文章编号:1001-893X(2012)07-1096-06

基于排序时频特性的雷达脉内调制信号识别*

于宝明,胡国兵

(南京信息职业技术学院电子信息学院,南京 210046)

摘 要:提出了一种基于排序时频特性的雷达脉内调制信号识别算法。该算法可分为三步:首先,通 过检验信号时频曲线的互易回归特性,识别出线性调频信号;然后,通过检验信号时频 RANKIT 图的 正态性,识别出常规信号;最后,检验信号平方后时频 RANKIT 图的正态性,用以区分二相编码与四 相编码信号。仿真结果表明,该算法无需接收信号的任何先验知识,在较低信噪比条件下可实现对 常用雷达脉内调制方式的有效识别。

关键词: 雷达信号; 脉内调制; 时频特性; 线性回归 中图分类号: TN957.51 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.009

Intrapulse Modulation Recognition of Radar Signals Based on Ordered Time – Frequency Curve

YU Bao-ming, HU Guo-bing

(Department of Electronic Information Engineering, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210046, China)

Abstract: An intrapulse modulation recognition method is proposed based on the properties of the ordered time frequency curve(TFC). The algorithm is divided into three steps: firstly, linear frequency modulation(LFM) signals can be recognized by testing of the character of the alternative regression for the TFC; and then, the normal signals can be identified by the normality test of the RANKIT of others modulation signals; thirdly, the binary phase shift keying(BPSK) signals and quadrate phase shift keying(QPSK) signals can be classified by the normality test of the squared signals. Simulation results show that the proposed method is effective to recognize the common intrapulse modulation type signals at a lower signal – to – noise ratio(SNR) without a priori knowledge.

Key words: radar signal; intrapulse modulation; time - frequency curve; linear regression

1 引 言

在电子侦察信号处理中, 雷达信号脉内识别方 式识别是介于信号检测与解调之间的重要中间环 节。正确、可靠的调制识别结果将有利于提高后续 处理环节, 如参数估计、辐射源分类与识别等的处理 效果^[1-2]。

相关文献分别利用相位信息、时频分布特征、正 弦波生成特性、分形特征等对雷达信号脉内调制识 别问题进行了研究。文献[3-4]通过多重相位差分 获取信号的瞬时频率曲线,以其峰值幅度为识别特 征,完成对常用脉内调制信号的识别。文献[5]先对 信号作短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transfor-

 ^{*} 收稿日期:2011 - 12 - 26;修回日期:2012 - 03 - 12
 基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2011837)
 Foundation Item: The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011837)

^{· 1096 ·}

mation, STFT),得到时频曲线,借助其线性回归的拟 合优度及峰值两大特征,完成脉内调制识别。文献 [6]提出了一种基于 Wigner 和 Choi - Williams 时频 分布图像分析的雷达脉内调制特征提取方法,基于 多层感知分类器对 LFM、BPSK、Costas 频率编码等调 制信号的识别,信噪比6 dB时,总体识别正确率达 98%,但该算法中分类特征的提取较为复杂,运算量 较大。文献[7]针对常用雷达脉内调制信号的时变 矩在不同延时及共轭阶数下所呈现的正弦波抽取特 性,将脉内调制方式识别问题转化为正弦波检测识 别问题。文献[8]采用分形维数中反映信号波形几 何特性和分布特性的盒维数、信息维数作为分类特 征,用来识别雷达辐射源信号的脉内调制方式,此方 法对相位编码类信号效果明显,但需事先进行大量 脉冲学习与训练。文献[9]通过对雷达信号时频分 布图像进行二维小波分解,并对其进行主分量分析, 获得不同调制方式雷达信号的特征参数,构建相应 的分类器,对信号调制方式进行识别,但该方法同样 需要大量的脉冲学习与训练,这在电子侦察的非协 作条件下是较难达到的。文献[10]利用调制信号分 数阶傅里叶变换阶数的差异,可将线性调频信号与 频率编码及相位编码类信号区分开来,但该方法无 法确定具体的频率或相位编码调制样式。

本文针对常用雷达脉内信号调制方式的时频特 性曲线在排序前后所呈现的差异,提取了信号的时频 互易回归特性、时频曲线 RANKIT 图正态性两大特征 进行调制识别。计算机仿真结果表明,本文方法无需 接收信号的任何先验知识,在较低信噪比条件下就可 实现对常用雷达脉内调制方式的有效识别。

2 信号模型

设观测信号模型为

$$r(t) = s(t) + w(t) =$$

$$A \exp\{j[2\pi f_c t + \varphi(t) + \theta]\} + w(t), 0 \le t \le T$$
(1)

式中,s(t)为信号部分;w(t)为噪声分量,为一实部 与虚部互相独立的零均值复高斯白噪声过程,方差 为 σ^2 ,且与信号s(t)互不相关; $A \ f_0 \ \theta$ 分别为信号 的幅度、载频、初相,T为观测时间。现考虑4种常 用的脉内相位调制方式,其相位函数 $\varphi(t)$ 变化规律 如下^[7]:

(1)对于常规(Normal Signal, NS)信号: $\varphi(t) = 0$;

(2)对于线性调频(linear Frequency Modulation, LFM)信号: $\varphi(t) = \pi k t^2$, k 为调频斜率;

(3)对于二相编码(Binary Phase Shift Key, BPSK) 信号: $\varphi(t) = \pi d_2(t)$,其中 $d_2(t)$ 是一个二元编码信 号,其码元宽度为 T_c ;

(4)对于四相编码(Quadrate Phase – Shift Keying, QPSK)信号: $\varphi(t) = \pi d_4(t)/2$,其中 $d_4(t)$ 是一个四元编码信号,其码元宽度为 T_c 。

3 信号的排序时频特性分析

3.1 时频曲线的获取及其线性回归

考虑到算法实现的复杂度与实用性,本文选择 短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transformation, STFT)方法获取信号时频曲线。信号 r(t)的 STFT 变换为

$$\mathrm{STFT}_{r}(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [r(\tau)g^{*}(\tau-t)] \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f\tau} \mathrm{d}\tau \quad (2)$$

式中, $g(\tau)$ 为窗函数,*代表复数共轭。STFT 相当 于将观测信号 r(t)与矩时窗 $g(\tau - t)$ 相乘,得到信 号在分析时间点 t 附近的一个切片,然后对这个切 片作傅里叶变换,得到其局部频谱特性,将多个不同 分析时间点对应的切片信号的局部频谱按时间顺序 组合起来,就得到信号在 STFT 意义下的时频谱。若 信号切片的个数为 M,分别对每个切片信号进行频 率估计,得到对应的时频样本对 $(i, \hat{f}_i), i = 1, 2, \cdots,$ M。令 $\gamma_i = \hat{f}_i, x_i = i$,其线性回归值为

$$\hat{y}_i = \hat{b}_1 x_i + \hat{b}_0, 0 \le i \le N - 1$$
 (3)

式中, ĥ₁、ĥ₀分别对应于回归直线的斜率与截距。

3.2 排序时频特征

3.2.1 时频互易回归特性

设 \hat{b}_1 、 \hat{b}_0 为信号的时频曲线线性回归得到的斜 率值与截距,而 \hat{b}'_1 、 \hat{b}'_0 为原曲线按升序重排后线性 回归得到的新直线的斜率值及截距,若 $\hat{b}_1 = \hat{b}'_1$ 且 $\hat{b}_0 = \hat{b}'_0$,则称该信号满足时频互易回归特性。图 1 所示为原序时 4 类常用脉内调制信号的时频曲线及 其线性回归,图 2 分别为 NS、LFM、BPSK、QPSK 信号 的时频曲线(由 STFT 变换得到,图中实线示出)及其 线性回归曲线(图中虚线示出)。由图 1 及图 2 可 见:LFM 信号的时频曲线原序与重排后的回归直线 是重合的,因此,满足互易回归特性; NS 信号原序 时,时频曲线线性回归直线的斜率与截距均近似为 零,而重排后,时频回归直线的斜率大于零,截距不 等于零。BPSK 信号时频曲线的原序回归直线斜率 与截距也近似为零,而重排的回归直线为阶梯形状, 线性回归后斜率明显大于零;QPSK 信号时频曲线在 两种不同顺序下的回归特性也存在较大差别。因 此,这三类信号都不满足时频互易回归特性。显然, 利用这个特性可将 LFM 信号与其他 3 种调制样式 NS、BPSK、QPSK 区分开来。





3.2.2 时频 RANKIT 图正态性

电讯技术

在统计分析中,通过某一随机序列的 RANKIT 图, 可以直观地对该样本集是否满足正态性作出判断^[11]。 若 RANKIT 图呈线性增加,则一般满足正态性,反之则 不然。下面将通过分析信号时频曲线 RANKIT 图特性, 给出 NS、BPSK、QPSK 分类识别的方法。

(1)NS 信号与 BPSK、QPSK 信号的区分

对于 NS 信号,其时频曲线是通过加窗分块作 STFT,然后用最大似然方法得到每一分块信号的频 率估计值 $\hat{f}_i(i = 1, 2, \dots, M)$ 得到,在适度信噪比条 件下, \hat{f}_i 近似服从高斯分布^[12]。因此,其时频曲线 近似为一独立同分布的高斯序列,而 BPSK 及 QPSK 信号的时频曲线存在跳变点,不满足这一特性。图 3 为 NS、BPSK 及 QPSK 信号时频曲线的 RANKIT 图。



图 3 NS、BPSK 及 QPSK 信号时频曲线的 RANKIT 图 Fig. 3 RANKIT maps for time – frequency curves of NS, BPSK and QPSK signals

由图 3 可见,NS 时频曲线 RANKIT 图接近线性, 满足正态性假设,而 BPSK 及 QPSK 信号时频曲线 RANKIT 图呈阶梯状,不呈线性,因此不满足正态性假 设。于是,可以通过检验信号时频曲线 RANKIT 的正 态性与否,将 NS 信号与 BPSK 及 QPSK 信号分开。

(2)BPSK 与 QPSK 信号的区分

对 BPSK 信号进行平方可以得到

 $s^{2}(t) = A^{2} \exp[j(4\pi f_{0}t + 2\theta)]$ (4)

对 QPSK 信号进行平方可以得到

 $s^{2}(t) = A^{2} \exp\{j[4\pi f_{0}t + \pi d_{2}(t) + 2\theta]\}$ (5)

上述两式表明, BPSK、QPSK 信号经平方变换后 分别转变成 NS 信号与 BPSK 信号。这样, 对 BPSK 信号与 QPSK 信号的识别就退化为对 NS 与 BPSK 信号的识别^[7]。图 4 为 BPSK 及 QPSK 平方后的时频 曲线 RANKIT 图。





由图 4 可知,平方后的 BPSK 信号实质上退化 NS 信号,其时频曲线 RANKIT 图与 NS 信号相类,近 似呈线性,服从正态性。QPSK 平方后成为 BPSK 信 号,其时频 RANKIT 图仍呈阶梯形,不满足正态性。

4 识别算法

根据前述分析,本文提出的信号脉内调制识别 算法流程如图5所示。需要注意以下两点:

(1)对信号进行 STFT 变换,得到时频曲线后要 进行归一化、去中心化处理;

(2)RANKIT 图只能定性地区分某一序列是否服 从正态性,统计意义上的正态性检验可以用 Shapiro - Wilky 方法来处理,该方法可用于小样本场合,具 体步骤参阅文献[13-14],此处从略。



图 5 识别算法流程图 Fig.5 Flowchart of the proposed modulation recognition algorithm

5 仿真与性能分析

5.1 仿真条件

设待识别信号为 NS、LFM、BPSK(13 位巴克码) 和 QPSK(选择 13 位泰勒码)中的一种。采样频率为 100 MHz, 载 频 为 20.6 MHz, 线 性 调 频 系 数 为 1.953 MHz/ μ s,相位编码信号码元宽度为300 ns,信 号长度为10.24 μ s。每一类调制方式的信号分别做 1 000次识别仿真。输入信噪比定义为 *SNR* = A^2/σ^2 ,信噪比变化范围为[-6 dB,10 dB]。

5.2 性能分析

图 6 所示为利用本文算法对 4 类常用脉内调制 信号在不同信噪比条件下的识别性能。



图 6 本文算法在不同信噪比条件下的识别性能 Fig.6 Probability of correct recognition versus SNR of the proposed method

由图6可得以下结果。

(1)4种信号的识别正确率随着信噪比的增加 而增加,信噪比大于4 dB时,4 类信号的识别正确率 均在 95%以上,信噪比进一步增加,识别性能也随 之变好。

(2)不同信号类型其识别性能各不相同。常规 信号识别性能最佳,信噪比-6dB时,识别正确率仍 接近100%;LFM信号略差,信噪比-3dB时,识别正 确率约为98%;低信噪比时BPSK信号略次于LFM 信号,QPSK信号的识别性能最差,但2dB时,识别正 确率仍达到88%以上。产生此现象的主要原因在 于BPSK、QPSK信号在识别过程中需要进行平方运 算,而平方运算是一种非线性运算,会导致信号信噪 比的下降,从而影响分块频率估计的性能,从而降低 信号识别的性能。

下面从理论上分析 BPSK 信号及 QPSK 信号平

対于 BPSK 及 QPSK 信号,平方后为

$$r^{2}(t) = s^{2}(t) + 2s(t)w(t) + w^{2}(t) = s'(t) + w'(t)$$
(7)

式中,s'(t)、w'(t)分别为 $r^{2}(t)$ 的信号分量与噪声 分量,其中 $w'(t) = 2s(t)w(t) + w^{2}(t)$,可以得到噪 声分量的均值与方差分别为

$$\begin{cases} E[w'(t)] = 0\\ \operatorname{Var}[|w'(t)|^2] = 4A^2\sigma^2 + \sigma^4 \end{cases}$$
(8)

则输出信噪比为

$$SNR_{o} = \frac{A^{4}}{4A^{2}\sigma^{2} + \sigma^{4}} = \frac{A^{2}}{\sigma^{2}}\frac{A^{2}}{4A^{2} + \sigma^{2}} = \frac{A^{2}}{4A^{2} + \sigma^{2}}SNR \quad (9)$$

上式表明, BPSK 及 QPSK 信号平方后的信噪比 为原信号信噪比的 $\frac{A^2}{4A^2 + \sigma^2}$ 倍,至少比原信号信噪比 下降6 dB。

图 7 所示为本文提出的排序时频特征识别算法 与文献[4]的相位差分法及文献[7]的正弦波抽取算 法平均识别性能比较。由图可见,当信噪比小于4 dB 时,本文算法的平均识别性能明显优于文献[4,7]方 法。相位差分算法由于相位受噪声的影响较为敏感, 低信噪比时性能不佳,而文献[7]提出的正弦波抽取 方法,对 LFM、BPSK、QPSK 信号均进行了非线性运算, 特别是对于 QPSK 信号的四次方运算,输出信噪比下 降明显,从而影响调制识别的平均正确率。



图 7 本文算法与文献[4,7]方法的性能比较 Fig.7 The average recognition performance comparison between the proposed method and the methods used in Reference [4] and [7] respectively

6 结束语

· 1100 ·

在电子侦察领域,对所截获信号的脉内调制方 式识别是介于信号检测与解调之间的重要环节。本 文针对不同脉内信号调制信号时频特性曲线在原序 与重排后所呈现的差异,通过检验信号的时频互易 回归特性、时频 RANKIT 图正态性两大特征,实现了 对 NS、LFM、BPSK、QPSK 4 类常用脉内信号的调制识 别,信噪比大于2 dB时,平均识别正确率可达 95%以 上。本算法不需要信号的任何先验信息,简单有效, 易于工程实现,具有较高的实用价值。考虑到雷达 信号的调制样式、信号环境越来越复杂,后续研究将 着眼于如何对其他类型的调制信号(如多相码信号) 进行识别,并对调制识别结果的可信度进行分析。

参考文献:

- Richard G. ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals[M]. Wiley: Artech House, 2006:478.
- [2] Tsui J. Digital Techniques for Wideband Receivers[M]. Dedham, MA: Artech House, 1995.
- [3] 黄知涛,周一宇,姜文利. 基于相对无模糊相位重构的自动脉内调制特性分析[J]. 通信学报, 2003,24(4): 153-160.
 WANG Zhi - tao, ZHOU Yi - yu, JIANG Wen - li. The automatic analysis of intrapulse modulation characte - ristics based on the relatively non - ambiguity phase restoral[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(4): 153 - 160. (in Chinese)
- [4] 王丰华,黄知涛,姜文利.一种有效的脉内调制信号 识别方法[J].信号处理,2007,23(5):686-689.
 WANG Feng - hua, HUANG Zhi - tao, JIANG Wen - li. An Effectual Approach of Intra - pulse Modulated Signal Recognition[J]. Signal Processing, 2007, 23(5):686 - 689.(in Chinese)
- [5] Lunden J, Koivunen V. Automatic Radar Waveform Recognition[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 2007,1(1):124 – 136.
- [6] Lopez Risueno G, Grajal J, Sanz Osorio A. Digital Channelized Receiver Based on Time – frequency Analysis for Signal Interception [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005,41(3):879 – 898.
- [7] 胡国兵,刘渝.基于正弦波抽取的雷达脉内调制识别
 [J].计算机工程,2010,36(13):21-23.
 HU Guo bing,LIU Yu.Signal Intrapulse Modulation Recognition Algorithm Based on Sine Wave Extraction[J].Computer Engineering,2010,36(13):21-23. (in Chinese)
- [8] 叶菲,罗景青,海磊.基于分形维数的雷达信号脉内 调制方式识别[J].计算机工程与应用,2008,44(15): 155-157.

YE Fei, LUO Jing – qing, HAI Lei. Recognition of radar emitter signal intra – pulse modulation mode based on fractal dimension[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(15):155 - 157. (in Chinese)

[9] 冀贞海,朱伟强,赵力.基于时频分布图像和主分量 分析的脉内调制识别算法研究[J].电路与系统学报, 2009,14(2):22-26.

JI Zhen – hai, ZHU Wei – qiang,ZHAO Li.Study on intra – pulse modulation recognition method based on time – frequency distribution image and principal component analysis [J]. Journal of Circuits and Systems, 2009, 14 (2): 22 – 26. (in Chinese)

 [10] 宁辉,陈超.基于分数阶傅里叶变换的脉内信号调制 方式识别[J].电讯技术,2011,51(12):42-47.
 NING Hui, CHEN Chao. Recognition of intrapulse signals modulation based on fractional Fourier transform[J]. Telecom-

modulation based on fractional Fourier transform $\lfloor J \rfloor$. Telecommunication Engineering, 2011, 51(12):42 – 47. (in Chinese)

- [11] Abatzoglou T. A fast maximum likelihood algorithm for frequency estimation of a sinusoid based on Newton's method
 [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(1):77 89.
- [12] Wood D C. Fitting Equation to Data[M]. New York.: Wiley, 1980.
- [13] Wilk S. An analysis of variance test for normality (complete samples)[J]. Biometrika, 1965, 52(3):591-611.
- [14] Royston. An extension of Shapiro and Wilk's Test for Normality

to Large Samples[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series C(Applied Statistics), 1982, 31(2):115 – 124.

作者简介:

于宝明(1965—),男,陕西宝鸡人,分别于 1985 年、1991 年获西北电讯工程学院学士学位硕士、西北核技术研究所硕 士学位,现为副教授,主要研究领域为智能信号处理、通信;

YU Bao – ming was born in Baoji, Shaanxi Province, in 1965. He received the B.S. degree from Northwest Institute of Telecommunication Engineering and the M.S. degree from Northwest Institute of Nuclear Technology in 1985 and 1991, respectively. He is now an associate professor. His research concerns intelligent signal processing and communications.

胡国兵(1978—),男,江苏高淳人,分别于 2002、2006 和 2011 年获南京大学学士学位、南京航空航天大学硕士和博士学位,现 为副教授,主要研究领域为认知无线电、统计信号处理。

HU Guo – bing was born in Gaochun, Jiangsu Province, in 1978. He received the B.S degree from Nanjing University, the M. S. degree and the Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2002, 2006 and 2011, respectively. He is now an associate professor. His research concerns cognitive radio and statistical signal processing.

Email:guobinghu@163.com