doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.015

引用格式:吕亚昆,杨承志,吴宏超,等.采用积分二次相位函数的雷达脉内调制类型识别[J].电讯技术,2014,54(9):1254-1259.[LV Ya-kun, YANG Cheng-zhi,WU Hong-chao, et al. Radar Intra-pulse Modulation Type Recognition by Using Integral Quadratic Phase Function[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(9):1254-1259.]

采用积分二次相位函数的雷达脉内调制类型识别*

吕亚昆**,杨承志,吴宏超,张柏林

(空军航空大学,长春 130022)

摘 要:为了在低信噪比条件下获得较好的识别准确率,提出了一种基于积分二次相位函数(IQPF) 的识别分类方法。根据不同信号的调频斜率的正负值完成信号的预分类,然后再利用不同信号的 IQPF峰值-能量比以及功率谱估计实现信号的自动化分类。给出了识别流程图并进行了仿真实验, 结果表明,该方法在信噪比大于-3dB时,其识别正确率达到90%以上,证明了方法的有效性和可行 性。相关研究为雷达脉内调制类型的识别提供了一种切实可行的方法,具有一定的应用价值。 关键词:电子对抗;雷达脉内调制;识别分类;峰值-能量比

中图分类号:TN911.7;TN97 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)09-1254-06

Radar Intra-pulse Modulation Type Recognition by Using Integral Quadratic Phase Function

LV Ya-kun, YANG Cheng-zhi, WU Hong-chao, ZHANG Bo-lin

(The Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: A recognition method based on integral quadratic phase function (IQPF) is presented in order to improve the correct recognition rate under low signal-to-noise ratio(SNR). The preliminary classification is completed according to the different signal frequency modulation slope . To implement the automatic identification, the IQPF peak-power ratio and power spectrum estimation are used. Recognition flow chart and the simulation experiment are given . The results indicate that the correct recognition rate can reach 90% or more when SNR is greater than -3 dB, so the method is feasible and effective. Research in this paper provides a feasible method for radar intra-pulse modulation types recognition, which has a certain application value. **Key words**:electronic countermeasure; radar intra-pulse modulation; identification and classification; peak -power ratio

1 引 言

随着现代电子技术的快速发展,雷达采用越来越 复杂的脉内调制技术,防止非合作接收机的检测和识 别,因此研究雷达脉内调制类型识别分类方法对提升 电子对抗水平具有重要意义。根据目前公开发表的 文献,可以将现有的雷达脉内识别分类方法分成以下 几类:基于时频图像直线特征的自动识别方法^[1-2]、 基于多重相位差分的自动识别算法^[3]、基于分数阶傅 里叶变换^[4]和高阶累积量的自动识别算法^[5]以及基 于功率谱估计的自动识别算法^[6]等。以上算法具有 较强的针对性,无法做到算法的通用性,且算法的计 算量通常较大,无法做到实时、准实时的调制类型识 别,部分算法只有在高信噪比下才有较好的识别分类 效果,低信噪比时识别分类正确性较低。

· 1254 ·

^{*} 收稿日期:2014-03-04;修回日期:2014-05-20 Received date:2014-03-04;Revised date:2014-05-20

^{**} 通讯作者: lykc123@ sina. com Corresponding author: lykc123@ sina. com

根据对以上对现有算法的分析并结合雷达信号的脉内频率变化率特征,本文提出了一种基于积分 二次相位函数(Integral Quadratic Phase Function, IQPF)的分类方法完成对雷达调制类型进行识别分 类。该算法首先根据不同信号的调频率的正负完成 信号的预划分,然后再根据不同信号的 IQPF 峰值 能量比关系以及功率谱估计实现调制类型的自动识 别分类。仿真结果表明,该方法简单有效,并且能够 在较低信噪比下获得较好的识别准确率。

2 脉内调制信号模型

雷达信号的脉内调制方式^[7]主要分为频率调制和相位调制,其信号数学模型可以统一表示成

 $s(t) = a(t) \exp[2\pi f t + \phi(t) + \psi]$ (1) 其中,a(t)是雷达信号的幅度函数,f是信号的载波 频率, $\phi(t)$ 为脉内调制函数, ψ 为初始相位。雷达信 号的不同的调制类型主要取决于 $\phi(t)$ 函数,其具体 表达式可参见文献[8]。

本文主要研究在雷达系统和理论研究中常用的 几种雷达脉内调制类型,包括相位调制中的二相编 码(BPSK)信号和多相编码(Frank 码和 P1-P4 码) 信号以及频率调制中的线性调频(LFM)信号和频 移键控(2FSK)信号。

3 IQPF 算法概述

二次相位函数(Quadratic Phase Function,QPF) 是用于识别线性调频和由线性调频转化的多相码信 号的一种方法,能够将信号能量集中于调频率曲线 上^[9],通过谱峰搜寻得到调频斜率的估计值,其定 义为

$$QPF(t,\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau)x(t-\tau)\exp(-j\mu\tau^2) d\tau$$
(2)

为使其能量更加聚集并消除多分量信号的影响,文献[10-12]对其进行改进,将时频脊线进行非相参累积得到积分二次相位函数(IQPF),使其更适用于信号的自动化识别和估计。该方法有两种定义方式。假设信号为 x(t),其计算方法如下:

$$\begin{aligned} &\operatorname{IQPF}^{(1)}(\mu) = \\ &\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau) x(t-\tau) \exp(-j\mu\tau^2) \,\mathrm{d}\tau \right| \,\mathrm{d}t \quad (3) \\ &\operatorname{IQPF}^{(2)}(\mu) = \\ &\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t+\tau) x(t-\tau) \exp(-j\mu\tau^2) \,\mathrm{d}\tau \right|^2 \,\mathrm{d}t \quad (4) \end{aligned}$$

公式(3)和(4)分别叫做包络检测统计量和平方 律检测统计量,本文采用第二种方法进行计算(下文 直接用 IQPF 代替)。改进后的方法具有抗噪性能较 好、在低信噪比时估计精度高、能够消除多分量信号 的影响以及仅需一维搜索降低运算量等优点。

频率调制信号和相位调制信号的调频率不同, 因此可以由该特征值完成信号的预划分,调频率的 估计值由式(5)获得:

$$\boldsymbol{\mu}_0 = \operatorname{argmax} \{ \operatorname{IQPF}(\boldsymbol{\mu}) \}$$
 (5)

4 脉内调制类型识别原理

4.1 基于调频率的信号预分类

通过文献[8]的时频分析可知:LFM 信号、 Frank 码、P1/ P3/ P4 码信号的调频斜率为正; BPSK、2FSK 信号的调频斜率为零;P2 码信号的调 频斜率为负,据此可以将信号分成3类,分别记为第 一类、第二类和第三类。由上一节的分析可知 IQPF 可以完成信号的调频率的精确估计,因此本文采用 基于 IQPF 的方法对信号进行预划分。图1给出不 同信号的 IQPF 图。



图 1 不同信号的 IQPF 图形 Fig. 1 IQPF graphics of different signals

由图 1 可知,根据调频斜率位置的不同,可以完成 3 类信号的自动化分类。第一类为调频斜率为正的信号,如图 1(a)所示,此类信号的 IQPF 图中只有一个峰值且在右半轴部分。第二类为调频斜率为零的信号,如图 1(b)所示,此类信号的 IQPF 图中峰值在零点附近,且 BPSK 有两个峰值,2FSK 有一个峰值。第三类为调频斜率为负的信号,如图 1(c)所示,该信号的 IQPF 图中只有一个峰值且在负半轴。实际中为防止噪声的影响而使调频斜率发生偏移,经过大量仿真实验选择一个误差因子 δ =0.05,当 μ > δ 时为第一类信号,当- δ <\vert和
> δ 时为第三类信号。

理论上,经过以上调频斜率的精确估计可以区 分出具体信号,但是由于雷达信号不可能每次参数 都固定不变加上噪声的影响,导致经过的 IQPF 估 计出的调频斜率值不是每次都固定不变,但是其相 对位置是固定的,因此我们只选择调频斜率特征值 对信号进行预分选,然后再对每类信号采用不同方 法进行精确分类,这样也有助于信号的快速识别。

4.2 第一类信号的识别分类

经过4.1 节对第一类信号的 IQPF 仿真发现信号的峰值幅度和信号能量之间存在固定比值关系,因此通过对信号的信噪比进行估计得出信号能量,然后利用此特征关系可以完成对第一类信号的分类,以 LFM 信号为例进行峰值能量比说明。

假设 LFM 信号的数学模型为

$$s(t) = A \cdot \operatorname{rect}(\frac{t}{T}) \cdot \exp(j(\omega_0 t + \frac{\mu_0}{2}t^2)) \quad (6)$$

其中,A为信号幅度, ω_0 为信号角频率,T为信号脉 宽, μ_0 为信号的调频斜率。

当估计调频斜率 μ 与 LFM 信号的调频斜率 μ_0 相等时,信号的峰值 $P^{[10]}$ 为

$$= \operatorname{IQPF}(\mu_{0}) =$$

$$\frac{A^{4}}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}\left(\frac{t+\tau}{T}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \mathrm{d}\tau \right|^{2} \mathrm{d}t =$$

$$\frac{A^{4}}{3}T^{2} = \frac{E^{2}}{3}$$
(7)

由式(7)可知,LFM 信号的 IQPF 峰值由信号能 量决定,同理可以推导多相码的峰值与信号能量之 间的关系。信号的 IQPF 峰值与信号能量之间的确 定比值关系,用峰值能量比 ppr 表示,具体表达式为

$$ppr = \frac{P}{kE^2} \tag{8}$$

式中,k 为根据信噪比而变化的能量系数,且 k<1, 该系数使 ppr 根据信噪比变化更利于信号的检测。 通过对取不同参数时的第一类信号进行 300 次蒙特 卡洛仿真实验,得到其峰值能量比如表 1 所示,其中 k=1/3。

表1 第一类信号的峰值-能量比值

Table 1 Peak–power ratio of the first type of signal			
信号	ppr	信号	ppr
LFM	1	P3	0.31
P4	0.63	Frank	0.28
P1	0.56		

由于 IQPF 能量聚集性能较好,抗噪性能较佳, 且峰值能量比具有较好的稳定性,因此利用表 1 中 第一类信号的 IQPF 峰值与信号能量之间的确定性 关系,通过划定不同门限来完成第一类信号的分类。 峰值能量比及其门限如图 2 所示(为显示更加清晰 使其归一化调频率有所偏移)。



图 2 第一类信号的峰值能量比图形 Fig. 2 Peak-power ratio graphics of the first type of signal

设门限阈值为 λ , 当 k = 1/3 时 λ 分别取 0.7、 0.57、0.4 和0.3, 即 λ >0.7 时判为 LFM 信号, 0.57< $\lambda \le 0.7$ 时判为 P4 码, 0.4< $\lambda \le 0.57$ 时判为 P1 码, 0.30< $\lambda \le 0.4$ 时为 P3 码, 当 $\lambda \le 0.30$ 时判为 Frank 码。实际仿真时发现,由于受到噪声以及 *ppr* 值接 近的影响,识别正确率会降低,因此需要根据信噪比 调整能量系数 k,设新门限为 $\lambda' = \lambda/k$,当信噪比较 小时取较小的 k,如此便可以同时增大 *ppr* 值以及门 限阈值而噪声基底不变,并且扩大了接近信号的差 值,使该方法具有自适应性,更加符合实际情况。

4.3 第二类信号的识别

虽然由4.1节可知第二类信号的 IQPF 图中 BPSK

· 1256 ·

D

为两个峰值.2FSK 为一个峰值.但是由于距离太近不 易用自动化方式区分,因此考虑用信号内部载频个数 不同来进行分类。BPSK 信号是基于一个载频进行相 位变化,而2FSK 信号则是在不同载频上进行频率变 化,因此可以用功率谱估计谱峰值个数的方法来进行 判断。文献[6]给出了采用 AR 功率谱估计方法的诸 多优点和可行性,因此使该算法对不同信号具有更好 的适应性和估计值的准确性,本文采用 30 阶 AR 功 率谱估计。图3给出了通过 Burg 算法计算的两种信 号的 AR 模型功率谱图形。从图中可以根据信号峰 值个数清晰地区分出两种信号。为实现自动化分类 过程同时为防止低信噪比时噪声对信号峰值个数产 生影响,可以设值动态限制门限 $\rho=2/3 \times P(P$ 表示信 号的最大峰值)。如果超过门限的峰值个数 C 只有 一个,则判为 BPSK 信号:如果超过门限的峰值个数 C有两个,则判为2FSK 信号。



图 3 第二类信号的 AR 功率谱图 Fig. 3 AR power spectrum of the second type of signal

4.4 LPI 雷达信号调制类型识别流程图

根据以上对脉内调制类型识别分类的研究,现 给出具体的识别流程框图如图4所示。



图 4 LPI 雷达调制类型识别流程图 Fig. 4 Flow chart of LPI radar modulation type recognition

4.5 仿真实验以及性能分析

为了进一步证明本文所用方法的有效性和正确 性,现给出具体的仿真实验,所用的仿真信号分别包 括 LFM、Frank、P1~P4 码、BPSK、2FSK 等 8 种信号。 其中信号载频1 kHz,采样频率为7 kHz,多相码信号 码元个数为 64,信号长度统一取值为1 024点,所用 噪声为加性高斯白噪声。对上述信号分别做 500 次 蒙特卡罗实验,识别正确率结果如图 5 所示。为证 明本文方法的快速性和稳健性,将本文方法所用时 间与文献[8]方法进行对比,仿真结果如图 6 所示。



Fig. 5 The recognition accuracy under different SNR

从图 5 仿真结果可以看出,算法在不同信噪比下的识别正确率优于文献[7]的方法,当信噪比大于-3 dB时识别正确率均达到了 90%,当信噪比大于0 dB时识别正确率均达到了 100%。相比来说,

对 P2 码信号和 LFM 信号的识别正确概率最高,P4 码与 P1 码的峰值能量比较接近,分类过程中容易识 别成 P1 码,而 P3 码的识别概率最低,因为其峰值能 量比与较接近,也容易识别成 Frank 码。图 6 仿真 结果表明,在不同信噪比条件下本文所用的方法时 间消耗均少于文献[8]方法,且随着信噪比的降低 文献[8]的方法时间消耗有着明显的增加,而本文 所用的方法却表现出一定的稳定性,从而也证明了 本文方法对不同信噪比信号的良好适应性。



Fig. 6 Elapsed time contrast

5 结 论

本文根据雷达信号调频斜率的特征,提出了一种基于 IQPF 的雷达脉内调制类型识别分类的方法。该方法利用信号调频斜率的正负零值将信号进行预分类,之后通过信号的 IQPF 峰值能量比以及 功率谱估计完成对信号的精确分类。算法采用了对 不同信噪比的自适应门限,特征稳健抗噪性能好,具 有较好的工程扩展能力。仿真结果,表明本文提出 的方法具有较高的识别率,在信噪比大于-3 dB时 识别正确率均达到了 90%,当信噪比大于0 dB时识 别正确率达到了 100%。但是本文方法对于 P1/P4 码和 P3/Frank 码的自适应门限不够合理;另外,该 方法只能完成对已知常用信号的精确分类,而对于 其他未知调制类型的信号只能实现预划分不能实现 精确分类,下一步将重点解决这两个问题。

参考文献:

- Gross F B, Connor J. Comparison of detectability of radar compression waveforms in classic passive receivers [J].
 IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007,43(2):789-795.
- [2] Jennison B K. Detection of polyphase pulse compression waveforms using the radon – ambiguity transforms [J].

IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003,39(1):335-343.

[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.

HUANG Zhi-tao, ZHOU Yi-yu, JIANG Wen-li. The automatic analysis of intra – pulse modulation characteristics based on the relatively nonambiguity phase restoral [J]. Journal on Communications, 2003, 24(4):153–160. (in Chinese)

- [4] 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 Intra-pulse signals modulation based on fractional fourier transform[J].
 Telecommunication Engineering, 2011,51(12):42-47. (in Chinese)
- [5] Swami A, Sadler B M. Hicrarchical digital modulation classification using cumulates [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3):416-429.
- [6] 李明宴,张鲁筠,江铭炎,等.复杂脉内调制雷达信号的识别方法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(15): 156-160.

LI Ming-yan,ZHANG Lu-jun,JIANG Ming-yan, et al. Identification method for complex modulated radar signals [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47 (15):156-159. (in Chinese)

- [7] 李建,张国毅,王长宇.复杂调制形式脉压雷达信号的识别方法[J].计算机工程与应用,2013,49(13):198-203.
 LI Jian,ZHANG Guo-yi,WANG Chang-yu. Identification method for complex modulated compression radar signal [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49 (13):198-203. (in Chinese)
- [8] Phillip E P. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. New York: Artech House, 2009.
- [9] 王勇,姜义成. 一种新的 LFM 信号参数估计算法[J]. 信号处理,2008,24(1):132-134.
 WANG Yong, JIANG Yi-cheng. A new algorithm for parameter estimation of LFM signals [J]. Signal Processing, 2008,24(1):132-134. (in Chinese)
- [10] 李宏,陈绍荣,秦玉亮,等.一种多相编码脉压信号的 检测与估计方法[J].系统工程与电子技术,2011,33
 (2):310-314.
 LI Hong,CHEN Shao-rong,QIN Yu-liang, et al. Detec-

tion and parameter estimation method for polyphase-coded pulse compression [J]. Systems Engineering and Electronics,2011,33(2):310-314.

 [11] 唐鹏飞,林钱强,袁斌,等. 基于积分二次相位函数和 分数阶 Fourier 变换的多分量 LFM 信号参数估计
 [J]. 信号处理,2012,28(7):926-931.
 TANG Peng-fei,LIN Qian-qiang,YUAN Bin, et al. Parameter Estimation of Multi-component LFM Signals Using Integrated Quadratic Phase Function and Fractional

· 1258 ·

Fourier Transform [J]. Signal Processing, 2012, 28(7): 926–931. (in Chinese)

[12] Wang Pu, Li Hong-bin, Djurovic I, et al. Integrated cubic phase function for linear FM signal analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46 (3):963-977.

作者简介:



吕亚昆(1989—),男,河北赞皇人,2012 年于空军航空大学获学士学位,现为硕士研 究生,主要研究方向为雷达信号脉内调制类 型识别;

LV Ya-kun was born in Zanhuang, Hebei Province, in 1989. He received the B. S. degree from The Aviation University of Air Force in

2012. He is now a graduate student. His research concerns radar intra-pulse modulation type recognition.

Email:lykc123@ sina. com

杨承志(1974—),男,甘肃天水人,教授、硕士生导师, 主要研究方向为信息感知与对抗;

YANG Cheng-zhi was born in Tianshui, Gansu Province, in 1974. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns information perception and countermeasure.

吴宏超(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,主要研究 研究方向为信息感知与对抗;

WU Hong-chao was born in Harbin, Heilongjiang Province, in 1982. He is now a lecturer. His research concerns information perception and countermeasure.

张柏林(1990—),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研 究方向为电子对抗。

ZHANG Bo-lin was born in Hengshui, Hebei Province, in 1990. He is now a graduate student . His research concerns electronic countermeasure.