

子波高分辨谱估计方法及其在毫米波雷达目标 一维距离成像中的应用¹

马莉波 张亮* 侯紫峰* 沈振康

(国防科技大学电子工程学院 ATR 实验室 长沙 410073)

*(中国科学院计算所高性能中心 北京 100080)

摘要 文中研究了一种子波谱估计方法。将该方法用于实际的毫米波雷达目标一维距离成像背景之下,在信号采样频率、采样数据长度相同时,可以获得像分辨率高于相同条件下 FFT 方法的一维距离像,从而可以对一维距离像进行高分辨地分析,在实际应用中具有一定的意义。

关键词 子波变换,谱估计,频率分辨率,一维距离像,像分辨率

中图分类号 TN951, TN957.7

1 引言

毫米波雷达目标一维距离成像是毫米波雷达目标识别过程中的第一步。获得具有更高像分辨率的一维距离像可为后续的信号处理过程提供更多有用的目标信息。一维距离成像过程实质上是对目标回波信号进行谱估计的过程。现代雷达所接收的回波已经不是常规的点目标回波,而是具有局部细微特征的多散射中心的合成信号^[1]。在这种情况下,基于传统傅里叶变换所带来的改善是有限的。子波变换作为新兴的数字信号处理技术,由于其良好的局部显微特性,在信号功率谱估计方面也有其独到之处。

2 子波高分辨谱估计方法的理论依据和滤波解释

一个具有有限能量的函数 $f(t)$ (即 $f(t) \in L^2(R)$) 的连续子波变换为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}_{a,b}(t) dt = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

其中 a 是尺度参数, b 是定位参数, 函数 $\psi_{a,b}(t)$ 称作子波, 一杠表示复共轭。离散子波变换及离散子波在时-频平面的局部化格点定义为^[2]

$$C_f(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}(a_0^{-m}t - nb_0) dt, \quad a_0 > 1, b_0 > 0, \quad (2)$$

$$(nb_0 a_0^m, a_0^{-m} w_0^{\pm}) = \left(\int_{-\infty}^{\infty} t |\psi_{m,n}(t)|^2 dt, \int_{0 \leq \pm w \leq \infty} w |\hat{\psi}_{m,n}(w)|^2 dw \right). \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 格点在时-频平面上不是等均分布的, 当 m 越大时, 格点在频率方向分布愈密, 表现出子波对低频信号在频率上的高分辨特性。因此, 在信号数据采样长度已固定的情况下, FFT 方法对信号谱分辨率的提高已是无能为力, 而利用离散子波变换却可以通过调

¹ 1998-10-05 收到, 1999-04-31 定稿
国家自然科学基金 69896250 资助项目

整尺度参数 (a_0, m) ，来获得不同频率周围的精细观察结果。由于尺度参数的变化可以调整得极为细小，格点的频率中心相应地移动缓慢，从而能够有效地提高频率分辨率。

从滤波的角度看，子波相当于一个恒 Q 带通滤波器^[3]，而子波变换时-频窗口的自适应特性相当于恒 Q 滤波技术。因此，本文所采用的谱估计方法，从滤波角度讲，实质上就是用一系列中心频率和带宽都随尺度参数 a 变化的带通滤波器对信号进行滤波的过程。只要尺度参数 a 选择调整合适，就能够有效地提高频率分辨率。

本文根据以上思想，从子波能谱的角度出发，总结出将子波变换应用于信号功率谱估计的一种算法，称之为子波高分辨谱估计方法。并将其运用到毫米波雷达目标一维距离成像中，取得了较为显著的结果。

3 子波函数的选择

子波函数的选择极大地影响着滤波器的带通特性，对信号谱估计的结果也至关重要。本文采用一维 Morlet 复值子波作为分析子波，其傅里叶变换为 Gauss 函数，是一个特性较为理想的带通滤波器。Morlet 子波的表达式为

$$\psi_{1,0}(t) = e^{jw_0 t} e^{-\beta^2 t^2 / 2}, \quad w_0 \geq 5, \quad (4)$$

其傅里叶变换为 $\hat{\psi}_{1,0}(w) = (1/\beta) \exp[-(w - w_0)^2 / (2\beta^2)]$ 。对于每一分析尺度 a ， $\hat{\psi}_{a,0}(w) = (a/\beta) \exp[-a^2(w - (w_0/a))^2 / (2\beta^2)]$ ，中心频率为 w_0/a ，分析带宽 $\Delta w = 2\sqrt{2}\beta/a$ 。

4 子波高分辨谱估计方法的计算

时间-尺度分析和时间-频率分析之间存在着相互联系^[3]，正是这种联系使尺度意义上的子波能谱用于信号的功率谱估计成为可能。

4.1 子波能谱的概念^[3]

子波变换幅值的平方 $|W_f(a, b)|^2$ 称做尺度谱 (Scalogram)。函数

$$E(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (5)$$

称作子波能谱，它给出了函数在尺度为 a 时的能量值，即给出了在不同尺度 a 上的能量临界密度函数。

4.2 子波能谱与信号功率谱的关系

子波能谱 $E(a)$ 可以表示为^[3]

$$E(a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_f(w) S_{\psi_a}(w) dw, \quad (6)$$

其中 $S_f(w)$ 是信号的理论功率谱， $S_{\psi_a}(w)$ 是子波在尺度为 a 时的功率谱。(6) 式给出了子波能谱与信号功率谱之间的关系，即子波能谱 $E(a)$ 是信号功率谱的加权平均，加权系数是由子波的功率谱确定的。因此，如果能获得信号子波能谱，那么必然能得到有关信号功率谱的信息，从而对信号的功率谱做出估计。

4.3 子波高分辨估计谱的计算方法

用子波能谱来描述一个过程, 是放弃了所有的时间局部信息, 从时间总体上来了解信号的全过程, 这与信号谱估计的要求与我们的思路是一致的. 用子波变换进行信号功率谱估计是这样—个过程, 即对于某一分析尺度 a , 用这个尺度下具有确定中心频率 (ω_0/a) 和一定分析带宽 $(\Delta\omega)$ 的带通滤波器, 在信号时间轴上不断滑动滤波, 提取出与中心频率相同的全部频率信息. 滤波器输出信号的能量就是这一尺度下的子波能量 $E(a)$. 假定信号采样点数为 N , 则输出信号的平均功率为 $E(a)/N$, 这个带宽下输出信号的平均功率密度为 $E(a)/(N \cdot \Delta\omega)$. 由于分析尺度 a 是不断变化的, 因此形成一个关于 a 的功率密度函数. 用 $\hat{S}_f(\omega)$ 表示信号功率谱的估计值, 则用公式可以表示如下:

$$\hat{S}_f(\omega) = E(a)/(N\Delta\omega). \quad (7)$$

通常计算机处理的均是离散采样信号, 设采样频率 $f_s = 1/T_s$, 则离散子波序列变换为^[4]

$$W_f(a, iT_s) = T_s \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n \bar{\psi} \left(\frac{nT_s - iT_s}{a} \right) f(nT_s), \quad a > 0. \quad (8)$$

$\hat{S}_f(\omega)$ 的离散形式为

$$\hat{S}_f(\omega) = \frac{1}{N\Delta\omega} \sum_{i=1}^N |W_f(a, iT_s)|^2. \quad (9)$$

4.4 中心频率 f_0 的选择

子波在不同的分析尺度 a 下, 对应带通滤波器的中心频率不同; 随着 a 值的增大, 中心频率向低频方向移动, 因此 $a = 1$ 时, 子波的中心频率是最高分析估计频率. f_0 只要选择大于信号最高频率的任一频率值, 便可获得 $f \leq f_0$ 的某些频率. 但由于 $a = 1$ 时, 子波对信号没有细化显微作用, 此时的谱分辨率与 FFT 是一致的, FFT 的最高频率为 $1/T_s$, 因此通常选择 $f_0 = 1/T_s$. 在任意尺度 a 下, FFT 频率与子波中心频率的对应关系为 $f = 1/T_s/a$.

4.5 尺度参数 a 的取值

实际在计算离散子波变换时, 通常取 $a = a_0^m$ ($a_0 > 1, m = 1, 2, \dots$) 的形式. 从理论上讲, 通过合适地选择 a_0 , 子波高分辨谱估计方法能获得高于相同长度下 FFT 的任意频率分辨率. 可按照如下算法选择 a_0 :

(1) 指定频率分辨率 ΔF .

(2) 子波高分辨谱估计方法中, 相邻两个频率的分辨间隔 Δf_w 定义为

$$\Delta f_w = f_0/a_0^m - f_0/a_0^{m+1}, \quad (10)$$

其中 $f_0 = 1/T_s, m = 1, 2, \dots$.

(3) 函数 $y = x^{-m}$ 在 $m > 0$ 时是单调减函数, 在 $m = 1$ 时 Δf_w 取得最大值, 定义为 $\Delta f_{w \max}$. 因此欲使子波高分辨谱估计方法下的频率分辨率达到或高于指定的频率分辨率, 只须使 $\Delta f_{w \max} \leq \Delta F$ 即可, 即满足如下不等式方程.

$$\Delta F a_0^2 - f_0 a_0 + f_0 \geq 0. \quad (11)$$

(4) 求解上述不等式方程, 结合条件 $a_0 > 1$, 确定选择合适的 a_0 值.

5 实验仿真结果及分析

5.1 双正弦仿真信号的测试结果

仿真信号为两频率接近的正弦信号 $f(t) = \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)$ ，其中， $f_1 = 1.01$ ， $f_2 = 0.79$ ，采样间隔为 $T_s = 0.1s$ ，采样点数 $N = 64$ 。用此仿真信号分别对 FFT 方法和子波高分辨谱估计方法进行测试，比较分析两种方法下的频率分辨率。子波高分辨谱估计方法中，取 $a_0 = 1.02$ 。图 1、图 2 分别示出了两种方法下的估计谱，表 1 给出了两种方法下的估计频率误差比较。

从图 1 中分辨不出两个正弦信号，而从图 2 能明显分辨出两个峰值。结合表 1 的比较结果，不难得出如下结论：子波高分辨谱估计方法的频率分辨率优于 FFT 方法，且估计的准确度也优于 FFT 方法。

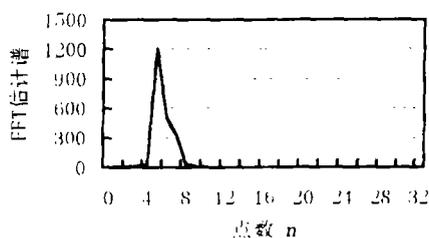


图 1 $N = 64$ ，FFT 估计谱低频部分

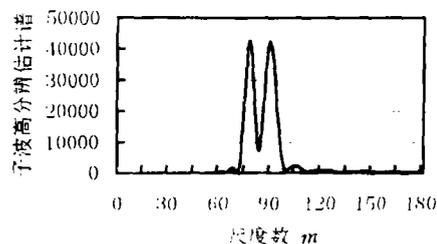


图 2 $N = 64$ ，子波高分辨估计谱

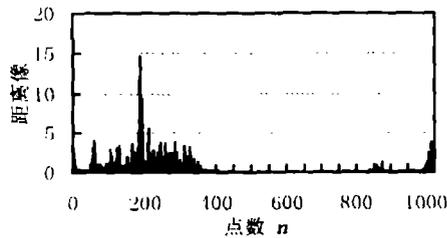
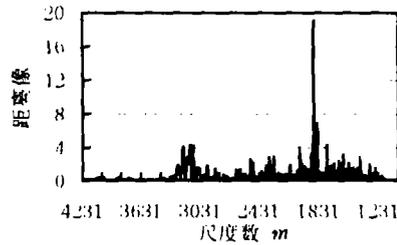
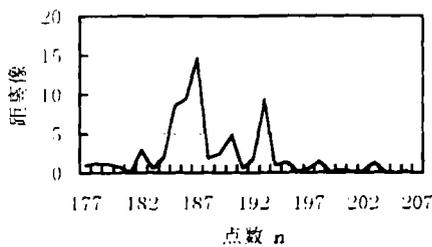
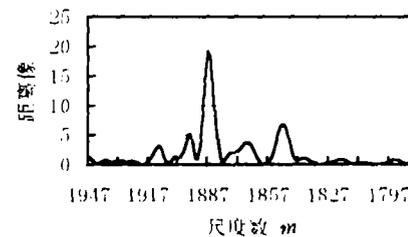
表 1 $N = 64$ 时，FFT 方法和子波高分辨谱估计方法的估计频率误差比较

$N = 64$ 频率 (Hz)	FFT 方法		子波高分辨谱估计方法	
	谱估计值	相对误差	谱估计值	相对误差
1.01	0.9375	7.17%	1.0081	0.21%
0.79	0.7813	1.1%	0.7902	0.023%

5.2 子波高分辨谱估计方法在毫米波雷达目标一维距离成像中的应用

实验数据采用航天部 207 所提供的外场测量数据。数据是阶跃跳频雷达测得的，频率初始值为 34.7GHz，跳频间隔为 1MHz，带宽为 0.903GHz。基于 FFT 方法获得目标一维距离像的步骤是，将原始每组 904 点数据补 0 至 1024 点，然后做 FFT。我们采用某吉普车方位角为 0° 、俯仰角为 8.87° 时的数据作为分析样本。为了获得高于 $N = 1024$ 点 FFT 的像分辨率，可计算确定 $a_0 = 1.0009$ 。

成像原始数据长度 $N = 904$ 时，基于 FFT 方法的能量归一化一维距离像如图 3 所示，基于子波高分辨谱估计方法的能量归一化一维距离像如图 4 所示（只显示出主要像点值部分）。为了更易于和更清晰地比较两者的像分辨率，在图 3、图 4 中分别截取像点值范围在 1.72~2.02 之间（最高像点值附近）的数据进行放大比较，如图 5、图 6 所示。图示纵轴均为能量归一化一维距离像。将在图 5 中出现的峰值依次标记为 N_{0-4} ，在图 6 中出现的峰值依次标记为 M_{0-4} 。表 1 给出了两种方法下的一维距离像的像点位置。

图 3 $N = 904$, FFT 能量归一化一维距离像图 4 $N = 904$, 子波高分辨能量归一化一维距离像图 5 $N = 904$, FFT 的截短距离像图 6 $N = 904$, 子波高分辨谱估计方法下的截短距离像

从表 2 可以看出, 对于像点值 1.818 和 1.833, FFT 方法下只间隔 1 个像点, 从图 5 中几乎不能分辨出两个峰值; 而在子波高分辨谱估计方法下, 两者间隔了 9 个像点, 从图 6 上能清晰明显地分辨出两个峰值。由于事先选定的 $\Delta f_{w\max}$ 已经小于假定数据长度下的 FFT 像分辨间隔, 因此, 只要存在两个像点值用 FFT 方法分辨不出, 而用子波高分辨谱估计方法能分辨清楚, 我们就不难推得如下结论, 在原始信号采样频率下, 数据长度相同时, 子波高分辨谱估计方法不仅能估计出 FFT 方法下的所有像点值, 而且还具有高于 FFT 方法的像分辨率。换句话说, 用子波高分辨谱估计方法不仅可以对实际的毫米波雷达目标回波信号进行一维距离成像, 而且成像分辨率还要高于传统的 FFT 方法。

表 2 相同信号采样频率下, FFT 和子波高分辨截短一维距离像像点位置比较

子波高分辨像点	M_0	M_1	M_2	M_3	M_4
子波高分辨像点位置	1912	1896	1887	1866	1850
对应像点值	1.794	1.818	1.833	1.865	1.897
FFT 对应像点	N_0	N_1	N_2	N_3	N_4
FFT 对应像点位置	183	186	187	191	194

6 结 论

(1) 子波变换用于信号谱估计, 其频率分辨率优于 FFT 方法, 且频率估计的准确度也优于 FFT 方法。

(2) 子波高分辨谱估计方法能够用于毫米波雷达目标一维距离成像, 而且在信号采样频率相同, 数据采样长度相同的情况下, 其像分辨率优于 FFT 方法, 从而能获得更精细的目标一维距离像。

(3) 用子波高分辨谱估计方法对雷达回波信号进行一维距离成像, 其最高观测像点值受采样频率 f_s 限制, 而最低像点值不受限制. 因此, 采用此种方法, 既可以对雷达目标回波信号一维距离像的整体做出精细估计, 又可在感兴趣的像点值附近, 重新调整参数进行细致估计, 以获得更丰富的目标信息.

参 考 文 献

- [1] 张 亮. 毫米波导引头目标识别与实时处理研究: [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1997.
- [2] 王建忠. 小波理论及其在物理和工程中的应用. 数学进展, 1992, 21(3), 289-316.
- [3] 赵松年. 子波变换与子波分析. 北京: 电子工业出版社, 1996, 第二章, 第三章.
- [4] Combes J M, Grossman A, Tchamitchian P. Eds., *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*. Berlin: Springer, IPTI, 1989, 298-304.

WAVELET HIGH RESOLUTION SPECTRUM ESTIMATION METHOD AND ITS APPLICATIONS IN mmW RADAR TARGET PROFILE

Ma Libo Zhang Liang* Hou Zifeng* Shen Zhenkang

(ATR Lab. Institute of Electron. Eng., National Univ. of Defence Tech., Changsha 410073)

*(Center of High Performance Computing Institute of Computing Tech. Chinese Academy of Sci., B

Abstract This paper studies a method using wavelet transform to estimate the signal's spectrum. The method is applied to the practical MMW radar targets echo signals, and on the condition of the same sampling frequency and sampling data length, it can achieve one dimensional range profile with profile's resolution superior to FFT's, so the one dimensional range profile of targets can be analyzed with high resolution, there is certain significance in the practice.

Key words Wavelet transform, Spectrum estimation, One dimensional range profile, Profile resolution

马莉波: 女, 1971 年生, 硕士, 从事信号处理理论算法研究工作.

张 亮: 男, 1969 年生, 博士后, 从事信号处理软硬件开发和 ASIC 设计.

侯紫峰: 男, 1955 年生, 研究员, 博士生导师, 从事信号处理与计算机系统结构研究工作.

沈振康: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 从事信号处理、目标识别等方面的研究工作.