 分类函数形式上类似于神经网络, 输出是 S 中间节点的线性组合, 每个中间节点对应一个支撑向量, 如图 2 所示。SVM 分类器解决了一般神经网络方法中无法避免的局部极值问题, 而且专门针对有限样本情况设计, 因而具有很好的使用价值。

SVM 针对两类分类问题设计, 不能直接用来解决多个体的分类问题。本方案采用基于 OAO (One Against One) 的多类别 SVM 分类器, 该算法把 K 个类别分类问题分解为 $K(K-1)/2$ 个类别分类问题来处理。

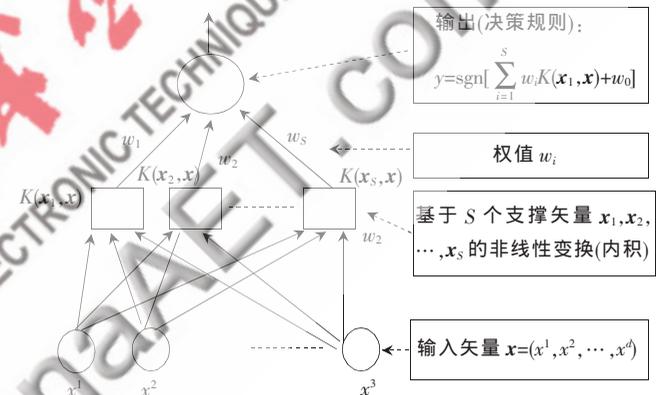


图 2 支撑矢量机示意图

4 实验分析

本方案主要对外场采集的高速运动通信设备 (FM/BPSK) 进行试验分析。实验选择载频 (f_c)、码速率 (R_B)、杂散频率 ($h(\omega)$)、高阶谱 ($y(l)$) 等四类特征参数来对不同的空间通信目标进行个体识别。实验中, 用于分析空间信号个体特征分类性能的数据来自 6 部不同高速车载通信设备, 其中 FM 和 BPSK 调制制式的数据样本各 60 组。每一类个体随机挑选 4 个样本用于训练分类器, 其余样本用作分类测试。数据分析结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 FM 目标选用特征及正确识别率

选用特征	$f_c \cup R_B$	$f_c \cup R_B \cup h(\omega)$	$f_c \cup R_B \cup h(\omega) \cup y(l)$
正确识别样本数/	28/36	30/36	33/36
测试样本总数	=77.8%	=83.3%	=91.7%

表 2 BPSK 目标选用特征及正确识别率

选用特征	$f_c \cup R_B$	$f_c \cup R_B \cup h(\omega)$	$f_c \cup R_B \cup h(\omega) \cup y(l)$
正确识别样本数/	29/36	30/36	34/36
测试样本总数	=80.6%	=83.3%	=94.4%

通过对实测高速车载电台(FM/BPSK)的数据试验分析可得:

(1) 针对空间通信目标个体识别问题,应用传统的通信信号特征(如信号载频、调制指数相关特征)结合杂散信号特征(如杂散频率、高阶谱)来定义空间通信信号的个体指纹,能够达到良好的识别效果。

(2) 本课题所研究的通信信号指纹特征具有一定普遍意义,是一般空间通信目标发射信号中必然存在的个体特征,因此将该方法应用于实际空间通信目标识别是可行的。

不同于传统意义上的通信目标调制样式识别,空间通信目标个体识别需要对监测到的射频信号细微特征进行特征提取和分类。然而这些信号细微特征差异附着在实际通信信号上,在实际复杂信号环境下不易监测。本文针对实际空间通信信号的特点,提出从时域、频域和高阶谱域等多个角度提取信号的常规特征和杂散特征,并进行融合得到个体信号的多维稳态特征,然后利用支撑向量机进行个体识别,对高速运动通信目标的实验分析验证了本方法的有效性。

总的来说,空间通信目标识别是一个新的研究领域,还需要对信号特征提取方法、识别方法和更多的实际目标进行进一步的研究,而且还将依赖于现代信号处理技术的发展,其在通信安全领域有着广阔的应用前景。

参考文献

[1] ELLIS K, SERINKEN N. Characteristics of radio transmitter

fingerprints[J]. Radio Science, 2001, 36:585-597.

[2] HALL J, BARBEAU M, KRANAKIS E. Enhancing intrusion detection in wireless networks using radio frequency fingerprinting[C]. IEEE Proceedings of ICCIT04, 2004:22-24.

[3] CHANE A C, REKHIS S, BOUDRIGA N. Defending against rogue base station attacks using wavelet based fingerprinting [C]. IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, Rabat, Morocco, May, 2009:523-530.

[4] 陆满君,詹毅,司锡才,等.通信辐射源瞬态特征提取和个体识别方法 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009,36(4):736-740.

[5] 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.

[6] Xu Shuhua. Research on identification of individual transmitter [D]. PhD thesis, Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.

[7] 徐书华,黄本雄,徐丽娜.基于SIB/PCA的通信辐射源个体识别[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(7):14-17.

(收稿日期:2010-12-06)

作者简介:

徐书华,男,1976年,博士,主要研究方向:现代通信信号处理、通信网络安全等。