

近似小波变换的一种空中多目标分选方法

张善文, 甄蜀春, 赵兴录

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:通过对由空中多目标间距引起的目标间多普勒频率的差异分析,基于 Morlet 小波变换,提出了一种空中多目标分选识别的新方法——小波变换谱分析法。此方法选用不同中心频率的 Morlet 小波,对信号进行小波变换,求取信号的功率谱,获得雷达目标的一维距离像,从而分选识别目标。

关键词:小波变换;功率谱;目标分选

中图分类号:TN015 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)05-0061-04

利用低分辨雷达实现空中目标识别的方法,目前较为可行的有两种:一种是将雷达目标回波看作是目标反射波与雷达天线方向图卷积的结果。目标在方位上的低分辨主要是由于较宽的天线方向图所致。因此,如果精确知道雷达的天线方向图,则通过对目标回波进行反卷积处理^[1~2],即可改善目标方位分辨率,从而在方位上实现多目标分辨。然而,要精确获得雷达天线实时方向图是很困难的。此方法在应用上受到限制。另一种方法是在多谱勒域,利用空中目标间距引起的多普勒频率差异实现多目标分辨。但是,由于目标回波的多普勒频率差异不大,所以为了实现较高的多普勒频率分辨,需要较长的相关处理时间。然而,较长的目标观察时间,将引入目标回波潜在的非平稳性。这样基于传统的傅立叶变换的多普勒分析法的性能将会失效。近年来兴起的小波变换,是分析时变、非平稳信号的有利工具,它不仅能反映信号的频率分量,而且还可以反映这些频率分量随时间演变的规律。所以,小波变换被广泛应用于信号处理、图象处理、语音处理等领域^[3~6]。本文根据 Morlet 小波的性质提出一种空中目标分选识别法。

1 Morlet 近似小波变换

Morlet 小波表示为
$$\Psi(t, \omega_0) = \exp\left(-\frac{ut^2}{2}\right) \cdot \exp(j\omega_0 \cdot t) \quad (1)$$

其傅立叶变换为
$$F(\omega, \omega_0) = \exp[-(\omega - \omega_0)^2/2u] \quad (2)$$

其中 u 为尺度,频率中心在 $\omega = \omega_0$ 。Morlet 小波的谱线是一个“钟形”曲线,而且两边下降很快。因此, Morlet 小波可以看成是一个带通滤波器。选择不同 u 和 ω_0 ,可以得到不同频带的 Morlet 小波,即 Morlet 小波的频带是可变的。

对于任意信号 $s(t)$,它的 Morlet 小波变换定义为

$$ws(\tau) = \Psi(t) \otimes s^*(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) s^*(t - \tau) dt \quad (3)$$

从式(3)可以看出, $ws(\tau)$ 可以看作信号 $s(t)$ 通过传递函数为 $F(\omega, \omega_0)$ 的滤波器的输出结果。

当分析信号为复杂信号时,因为任何复杂信号都可以表示成不同频率的正弦信号的线性组合,不妨设分析信号为

$$f(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + A_3 \sin(\omega_3 t) \quad (4)$$

收稿日期:2000-05-01

基金项目:国防科技预研基金资助项目(99J1.4.JB2004)

作者简介:张善文(1965-),男,陕西同良人,讲师,博士生,主要从事雷达目标识别及分选研究。

它对应的复包络为

$$F^*(t) = A_1 \exp(j\omega_1 t) + A_2 \exp(j\omega_2 t) + A_3 \exp(j\omega_3 t) \quad (5)$$

$F(t)$ 的小波变换为

$$\begin{aligned} Wf(\tau, \omega_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t, \omega_0) \cdot F^*(t - \tau) \cdot dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{ut^2}{2}\right) \exp(j\omega_0 t) \cdot \{A_1 \exp[-j\omega_1(t - \tau)] + A_2 \exp[-j\omega_2(t - \tau)] + \\ &A_3 \exp[-j\omega_3(t - \tau)]\} dt = \\ &A_1 \exp(j\omega_1 \tau) \cdot \exp[-(\omega_1 - \omega_0)^2/2u] + A_2 \exp(j\omega_2 \tau) \cdot \exp[-(\omega_2 - \omega_0)^2/2u] + \\ &A_3 \exp(j\omega_3 \tau) \cdot \exp[-(\omega_3 - \omega_0)^2/2u] \end{aligned} \quad (6)$$

因为,当 $\omega_i = \omega_0$ 时, $|A_i \exp(j\omega_i \tau) \exp[-(\omega_i - \omega_0)^2/2u]| = A_i \cdot \exp[-(\omega_i - \omega_0)^2/2u] = A_i (i=1, 2, 3)$ 。所以,若把 ω_0 看作变量,则 $Wf(\tau, \omega_0)$ 的模值在 $\omega_0 = \omega_i$ 处局部最大。在三维图中, $Wf(\tau, \omega_0)$ 的模值在 $\omega_0 = \omega_i$ 处出现一条脊,这表明在此频率上能量最集中,此频率为信号的频率成分。

2 空中运动目标的多普勒性质

设雷达工作波长 λ ,目标运动速度为 v ,目标运动方向与雷达视线的夹角为 φ ,则雷达目标回波的多普勒频率为 $f_d = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos(\varphi)$ 。对于空中任意两个运动目标,速度分别为 v_1 和 v_2 ,运动方向与雷达视线的夹角分别为 φ_1 和 φ_2 ,则雷达目标回波的多普勒频率差为

$$\Delta f = f_{d1} - f_{d2} = \frac{2v_1}{\lambda} \cos(\varphi_1) - \frac{2v_2}{\lambda} \cos(\varphi_2) \quad (7a)$$

φ_1 与 φ_2 的差别是由两个目标的间距 d 和目标距雷达的距离 R 所决定的。当运动速度相同,都为 v 时,

$$\Delta f = f_{d1} - f_{d2} = \frac{2v}{\lambda} [\cos(\varphi_1) - \cos(\varphi_2)] = -\frac{4v}{\lambda} \left(\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \cdot \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \quad (7b)$$

因为 $d \ll R$,所以 $\sin[(\varphi_1 - \varphi_2)/2] \approx (\varphi_1 - \varphi_2)/2$,则

$$\Delta f = -\frac{4v}{\lambda} \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cdot \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = -\frac{2v}{\lambda} \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (8)$$

由于飞行目标的高度机动性,以及即使恒速飞行目标,不同时刻与雷达视线的夹角是变化的,致使每个目标回波的多普勒频率呈现时变特性,其多普勒频率谱发生扩展。传统的傅立叶分析已不能分辨目标架次。

3 空中多运动目标的分选识别方法

雷达信号的脉冲内调制信息分析,对从复杂回波中进行目标分类识别是非常重要的。脉冲内调制信息往往是时变的,是时间函数。所以,只从时域或只从频域分析很难得到信号的调制信息。而小波分析是一种时频分析手段,能够从复杂回波中提取信号的调制信息。信号的小波分析就是对信号进行带通滤波,即将不同频带内的信号成分“放大”,将信号与噪声分开,使信号的那些不明显特征在不同分辨率的子空间上显露出来。

对于任意信号 $s(t)$,功率谱定义为 $P_s(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} p(f, \Delta f) / \Delta f$ 。其中 Δf 为分析频率间隔。基于Morlet小波变换的信号分析,信号 $s(t)$ 通过滤波器 $F(\omega, \omega_0)$ 的输出瞬时功率定义为 $|ws(\tau, \omega_0)|^2$,对应中心频率 ω_0 ,即对应着一定频率点的一定宽度。此频带输出的平均功率定义为 $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |ws(n \cdot T, \omega_0)|^2$, T 为采样间隔, N 为采样点数。对应此频率的信号功率谱为:

$$P_s(\omega_0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |ws(n \cdot T, \omega_0)|^2 / \Delta f \quad (9)$$

这里 $\Delta f = \frac{1}{N \cdot T \cdot \omega_0}$ 。对于不同的 ω_0 ,带通滤波器 $F(\omega, \omega_0)$ 的中心频率不同,随着 ω_0 的增加,带通滤波器的

中心频率逐渐增大。 $P_s(\omega_0)$ 相当于在不同的频段对信号 $s(t)$ 的功率估计。由上面分析得知,对于单频信号,当小波的中心频率 ω_0 等于信号的频率时,得到信号的功率谱最大。对于多频信号,功率谱 $P_s(\omega_0)$ 在信号的各个频率分量处取得极大值。因此信号的功率谱 $P_s(\omega_0)$ 可以看作是以 ω_0 为变量的函数,是信号固有特征的度量函数。空中不同目标在雷达回波中将产生不同的多普勒频率分量。若对回波信号进行小波变换,取 Morlet 小波的中心频率为 $f_0+i\Delta f, i=1,2,3,\dots, f_0$ 为信号的最低频率, Δf 为频率间隔。估计小波变换的功率谱,从而获得雷达目标的一维距离像。当 Δf 越小,谱估计越精细,目标的距离像越准确。

4 仿真

设雷达波长为 $\lambda=0.03\text{ m}$, 脉冲宽度为 $2\ \mu\text{s}$, 脉冲重复频率为 400 Hz , 采样频率为 $4\ 000\text{ Hz}$, 采样点为 $1\ 024$ 。现有同类型两架飞机匀速直线飞行, 速度为 $v=300\text{ m/s}$, 目标间的距离为 $d=100\text{ m}$, 目标与雷达的距离为 $R=100\text{ km}$, 目标飞行方向与雷达视线的平均夹角 $\frac{\varphi_1+\varphi_2}{2}=60^\circ$ 。

则回波信号的多普勒模型可假设为

$$s(t) = A_1 \exp\left[j2\pi \frac{2v}{\lambda} \cos(\varphi_1) \cdot t + \varphi_1\right] + A_2 \exp\left[j2\pi \frac{2v}{\lambda} \cos(\varphi_2) \cdot t + \varphi_2\right] + w(t) \quad (10)$$

A_1, A_2 为回波幅度(是时间的慢变化函数, 本文认为是常数), φ_1, φ_2 为目标飞行方向与雷达视线的夹角, φ_1, φ_2 为初相, $w(t)$ 为高斯白噪声, 信噪比为 20 dB 。

图 1 为两架飞机的雷达回波时域波形及频域波形。从图 1(b) 看到, 采用 FFT 没有在频域将两目标分开, 这是因为回波信号的多普勒频率差很小, 而 Fourier 变换对信号的分辨率较低。

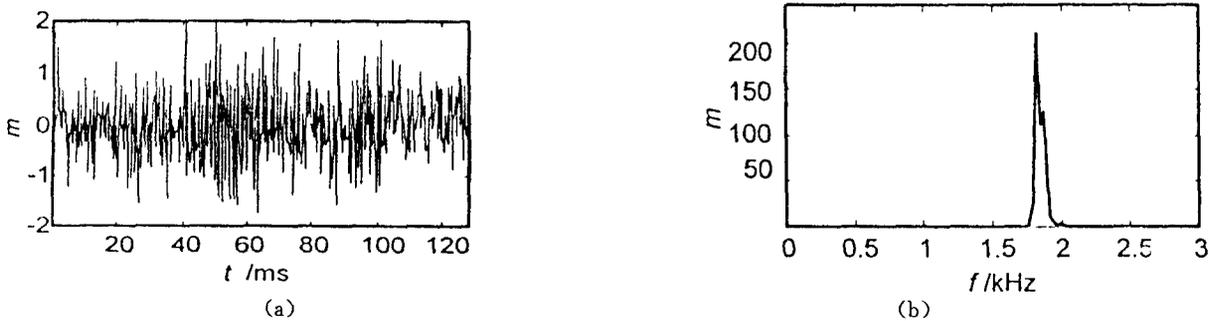


图 1 两架飞机的雷达回波时域波形及频域波形

采用 Morlet 小波对信号 $s(t)$ 进行小波变换的功率谱估计。取 Morlet 小波的中心频率为 $1\ 000+i\cdot 50\text{ Hz}, i=0,1,2,3,\dots,400$; 尺度 $u=100$ 。图 2 为其小波变换的三维时频图。对于每个 i , 估计信号的功率谱, 综合后可获得目标的距离像, 见图 3, 横坐标表示频率, 纵坐标表示小波变换的功率谱。从图 3 可以看到从功率谱上已将两目标清晰地区分开了。

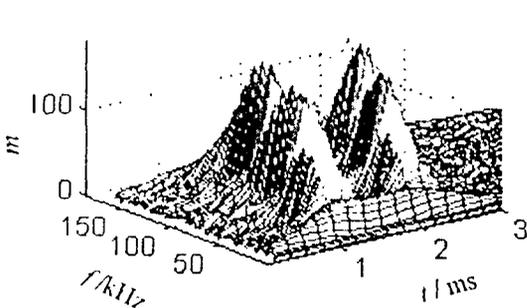


图 2 回波信号小波变换的三维时频图

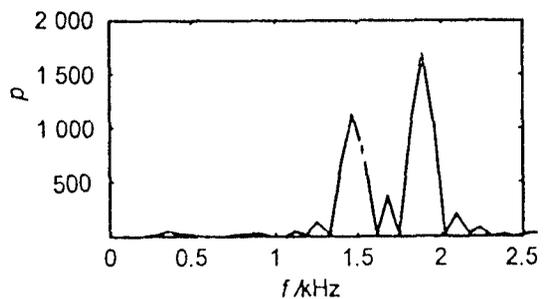


图 3 回波信号小波变换的功率谱

此例假设目标为同类型, 而且匀速直线飞行, 速度也相同。当目标为不同类型, 速度不同时, 它们引起的多普勒频率差在一般情况下将更大, 更利于小波变换功率谱的目标分选。

5 结论

本文在 Morlet 小波的基础上,利用小波变换的信号功率谱估计,可获得目标的高分辨距离像,从而进行目标分选。此方法能够在低分辨雷达中对空中运动目标进行分选识别,比 Fourier 变换精度高,抗噪性能强。

参考文献:

- [1] Mallat S,Zhong S F. Characterization of Signal from Multiscal Edges[J]. IEEE Trans PAMI,1992,14(7):710-732.
- [2] Mallat S,Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Trans IT,1992,38(2):617-643.
- [3] 梁风岗. FIR 数字滤波器设计的小波逼近方法[J]. 上海交通大学,1998,32(7):43-48.
- [4] 王 君. 一种利用子波变换多尺度分析特性的信号除噪技术[J]. 信号处理,1996,12(2):105-109.
- [5] Mallat S. A theory for multi-resolution decomposition, the wavelet representation[J]. IEEE Trans Pattern Anal machine Intell. 1989,11(7):674-693.
- [6] 丁 宏. 采用小波变换对短数据信号的谱估计方法[J]. 电子学报,1997,25(1):11-14.

Method of Classification of Air-target Based on Wavelet Transform

ZHANG Shan-wen, ZHEN Shu-chun, ZHAO Xing-lu
(Missile Institute, AFEU., Sanyuan 713800, China)

Abstract: The paper presents a method of air-target classification based on the Morlet wavelet and the difference of Doppler-frequency resulting from the different targets in the air. The algorithm uses the Morlet wavelets of different center frequency, computing wavelet transform, estimating the power spectrum of the signal. The 1-D images of the radar target were obtained.

Key words: wavelet transform; power spectrum; target classification