

基于小波组合滤波器的雷达目标分选方法

甄蜀春, 张善文, 赵兴录

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:基于 Morlet 小波组合滤波器的性质,提出了一种雷达目标分选方法。设计了 Morlet 小波组合滤波器,将雷达信号与组合滤波器进行卷积运算,再进行 FFT 运算,实现雷达信号的频率分辨。此方法简单、方便、实用性强,和 FFT 相比,具有较强的频率分辨能力,对瞬变雷达信号有较强的分辨能力。

关键词:Morlet 小波;成分波;频率分辨

中图分类号:TN015 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)-34-36

雷达侦察系统的使命在于确定敌方雷达的存在与否,并测定其各种特征参数。在雷达的各种特征参数中,频率参数是最重要的参数之一,它反映了雷达的功能和用途。雷达的频率捷变范围和谱宽是度量雷达抗干扰能力的重要指标。在现代电磁环境下,为了有效干扰,必须首先对信号进行分选和威胁识别,雷达的频率信息是信号分选和威胁识别的重要参数之一。本文基于 Morlet 小波的性质,利用多个 Morlet 小波组成的组合滤波器,对多频信号进行分选和识别。

1 Morlet 小波组合滤波器性质

根据小波理论^[1-2],小波变换是一种线性变换,则多个小波的线性组合仍然是小波。而单个 Morlet 小波可以看成是一个中心频率为 ω_0 的带通滤波器,则多个 Morlet 小波的线性组合也可以看成是一个带通组合滤波器^[3]。由 $M+1$ 个 Morlet 小波组成的组合滤波器为

$$\begin{aligned} \Psi_m(t) = \exp\left(-\frac{ut^2}{2}\right) \cdot \sum_{i=0}^M \exp(j2\pi \cdot f_i) = \\ \exp\left(-\frac{ut^2}{2}\right) \cdot \sum_{i=0}^M \exp[j2\pi(f_0 + i \cdot \Delta f)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 f_0 称为基频, Δf 为频率间隔, M 为组合小波的个数。则组合滤波器的频率上限为 f_0 , 下限为 $f_0 + M \cdot \Delta f$, 即频宽为 $[f_0, f_M]$, 它的频谱实际上就是各个小波频谱的叠加。当 Δf 选择适当时,可得到平顶的叠加谱。对于任一信号 $s(t) = A \exp(j2\pi f_s \cdot t)$, 定义 $w(f, \tau)$ 为信号 $s(t)$ 与组合滤波器 $\Psi_m(t)$ 的卷积, 即

$$\begin{aligned} w(f_s, \tau) = \Psi_m(t) \otimes s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_m(t) s^*(t - \tau) dt = \\ A \exp(j2\pi f_s \tau) \cdot \sum_{i=0}^M \exp\{-[2\pi(f_0 + i \cdot \Delta f - f_s)]^2 / 2u\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 \otimes 表示卷积, $*$ 表示共轭。则频谱为

$$|w(f_s, \tau)| = A \left| \sum_{i=0}^M \exp\{-[2\pi(f_0 + i \cdot \Delta f - f_s)]^2 / 2u\} \right| \quad (3)$$

由(3)式可以看出,对于某个 i , 当 $f_s = f_0 + i \cdot \Delta f$ 时, $|w(f_s, \tau)|$ 取得局部极大值。若把 $|w(f_s, \tau)|$ 看作以 f 为

收稿日期:2000-09-04

基金项目:国防科技预研基金项目(99J1-4-1JB 2004)

作者简介:甄蜀春(1940-),男,四川盐亭人,教授,博士生导师,主要从事微波智能检测。

变量的函数,则 $|w(f_s, \tau)|$ 在 $f_s = f_0 + i \cdot \Delta f$ 处取得局部极大值。这表明在此频率上能量最集中。

2 目标分选方法

利用 FFT 方法可以得到信号的频谱,但是频率分辨率受到限制,而小波变换在频域具有比 FFT 高的分辨能力。如果要得到某频段真实的频谱,单个小波就难以办到。因为组合小波的频宽被展宽,所以将信号与组合小波进行卷积,就能实现带通滤波特性,由此得到信号在 $[f_0, f_M]$ 中的频率成分,实现目标分选。具体方法如下:

1) 对雷达信号 $s(t)$ 进行 FFT, 估计其频率范围, 设为 $[f_0, f_M]$ 。

2) 将 $[f_0, f_M]$ 划分成 M 等份, 设 $\Delta f = \frac{f_M - f_0}{M}$, 分点记为

$$f_i = f_0 + \Delta f \cdot i (i = 0, 1, 2, \dots, M)$$

由中心频率为 f_i 的 $M + 1$ 个 Morlet 小波组成的组合滤波器记为 $\Psi_m(t)$ 。

3) 计算雷达信号 $s(t)$ 与组合滤波器 $\Psi_m(t)$ 的卷积, 记为 $w(\tau)$ 。

4) 对 $w(\tau)$ 进行重采样, 采样间隔为原采样间隔的 m 倍, 然后进行 FFT, 记为 $W(f)$, 频谱图为 $|W(f)|$, 由此图进行目标分选。

3 仿真结果

下面验证 Morlet 小波组合滤波器的多频率分辨方法, 对模拟雷达信号和实际测得的编队目标回波信号进行组合小波分析:

1) 设有三个频率比较接近的雷达信号, 同时到达雷达接收机, 雷达接收到的混合信号为

$$s_1(t) = \exp(j2\pi \cdot f_1 \cdot t) + \exp(j2\pi \cdot f_2 \cdot t) + \exp(j2\pi \cdot f_3 \cdot t) + n(t)$$

其中, $f_1 = 2925 \text{ kHz}, f_2 = 3075 \text{ kHz}, f_3 = 3225 \text{ kHz}, n(t)$ 为白噪声, 信噪比为 0 dB , 采样时间为 $5 \mu\text{s}$, 采样点 512。

由上可以得到信号 $s_1(t)$ 的 512 点的 FFT 的频率分辨率为 $\Delta f_0 = 1/\Delta t/N = 200 \text{ kHz}$, 而 f_1 与 f_2, f_2 与 f_3 之差为 150 kHz , 因而利用 FFT 不能分辨由三个信号组成的混合信号 $s_1(t)$, 如图 1 所示。

构造组合滤波器 $w(\tau)$: 在 $[2915, 3235]$ 内取 $f_0 = 2915, \Delta f = 1, M = 320, u = 10^4, m = 2$ 。

图 2 为信号 $s_1(t)$ 经过相合滤波器 $w(\tau)$ 、重采样(间隔为原来的 2 倍)、FFT 后的频谱图, 由此图可以看到三个频率被分开了。

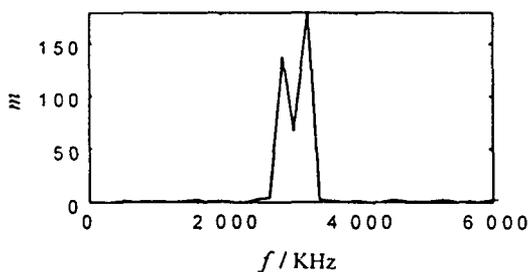


图 1 信号 $s_1(t)$ 的频谱图

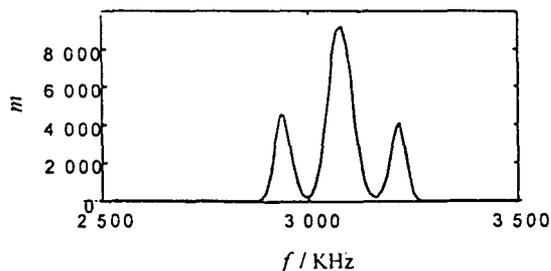


图 2 信号 $s_1(t)$ 经处理后的频谱图

2) 信号 $s_2(t)$ 在实测编队目标回波信号^[4]: 两架轰-5 飞机, 前后间距为 150 m , 上下间距为 50 m 基本上沿切向飞行, 速度为 250 m/s , 高度为 10 km , 雷达工作频率为 $f_1 = 1870 \text{ MHz}$, 脉冲重复频率为 400 Hz , 以 I、Q 方式采样。图 3 为两编队目标的多普勒回波信号混频后的 FFT, 由此图看出, 利用 FFT 不能分辨两个目标。图 4 为采用本文的方法得到的频谱图 ($f_0 = 3000 \text{ Hz}, \Delta f = 1 \text{ Hz}, M = 100, u = 10^4, m = 4$), 由此图看出已将两目标分开。

4 结论

本文提出的利用 Morlet 小波组合滤波器对雷达信号分辨的方法,和 FFT 相比,具有较强的频率分辨能

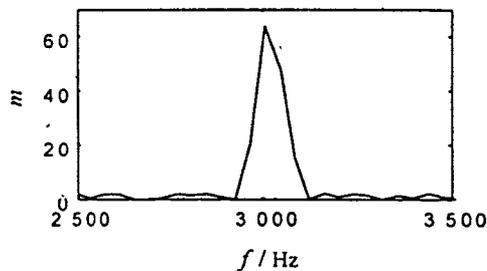


图3 信号 $s_2(t)$ 的频谱图

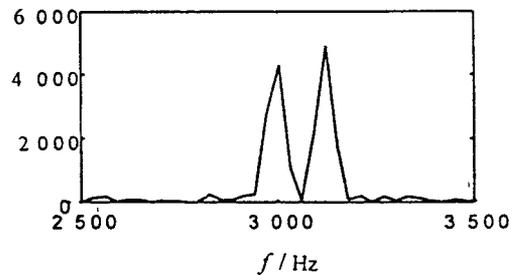


图4. 信号 $s_2(t)$ 经处理后的频谱图

力,对瞬变雷达信号有较强的分辨能力。在具体应用时,只有适当选取小波尺度因子、基频、频率间隔、组合小波的个数,才能得到最佳滤波器。然后只需将雷达信号与滤波器进行卷积运算,再进行 FFT 运算,就能实现信号的频率分辨。因此,此方法简单、方便、实用性强。

参考文献:

- [1] Mallet S. A theory for multi-resolution decomposition[J]. the wavelet representation IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1989,11(7):674-693.
- [2] Leon Cohen. Time-frequency Distributions-A Review[J]. Processing of the IEEE,1989,77(7):941-981.
- [3] 梁凤岗. FIR 数字滤波器设计的小波逼近方法[J]. 上海交通大学学报,1998,32(7):44-48.
- [4] 孙晓兵. 时频信号分析与雷达的多目标分辨[J]. 系统工程与电子技术,1997,19(11):12-16.

A Discriminating Method of Radar Target Using Wavelet Combination-Filter

ZHEN Shu-chun, ZHANG Shan-wen, ZHAO Xing-lu

(The Missile Institute of the Air Force Engineering University, Sanyan 713800, China)

Abstract: Based on the properties of combination-filter of Morlet wavelet, a method of discriminating radar targets is presented in this paper. The method is designing combination-filter, convoluting the signal and filter, computing FFT, and then obtaining frequency-detection. The method is more simple, easier and has higher resolution than FFT.

Key words: Morlet wavelet; component waves; frequency resolution