

基于 STFT 的雷达信号脉内调制识别

夏亦佳¹ 郭玉霞^{1,2}

XIA Yijia GUO Yuxia

摘要

针对脉内调制识别计算量大、实时性不强、准确率低的问题,结合信号调制的频率、相位特征,提出一种基于 STFT 的信号测量、识别算法。首先采用幅度自相关法测量信号脉宽,然后通过 STFT 运算测量信号频率及带宽,再利用时域累加瞬时自相关法得到信号相位差,结合频率均值、频率变化斜率等信息对常规信号、相位编码信号、频率编码信号、线性调频及非线性调频信号进行调制类型识别。仿真结果表明,所提出的算法具有较高的识别精度和鲁棒性以及较低的运算量,适合工程化实现。

关键词

相位编码信号; 线性调频信号; 非线性调频信号; 短时傅里叶变换; 调制类型识别

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.036

0 引言

调制信号识别是信号检测和获取信号内容的重要步骤。在缺少先验信息的情况下,通过对接收到的信号进行检测和分析,得到该信号的调制方式即参数,可以帮助区分环境中的不同通信信号,从而迅速建立与目标无线通信系统间的互联互通。脉内特征分析是信号识别的关键环节,准确分析和判断这些信息能够为我方采取有效的解调方法提供帮助。最常见的脉内频率调制信号类型包括线性调频信号、非线性调频信号、频率编码(FSK)信号等;常见的相位编码信号包括二相位编码(BPSK)信号等。对信号的脉内特征进行分析、提取信号 3 dB 带宽,可以为系统准确判断信号属性提供依据。

穆世强^[1]、巫胜洪^[2]描述了常见的脉内特征提取方法。当前所采用的信号调制识别的方法有时频分析法、谱相关法、小波变换法^[3]和时域自相关法等,这些方法采用不同的变换方法使得信号的特征更加明显,从而达到对信号识别的目的。Delpart 采用了一种基于脉内 IF 特征提取的小波渐进方法^[4];Moraitakis 等人提出了时频分析法,对获取线性、chirp 信号的特征参数进行识别^[5];Gustavo 采用基于时频分析的脉内调制特征解析法^[6];张葛祥等人先后利用信号的小波包特征、相像系数特征、复杂度特征、分形盒维数等特征,结合神经网络对信号进行识别分析^[7];程雨晴等人通过时频图像特征,利用基于信息几何改进的 SVM 对通信信号进行分类识别^[8]。

本文提出一种基于 STFT 的脉内调制识别算法,通过幅度自相关检测算法提高信号脉冲检测的准确率,再利用 STFT 进行进一步频谱分析,降低识别算法计算量,在确保

准确率的同时具有较高的实时性,适合工程化使用。

1 脉内调制识别的基本原理

雷达信号脉内调制类型有常规信号、频率编码信号、相位编码信号、线性调频信号和非线性调频信号。

1.1 频率编码(FSK)信号

FSK 信号的解析形式为:

$$s(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\{j[2\pi f_k t + \varphi_0]\} \quad (1)$$

式中: $A \text{rect}(t/T)$ 表示包络, T 表示脉冲宽度, f_k 表示频率编码函数。

双频编码信号可以看作两个不同频率信号的叠加, 2FSK 信号频域波形如图 1 所示。

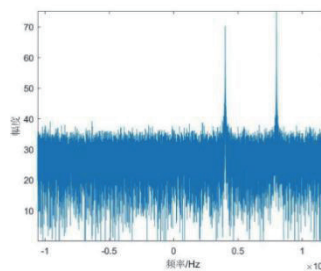


图 1 FSK 信号频域波形

1.2 线性调频(LFM)信号

线性调频信号具有峰值功率小、时宽带宽积大的特点^[9], 具有较高的距离分辨率。LFM 信号的表达式为:

$$s(t) = A \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \theta_0)] \quad (2)$$

式中: f_0 为起始频率, k 为调频的斜率。LFM 信号的瞬时频率为:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_0 t + \pi k t^2) = f_0 + k t \quad (3)$$

1. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009

2. 空基信息感知与融合全国重点实验室 河南洛阳 471009

从上述公式可知, LFM 信号的瞬时频率与调频斜率具有线性关系。

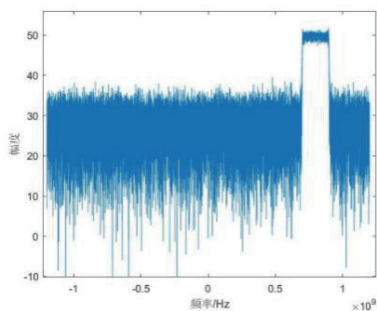


图 2 LFM 信号频域波形

1.3 非线性调频 (NLFM) 信号

在某些情况下, LFM 信号的旁瓣不够理想, 因此设计了非线性调频信号。通过增大和减小频率调制变化率得到 NLFM 波形。NLFM 信号通常用于距离和多普勒频率已知的跟踪系统^[10]。NLFM 频信号可以表示为:

$$s(t) = A \text{rect}(t/T) \exp[j\phi(t)] \quad (4)$$

式中: $A \text{rect}(t/T)$ 为包络, T 为脉宽, $\phi(t)$ 为非线性调频信号的相位函数。

$$\phi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_N t^N, \quad 0 \leq t \leq T \quad (5)$$

式中: N 为信号调频阶数, 当 $N=2$ 时, 即为 LFM 信号, NLFM 信号的频谱即为在 LFM 信号频谱中叠加非线性频率^[11]。

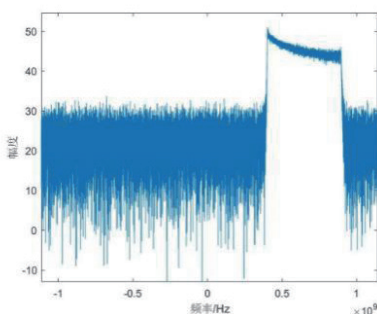


图 3 NLFM 信号频域波形

1.4 相位编码 (PSK) 信号

PSK 信号是脉冲压缩体制雷达经常使用的一种调制方式^[12]。调相信号以 BPSK 信号为例, 具有较大的时宽-带宽积, 是一种常见的低截获概率波形。相位编码矩形脉冲信号的解析形式为:

$$s(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi C_d(k) + \phi_0)] \quad (7)$$

式中: $A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 为包络, $C_d(k)$ 表示相位编码函数, T 为脉宽, f_0 为载频, ϕ_0 为初始相位。

PSK 信号的特点是信号具有不变的载频, 但是相位会随时间进行跳变。

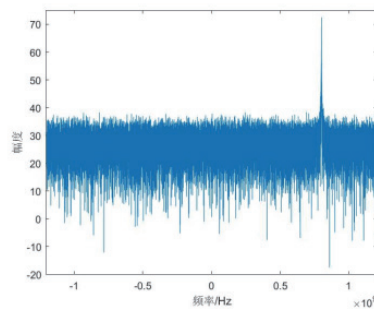


图 4 BPSK 信号频域波形

2 信号脉内调制识别

2.1 总体设计方案

首先对输入的 IQ 数据进行处理, 通过时域累加自相关、自适应门限判决及相位差测频等方法, 求出信号的载频、相位、带宽、脉宽、调制斜率及幅度信息, 并进行信号识别。辐射源参数测量及脉内识别算法设计方案如图 5 所示。

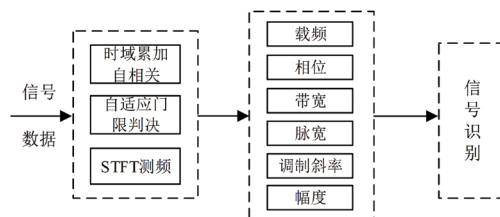


图 5 算法设计总体方案

算法设计包括信号参数测量和信号脉内识别两部分。

(1) 信号参数测量

使用短时傅里叶变换 (STFT) 进行测频, 用幅度累加自相关进行脉冲检测并测量信号脉宽。对线性调频信号和非线性调频信号, 根据测得频率计算带宽。

(2) 信号脉内识别

根据信号的 3 dB 带宽分类调相信号和调频信号。在调相信号, 根据相位累加的跳变判断是简单脉冲还是相位编码信号。在调频信号中, 通过有效带宽比将频率编码信号识别出来, 再先行判断识别线性调频和非线性调频。

2.2 基于幅度自相关法信号脉宽测量

2.2.1 基于幅度自相关的检测方法

首先通过幅度自相关累加法对信号的信噪比进行提高, 以提升系统检测效果。设模拟的输入信号:

$$x_i = a e^{j(2\pi f_i \Delta t + \theta)} = \omega_i \quad (8)$$

式中: f 为信号频率, Δt 为采样时间间隔, a 表示信号幅度, θ 为信号初始相位, ω_i 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。对 x_i 进行 m 点相关运算, 可得:

$$y_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^{k+m-1} x_{i+1} \cdot x_i^* = a^2 e^{j2\pi f \Delta t} + w_j \quad (9)$$

$$w_k' = \frac{1}{m} \left[\sum_{i=k}^{k+m-1} a e^{j\theta} e^{j2\pi f(i+1)\Delta t} w^*(i) + \sum_{i=k}^{k+m-1} w_{i+1} \cdot w_i^* + \sum_{i=k}^{k+m-1} a e^{-j\theta} e^{j2\pi f i \Delta t} w^*(i+1) \right] \quad (10)$$

w_k' 的均值为 0, 方差为 $(2a^2\sigma^2 + \sigma^4)/m$, 当 $m \gg 1$ 时, w_k' 近似服从高斯分布。因此, y_k 的信噪比为:

$$SNR_Y = \frac{ma^4}{(2a^2 + \sigma^2)\sigma^2} = \frac{ma^2}{2a^2 + \sigma^2} \cdot \frac{a^2}{\sigma^2} = \frac{ma^2}{2a^2 + \sigma^2} \cdot SNR_x \quad (11)$$

输出信号的信噪比增益为 $m/(2 + 1/2SNR_x)$ 。

2.2.2 自适应门限选取及脉冲判决

对输入的信号提取幅度、相位等信息后, 可以采用二次检测法得到信号脉宽。没有信号输入时, 采样的数据中只有噪声, 假设噪声为高斯白噪声, 其概率密度函数服从高斯分布, 信号包络的概率密度函数服从瑞利分布, 虚警概率可以写为:

$$P_{fas} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2} dr = e^{-V_T^2/2\sigma^2} \quad (12)$$

式中: V_T 是门限, r 是信号包络幅度, σ^2 为噪声方差。在恒虚警概率检测的条件下, 幅度检测的门限的取值仅由噪声方差决定。信号幅度检测门限按式 (13) 设置。

$$V_T[n] = \mu + \beta \times A_k[n] \quad (13)$$

式中: $A_k[n]$ 是输入信号的幅度, β 表示门限系数, μ 是噪声基底。

为了准确提取信号的脉宽, 采用二次检测法对输入信号进行检测, 设置信号幅度连续 N 次大于门限时为该脉冲上升沿; 信号幅度连续 N 次小于门限时为信号脉冲的下降沿。

该方法可降低因噪声带来的检测虚警, 从而得到准确的脉冲信号。当信号信噪比增大时, 信号的检测概率也会提高。

2.3 基于 STFT 信号频率及带宽测量

首先利用一个随时间滑动的分析窗对非平稳信号进行加窗截断处理, 然后将截断的时间信号进行傅里叶变换, 随着窗函数随时间后移, 得到一系列的频谱函数, 以反映信号的时频特性^[13], 其表达式如下式:

$$S(t, f) = f \int_{-\infty}^{+\infty} [x(\tau)g(\tau - t)]e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (14)$$

式中: $x(\tau)$ 为响应信号时程, t 为待分析时刻, f 为频率, i 为虚数, $g(\tau - t)$ 为窗函数, τ 为窗函数中心坐标所对应的时刻。

使用 STFT 可以直接求解频率和带宽, 即利用 STFT 计算信号频谱, 寻找频谱中大于阈值所对应的频率, 频率最大值与最小值之间的差值即为信号带宽。

利用 STFT 也可求解信号的 3 dB 带宽, 即对 M 个信号片段做 N 点 FFT 变换求得信号频谱; 对得到的频谱进行谱峰搜索, 记录下最大谱峰值及其对应频率, 得到新的 M 点频谱, 计算新的 M 点频谱最大值和大于 $1/\sqrt{2}$ 最大值的点数位置 $d[m]$, 并记录下来; 计算最大点数位置 $d[m]$ 和最小点数位置 $d[1]$ 的差得到信号的 3 dB 带宽大小。

2.4 脉内识别算法

脉内识别算法流程为: 首先, 根据 3 dB 带宽初步判决将信号分成相位编码信号和频率编码信号两个部分, 对相位编码信号, 使用时域累加瞬时自相关的方法判断有无相位跳变, 能够对 BPSK 以及常规信号进行识别; 调频信号类别中, 根据其有效的带宽比就能够识别 FSK 信号, 再采用时频分析, 若频率呈线性分布判断为 LFM 信号, 否则判断为 NLFM 信号。

2.4.1 相位编码信号

根据时域累加瞬时自相关后的相位是否跳变值区分常规信号和相位编码两种信号, 若无跳变峰值为常规信号, 有一种较大跳变峰值为 BPSK 信号。

基于时域累加瞬时自相关的调相信号识别原理如下。将调相信号进行瞬时自相关, 设:

$$\begin{aligned} R(t, \tau) &= x(t)x^*(t - \tau) \\ &= A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j2\pi f_0 t + \pi C_d(k) + \varphi_0] \\ &\quad \times A \operatorname{rect}\left(\frac{t - \tau}{T}\right) \exp[-j[2\pi f_0(t - \tau) + \pi C_d'(k) + \varphi_0]] \\ &= A^2 \operatorname{rect}\left(\frac{t - \tau}{T - \tau}\right) \exp\{j[\varphi(t) - \varphi(t - \tau) + \pi(C_d(k) - C_d'(k))]\} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\varphi(t) = 2\pi f_0 t$ 。由瞬时自相关函数表达式可知, 若 $C_d(k) = 0$, $C_d'(k) = 0$, 则不存在码元跳变。

当信号无码元跳变时, 则为常规信号; 存在码元跳变时, BPSK 信号中 $C_d(k) = 0$ 和 $C_d'(k) = 0$ 取值为 $[0, 1]$, 则跳变值为 $\pm\pi$ 。由此可知, 在有噪声的情况下, 常规信号相位几乎无变化, 调相信号存在相位跳变, 由此可以区分常规信号和 BPSK 信号。对信号瞬时自相关后的相位计算一阶差并求 N 点平均, 假设信号在时间 τ 内存在相位变化, 那么对 τ 多次取不同的值, 将平均相位的一阶差再多次做差并累加。对累加结果寻找峰值, 再对信号相位差求均值, 然后计算相位差峰值与均值的比值。根据信号的频率设定对应的自适应门限值, 若相位差峰值与均值的比值大于门限, 即说明信号有相位跳变, 即识别该信号为相位编码信号; 反之, 若相位差峰值与均值的比值小于门限, 即说明信号无相位跳变, 即识别该信号为简单脉冲信号。

2.4.2 调频信号

根据 NLFM 和 LFM 信号的频率变化率不同, 通过瞬时相位差法对信号进行频率测算, 测出信号频率的均值 f_m , 将 f_m 与信号初始频率 f_0 、信号截止频率 f_1 进行比较, 如果 $(f_0 + f_1)/2 = f_m$, 则为 LFM 信号, 否则为 NLFM 信号。

3 试验结果及分析

本文对常规单频信号、LFM、NLFM、2FSK、BPSK 这五种信号进行识别, 信号信噪比为 20 dB, 每种信号产生

20 个样本，载频设置在 10 ~ 1000 MHz 之间，脉宽设置为 5 ~ 15 μs ，分别进行信号参数测量和识别。
以下为典型信号的参数设置。

表 1 信号参数设置

信号类型	载频 /MHz	带宽 /MHz	脉宽 / μs
简单脉冲	10	—	8
	300	—	11
相位编码	10	—	7
	700	—	5
频率编码	200/500	—	7
	300/900	—	13
线性调频	500	20	6.5
	800	30	10
非线性调频	500	60	5
	1000	100	10

对上述典型信号进行参数测量的结果如表 2。

表 2 信号参数测量结果

信号类型	载频 /MHz	带宽 /MHz	脉宽 / μs
简单脉冲	10.07	—	7.99
	299.73	—	10.99
相位编码	10.03	—	6.99
	700.13	—	4.99
频率编码	200.07 501.68	—	6.99
	299.96 901.37	—	12.96
线性调频	500.56	19.96	6.47
	800.79	30.19	9.94
非线性调频	499.57	59.33	4.98
	999.75	99.26	9.97

从以上测量结果可以看出，本信号调制识别系统对输入的以上典型信号参数测量误差率不超过 1.17%，具有较高的参数测量准确率。

对于信号识别率的仿真结果表明，将以上五种信号，共 100 个样本分别输入系统进行信号类别识别，得到的统计识别率为 96%。本文所设计的信号调制识别系统具有较高的识别概率且计算量较小，适合工程化使用。

4 结论

本文针对辐射源信号脉内调制识别问题，结合信号调制的频率、相位特征，提出一种基于 STFT 的信号测量、识别算法。该算法首先采用幅度自相关法测量信号脉宽，然后通过 STFT 运算测量信号频率及带宽，再利用信号相位差、频率均值、频率变化斜率等信息进行信号调制类型识别。仿真结果表明，该算法具有较高的识别精度和鲁棒性以及较低的运算量，适合工程化实现。

参考文献：

[1] 穆世强. 雷达信号细微特征分析 [J]. 电子对抗, 1991(5):28-37.

[2] 巫胜洪. 雷达脉内特征提取方法研究 [J]. 舰船电子对抗, 2002, 25(1):25-28.

[3]GOYAL B, AGRAWAL S, SOHI B S, et al. Noise reduction in MR brain image via various transform domain schemes[J]. Rasearch journal of pharmacy and technology, 2016,9(7):919-924.

[4]DELPART N.Asymptotic wavelet and Gabor analysis: extraction if instantaneous frequencies[J].IEEE transactions on information theory, 1992,38(2):644-664.

[5]MORAITAKIS I, FARGUES M P.Feature extraction of intrapulse modulated signals using time-frequency analysis[C]//21st Century Military Communications.Piscataway: IEEE, 2000:737-741.

[6]GUSTAVO L R, JESUS G, ALVORA S O. 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] 张葛祥. 雷达辐射源信号智能识别方法研究 [D]. 成都：西南交通大学，2005.

[8] 程雨晴, 郭沐然, 王乐萍. 基于信息几何去噪的改进 SVM 的通信信号识别 [J]. 航空兵器, 2023,30(5):121-126.

[9] 韩立辉, 黄高明, 王鹏. 基于瞬时自相关算法的线性调频雷达信号脉内分析研究 [J]. 舰船电子对抗, 2011,34(3):1-4.

[10] 王晓峰, 董会旭, 田润澜, 等. 雷达信号脉内调制特性分析与处理 [M]. 北京：电子工业出版社, 2022.

[11] 高兴建. 基于 FPGA 的宽带中频数字信道化接收机的工程实现 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2015.

[12] 陈浩. 二相编码信号特征分析 [J]. 舰船电子对抗, 2006, 29(3): 22-24.

[13] 王海军, 聂孝亮, 刘海业, 等. 基于二分法 STFT 的宽带信号检测算法研究 [J]. 航空兵器, 2019,26(3):33-39.

【作者简介】

夏亦佳 (1991—)，女，重庆人，硕士，工程师，研究方向：信号与信息处理。

(收稿日期：2024-03-11)