

文章编号:1000-582X(2006)11-0096-05

基于时频分析的雷达侦察信号处理技术*

郑生华^{1,2},徐大专¹,靳学明²,章仁飞²

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院,江苏南京 210016;2. 中国电子科技集团第38研究所,安徽合肥 230031)

摘要:现代雷达系统越来越多地采用复杂的非平稳信号波形,给电子侦察系统的信号处理提出了越来越高的要求,不仅需要检测出信号包络,还要对雷达信号分选和识别的关键脉内特征参数进行分析提取。为此,将广泛应用于分析和处理非平稳信号的时频分析技术引入雷达侦察信号处理中,介绍了短时 Fourier 变换、小波变换和 WVD 等线性和非线性时频分析方法,并应用这些方法对雷达常用的线性调频信号进行了时频分析和计算机仿真,仿真结果证实了方法的有效性。

关键词:时频表示;雷达侦察;STFT;WVD;小波变换

中图分类号:TN971.1

文献标识码:A

现代雷达和通信广泛采用抗干扰性高和隐蔽性好的扩谱信号波形^[1-2],这些波形具有低峰值功率、大时宽和大带宽的特点,通过信号处理获得高扩谱增益,实现接收信号在低信噪比下的正确检测。这些淹没在强背景噪声中,具有复杂脉内调制特性和低截获概率(LPI)或低检测概率(LPD)特性的信号,难以用常规的侦察接收机进行截获和识别。

为了截获和识别经过特意设计的时变非平稳 LPI 或 LPD 波形^[2-3],必须采用先进的信号处理技术。时频分析是处理非平稳信号的有效工具,它将一维时间信号映射到二维时频平面上,揭示了信号频率分量随时间变化的关系。它对电子战侦察信号分析有着重要价值^[4-5]。

文章首先介绍了雷达侦察信号处理的组成和其在现代电磁环境中所面临的挑战,然后分析了几种时频分析方法的原理和特性^[6-7],并以雷达常用的线性调频(LFM)信号为例进行了计算机仿真,给出了仿真结果,最后对进一步的应用研究进行了展望。

1 雷达侦察信号处理

雷达侦察系统信号处理的目的是,在未知雷达辐射源先验信息的情况下,通过对截获的信号进行分析和参数估计获得分选和识别辐射源所需的信息,从而

进行威胁判断和干扰决策。现代雷达广泛采用扩谱技术产生发射信号波形,在接收端采用脉冲压缩技术提高处理增益和雷达的距离分辨率,由于扩谱信号带宽很宽,峰值功率较小,常规电子侦察设备难以检测这种信号,并且信号脉内调制规律复杂,识别困难。为了满足对这类信号侦察识别的需要,必须采用数字化接收机并应用现代信号处理技术^[4,7]。

时频分析是现代信号处理的重要内容,其对雷达信号侦察的重要意义包括如下几个方面^[5]:1) 提供目标信号频谱随时间变化的时频函数,为获取目标信号的发射机性能积累数据;2) 提取短信号的瞬时频谱,为被侦察目标信号的调制识别与分类提供频谱信息;3) 检测无线电数字已调目标信号的调制时间信息,为反演目标信号的原始信息提供定时基准;4) 用于电子干扰样式的最佳实时跟踪与控制。

通常,雷达侦察系统由侦察天线、侦察接收机、信号预处理、信号主处理和显示控制等部分组成,如图1所示。

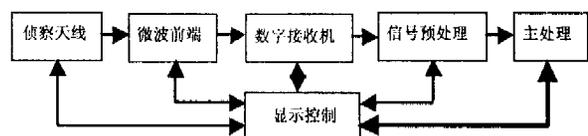


图1 雷达侦察系统简化组成框图

* 收稿日期:2006-05-23

基金项目:航空科学基金资助(03F52042)

作者简介:郑生华(1968-),男,安徽安庆人,南京航空航天大学高工,主要从事雷达电子对抗、现代信号处理的研究。

2 常用时频分析方法

2.1 短时 Fourier 变换

Fourier 变换在传统的信号分析中得到了广泛的应用,但它是一种全局变换,在整个时域或频域独立地处理信号,不能告诉我们频率分量如何随时间变化,即得不到关于时间和频率的局部化信息.为了得到信号随时间变化的局部化信息,最简单的方法是对信号进行加窗处理,这正是短时 Fourier 变换(即 STFT)的思想.

STFT 对被分析信号进行时间加窗分段,并假定非平稳信号在分析窗函数 $w(t)$ 的一个短的时间间隔内是平稳的,再对分段的信号进行傅立叶分析,从而计算出各个不同时刻的功率谱.

连续时间信号 $x(t)$ 的 STFT 定义为

$$\text{STFT}_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w * (\tau - t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (1)$$

其中, $w(t)$ 是窗函数. 由于在时刻 t 的 STFT 是信号 $x(\tau)$ 被窗函数 $w * (\tau - t)$ 加窗后所得的频谱,所以位于以 t 为中心的窗内的信号特性,都会由时间 t 的 STFT 反映出. 显然,STFT 的高时间分辨率要求短窗宽 $w(t)$. 另一方面,在频率 ω 处的 STFT 基本上是 $x(t)$ 通过带通滤波器 $W(\omega' - \omega)$ 的结果,所以 STFT 的高频率分辨率要求窄带滤波器,也就是要求长窗宽 $w(t)$.

若令 Δt 与 $\Delta\omega$ 分别表示 STFT 的时间分辨率与频率分辨率,则由不确定原理^[6]有:

$$\Delta t \Delta\omega \geq \frac{1}{2}. \quad (2)$$

这样,不可能存在既是短时宽又是窄带宽的窗函数. 在实际应用中,要么牺牲时间分辨率以换取高频率分辨率,要么牺牲频率分辨率以换取高时间分辨率.

2.2 小波

小波分析在时域和频域同时具有局部化的特性,它对不同频率成分在时域和频域上的分辨率是可变的,频率越高时间分辨率越高,频率越低频率分辨率越高. 小波分析的这一特性有利于非平稳信号的分析,小波变换为信号的细微特征分析提供了一个新的有力工具. WT 与 STFT 一样是线性变换,因此不产生交叉项,这与很多基于二次函数分析信号的方法不同,如 Wigner - Ville 分布 (WVD) 和 Choi - Williams 分布 (CWD) 等在分析多分量信号时,都产生交叉项干扰.

多分辨分析、框架和滤波器组三大理论构成小波

理论的典型代表. 常用的描述 WT 滤波器组概念可解释为位于不同的中心频率处的一组带通滤波器组对信号进行滤波处理. 在 STFT 中带通滤波器的带宽与中心频率无关. WT 的带宽正比于 f , 滤波器的品质因素 Q ($Q = f/B$) 与 f 无关. WT 可视为一种恒 Q 分析.

信号 $x(t)$ 的连续小波变换 (CWT) 定义为:

$$\text{CWT}_x(a, b; \psi) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (3)$$

式中, a 是尺度因子,用于改变分析窗的宽度,实现恒 Q 分析. ψ 为小波基函数.

小波变换用于信号重构时,需要采用小波变换的离散化形式,离散化的对象为连续的尺度参数 a 和平移参数 b , 而不是时间变量 t . 离散小波 $\psi_{j,k}(s)$ 和离散小波变换 $\text{DWT}_x(j, k)$ 可表示为:

$$\psi_{j,k}(s) = a_0 \psi(a_0 s - kt_0), \quad (4)$$

$$\text{DWT}_x(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s) \psi_{j,k}^*(s) ds. \quad (5)$$

信号的重构计算公式可表示为:

$$x(s) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}(s) \text{DWT}_x(j, k). \quad (6)$$

小波分解在信号的奇异性检测中具有广泛的应用,非常适合对雷达调制波形的脉内特征分析.

2.3 Wigner - Ville 分布

Wigner 分布^[6]由维格纳首先提出用于量子力学领域. 威利 (ville) 对它重新做了介绍,所以维格纳分布也常称为 Wigner - Ville 分布 (WVD), 在信号分析和处理中,它已成为非常有用的工具. 维格纳分布和当时已有的一些时频表示(如短时傅氏变换等)相比,虽有许多优点,但将它用于分析多频率成分信号时,由于它为二次型变换,不可避免地出现交叉项干扰,从而阻碍它进一步应用,为了抑制交叉项干扰,提出了许多改进形式,如指数分布、广义指数分布等很多新的时频分布. L. Cohen 将它们统一为双线性时频分布理论^[6], 在这种统一形式的时频分布中,选用不同的核函数,可以得到不同的时频分布,只要正确设计核函数,就能获得所期望性质的时频分析. 各种各样分布形式的提出既是为了减小交叉项影响,又是为了在软件实现上简单高效,这主要表现在实时实现上,一方面是用 FFT 实现,另一方面是用快速哈特莱变换实现.

在电子侦察中, Wigner 分布被认为是 LPI 波形参数抽取的特别有效的时频分析技术之一,可以可靠抽取波形参数.

信号 $x(t)$ 的 Wigner 分布定义为:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)\exp(-j\omega\tau) d\tau. \tag{7}$$

其离散形式可表示为:

$$W_x(l, \omega) = 2 \sum_{-\infty}^{\infty} x(l+n)x^*(l-n)\exp(-j2\omega n). \tag{8}$$

伪 Wigner 分布或加窗 Wigner 分布为:

$$W_x(l, \omega) = 2 \sum_{-\infty}^{\infty} x(l+n)w(l-n)w(n)\exp(-j2\omega n), \tag{9}$$

$w(n)$ 是关于 n 为中心的滑动窗函数.

平滑伪 Wigner 分布 (SPWVD)^[7]:

$$SPW_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(\tau)x(t-u+\frac{\tau}{2})x^*(t-u-\frac{\tau}{2})\exp(-j\omega\tau) du d\tau, \tag{10}$$

$g(u)$ 和 $h(\tau)$ 是关于 2 个滑动窗函数.

3 计算机仿真

LFM 信号广泛应用于现代雷达中,是一种具有良好的脉冲压缩性能及分辨能力的脉冲压缩信号,其表示式为:

$$f(t) = A(t)\exp[j\phi(t)] = \frac{1}{\sqrt{T}}\text{rect}(\frac{t}{T})\exp[j2\pi f_c t + \pi K t^2]. \tag{11}$$

式中, f_c 为信号中心频率, T 为信号时宽, K 为频率变化率, 为矩形函数.

计算机仿真的条件和参数主要有:单分量线性调频信号带宽 24 MHz, 时宽 6 μ s, 叠加零均值高斯白噪声, 信噪比 20 dB. $f(t)$ 的时域波形和频谱如图 2 所示; 两分量线性调频信号, 调频斜率分别为 4 MHz/ μ s 和 -4 MHz/ μ s, 信号带宽均为 24 MHz, 时宽均为 6 μ s, 叠加零均值高斯白噪声, 信噪比 20 dB.

图 3(a) 和 (b) 分别为单分量和两分量线性调频信号的短时傅立叶变换频谱图的等高线图, 从图中可明显看出信号的频率随时间作线性变化的规律.

图 4(a) 和 (b) 分别为单分量和两分量线性调频信号 WVD 时频图的等高线图, 从图 4 可知, WVD 具有更好的时频聚集性, 但多分量信号的 WVD 存在严重的交叉项干扰. 图 5(a) 和 (b) 分别为两分量线性调频信号的伪 Wigner - Ville 分布 (PWVD) 和平滑伪 Wigner - Ville 分布 (SPWVD) 的等高线图, 从图 5 可知, PWVD 分布的交叉项干扰明显比 WVD 的小, 而 SP-

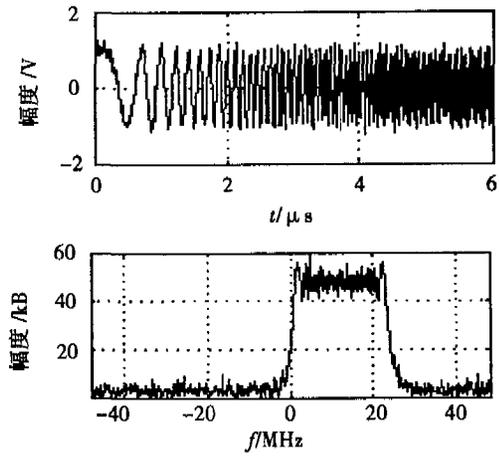
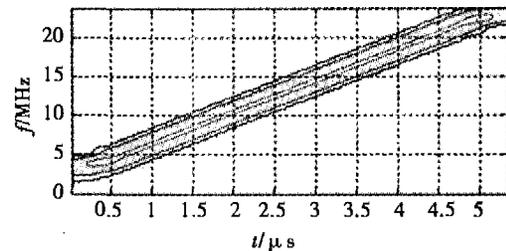
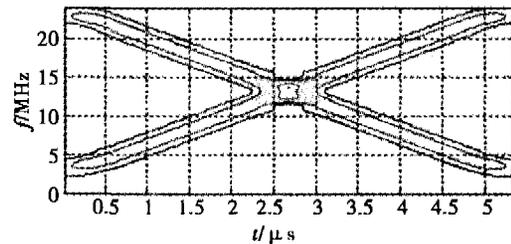


图 2 单分量线性调频信号

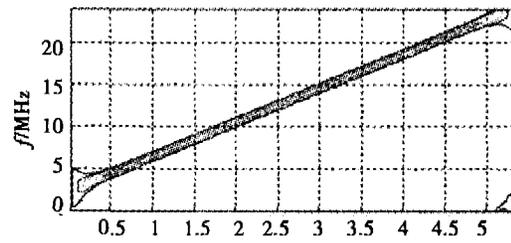


(a) 单分量线性调频信号

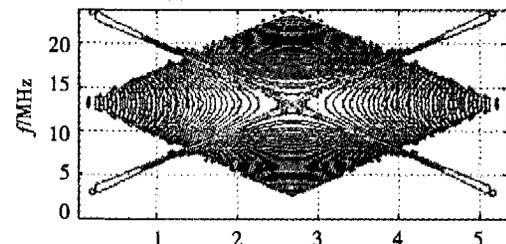


(b) 两分量线性调频信号

图 3 STFT 等高线图



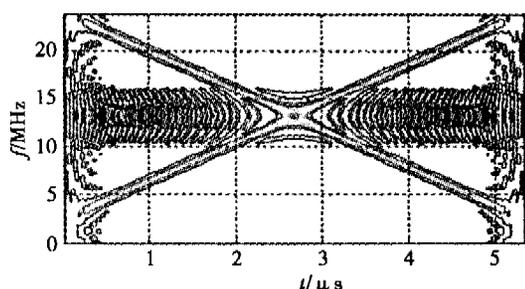
(a) 单分量线性调频信号



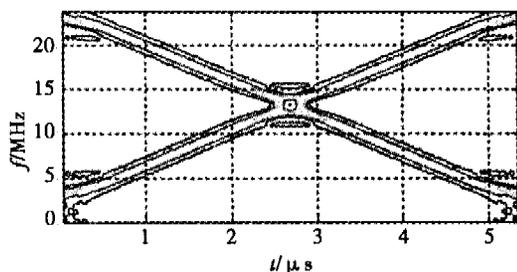
(b) 两分量线性调频信号

图 4 WVD 等高线图

WVD 的交叉项干扰又明显比 PWVD 的交叉项干扰



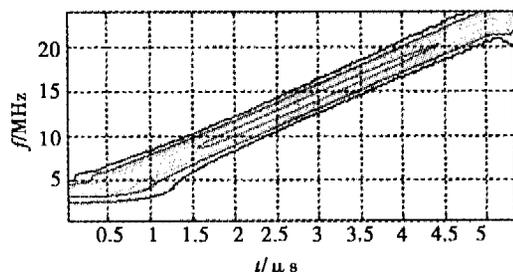
(a) 伪 Wigner-Ville 分布



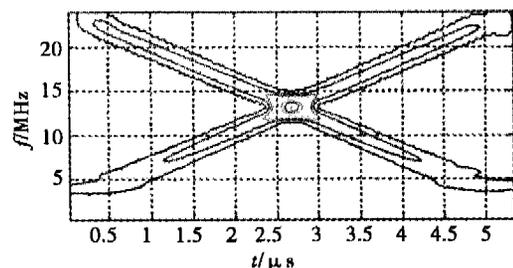
(b) 平滑伪 Wigner-Ville 分布

图5 改进的 WVD 等高线图

小. 图6(a)和(b)分别为单分量和两分量线性调频信号 CWT 尺度图的等高线图,从图可知,CWT 不存在交叉项干扰.



(a) 单分量线性调频信号



(b) 两分量线性调频信号

图6 CWT 等高线图

通过以上仿真分析可知,STFT 由于具有固定长度的窗函数,因而无法同时兼顾时间和频率分辨率,其时频聚集性较差. Wigner - Ville 分布对单分量 LFM 信号具有比其它时频分布更好的时频聚集性,可以准确地直观地给出信号的时频关系图,得出信号的频率分量和信号的准确的调制参数,从而 Wigner - Ville 分布

能实现对线性调频信号的时频检测,达到提取雷达信号脉内细微特征提取的目的. 另外, Wigner - Ville 分布是二次时频变换,不可避免存在交叉项干扰,伪 Wigner - Ville 分布和平滑伪 Wigner - Ville 分布可以实现部分抑制交叉项,且平滑伪 Wigner - Ville 分布抑制交叉项的能力更强. CWT 是线性变换,其尺度图没有交叉项干扰,可在时间与频率上同时具有良好的局部化性,还可聚焦到对象的任意细节,对相位变化非常敏感,适用于各类调频调相信号. 但小波变换的计算速度受计算精度,频率搜索范围,尺度精度和小波函数形式等多方面的影响,需要比较多的人为干预才能达到良好的效果.

4 结 语

现代军用通信、雷达和导航系统越来越复杂,广泛采用复杂的抗干扰措施和 LPI 信号波形,使系统具有优良的鲁棒性和隐蔽性. 传统的基于能量检测的电子战设备的性能限制越来越明显,进行信号特征抽取的技术难度越来越大,无法满足现代电子战装备的要求. 时频分析技术的进展,为分析和处理复杂信号提供了理论依据和技术支撑,必将在现代电子战设备中得到广泛应用.

参考文献:

- [1] JAMES P, STEPHENS. Advances in Signal Processing Technology for Electronic warfare [J]. IEEE AES Magazine, 1996, (11): 31 - 38.
- [2] STOVE A G, HUME A L, BAKER C J. Low Probability of Intercept Radar Strategies [J]. IEE Proc. - Radar Sonar Navig, 2004, 151(5): 249 - 260.
- [3] JOHNSTON J A. Wigner Distribution and FM Radar Signal Design [J]. IEE Proc., 1989, 136(2): 81 - 87.
- [4] CHRISTOPHE D L, CLAUDE JAUFFRET. Estimation and Classification of FM Signals Using Time Frequency Transforms [J]. IEEE TRANSACTIONS ON AES, 2005, 41(2): 421 - 437.
- [5] 罗利春. 无线电侦察信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] COHEN L. Time - Frequency Distribution: A Review [J]. Proc IEEE, 1989, 77(7): 941 - 981
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析和处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Signal Processing Techniques for Radar Reconnaissance System Based on Time-frequency Analysis

ZHENG Sheng-hua^{1,2}, XU Da-zhuan¹, JIN Xue-ming², ZHANG Ren-fei²

(1. College of Information Science and Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. The 38th Institute of CETC, Hefei 230031, China)

Abstract: The complex non-stationary signals are most often used in modern radar and communication systems. It must perform the tasks of envelope detection and intra-pulse feature analysis for radar pulse classification and identification. Time-frequency analysis is an effective tool for modern signal processing, and often applied to analyze and process non-stationary signals. Several methods of time-frequency analysis are presented, and their applications in the radar signal reconnaissance are also discussed and simulated. Simulation results show the effectiveness of these methods.

Key words: time-frequency analysis; radar reconnaissance; STFT; WVD; wavelet transform

(编辑 姚 飞)

(上接第 80 页)

Work-hardening Mechanism of Non-magnetic High Manganese ZG25Mn18Cr4 Castings

ZHANG Ding-fei¹, PENG Jian¹, YANG Jing², ZHANG Li¹, TANG Chang-fa¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Heshan Guangya Industrial Company Limited, Guangzhou Iron and Steel Enterprises Group, Heshan 529724, China)

Abstract: The important character of non-magnetic high manganese ZG25Mn18Cr4 alloy is rapid work-hardening under external stress. With X-ray diffraction and TEM analysis, it is proved that the microstructures of both undeformed and deformed matrixes are austenite and carbide with some striation structure in the matrixes, the amount of stripes in the deformed matrix is obviously more than that in the undeformed matrix. Electronic diffraction analysis confirmed that the stripes in coarse austenite grains are high density lamination fault sheets. A great deal of lamination fault sheets produced by plastic deformation divides up austenite matrix, shortens the free distance of dislocation movement and results in the rapid work-hardening of ZG25Mn18Cr4 alloy.

Key words: ZG25Mn18Cr4; work-hardening; lamination fault sheet

(编辑 李胜春)