

子波变换在超宽带雷达中的应用*

黎海涛** 徐庆 徐继麟

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 介绍了连续子波变换的定义和性质; 基于子波变换在时域和频域的良好局部化性质, 研究其在宽带信号的相关处理和超宽带雷达目标特征提取两个方面的应用, 理论分析和试验结果表明, 在超宽带雷达信号处理中, 宽带相关处理相当于时间尺度域的匹配滤波, 采用连续子波变换从频域采样数据中提取目标散射中心是一种较为鲁棒的方法。

关键词 超宽带雷达; 子波变换; 宽带相关处理; 目标特征提取

中图分类号 TN957.51

超宽带雷达(UWB)具有较高的距离分辨率和探测到地面隐身目标的能力, 近年来得到广泛重视和应用^[1-3]。超宽带是指信号分数带宽(带宽与中心频率之比)大于0.25。在超宽带信号照射下, 复杂目标可视为一组散射中心的集合体。这时, 回波信号不再是发射信号的简单复制和时延, 而是包含局部细微特征的多散射中心的合成信号, 具有突变性和非平稳性, 传统的匹配滤波处理在超宽带雷达中不再适用^[4]。而近年兴起的子波变换在时域和频域都具有良好的局部化性质, 非常适用于非平稳信号和宽带信号的分析 and 处理。本文研究子波变换在宽带相关处理和目标特征提取两个方面的应用。

1 连续子波变换

函数 $x(t) \in L^2(R)$ 的连续子波变换为

$$CWT_x(a, b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中 $\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为母子波, $a \in R - \{0\}$ 为尺度因子, a 大时对应较低频率, a 小时对应较高频率, $b \in R$ 为时移因子, R 为实数。

若 $x(t), \psi_{a,b}(t)$ 的傅里叶变换分别为 $X(\omega), \psi(\omega)$, 则频域内的连续子波变换为

$$CWT_x(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \psi^*(a\omega) \exp(j\omega b) d\omega \quad (2)$$

且母子波必须满足允许条件为

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega < \infty \quad (3)$$

允许条件使逆子波变换成立

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} CWT_x(a, b) \psi_{a,b} \frac{dad b}{a^2} \quad (4)$$

2 宽带相关处理

设雷达发射超宽带信号 $f(t)$ ，当目标以速度 v 匀速运动时，回波信号的宽带模型为^[5]

$$g(t) = \sqrt{s} f[s(t - \tau)] \tag{5}$$

式中 $s = \frac{c-v}{c+v}$ 为尺度变化因子(频移)； $\tau = \frac{2R}{c}$ 为时延， R 为雷达与目标之间的距离； c 为光速。

采用宽带匹配相关处理时，其输出为

$$WC_{f_R}(s, \tau) = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) f^*[s(t - \tau)] dt \tag{6}$$

若发射信号 $f(t)$ 是允许子波，则其相关输出与子波变换之间有对应关系

$$WC_{f_R}(s, \tau) = CWT_f\left(\frac{1}{s}, \tau\right) \tag{7}$$

因此宽带相关接收器的输出 $WC_{f_R}(s, \tau)$ 等价于对回波 $g(t)$ 作 $f(t)$ 为母子波的连续子波变换。若选择母子波作发射信号时，相关处理与子波变换得到统一。

在实际雷达系统中，常采用线性调频(LFM)脉压信号作发射信号。由于矩形包络的LFM信号不满足允许条件，高斯包络的LFM信号满足允许条件^[3]，因此设雷达发射高斯包络的超宽带LFM信号为

$$x(t) = \exp(-\alpha t^2) \exp j2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) \tag{8}$$

式中 $\alpha = -3.8$ ，载波基频 $f_0 = 800$ MHz，信号带宽 $B = 250$ MHz，分数带宽为0.31，如图 1 所示。对其作基于Morlet子波的相关处理，得到如图 2 所示结果(未加噪声)，幅度为 A_w 。

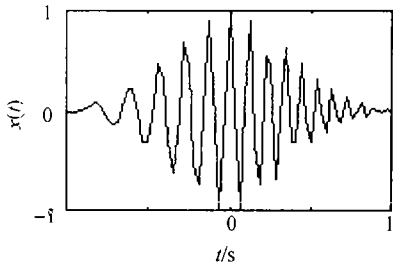


图1 发射信号

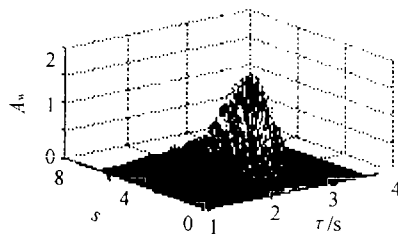


图2 相关处理结果

在多散射中心情况下，每个点目标相对雷达的位置和速度不同，其回波参数 s 和 τ 也不同，所以整个目标回波信号为

$$g(t) = \iint S(s, \tau) \frac{1}{\sqrt{|s|}} f\left(\frac{t - \tau}{s}\right) \frac{ds d\tau}{s^2} \tag{9}$$

式中 加权系数 $S(s, \tau)$ 表示各单点回波信号幅度。所以多散射点时的宽带相关输出为

$$\begin{aligned} WC_{f_R}(s', \tau') &= \int g(t) \frac{1}{\sqrt{|s'|}} f\left(\frac{t - \tau'}{s'}\right) dt = \\ &= \iint S(s, \tau) W_{ff}\left(\frac{s'}{s}, \frac{\tau' - \tau}{s}\right) \frac{ds d\tau}{s^2} = \\ &= S(s', \tau') * W_{ff}(s', \tau') \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $WC_{f_R}(s', \tau')$ 是 $S(s', \tau')$ 与 $W_{ff}(s', \tau')$ 的卷积，信号幅值 $S(s, \tau)$ 与信号 $f(t)$ 的子波变换 $W_{ff}(s', \tau')$ 的卷积称为宽带卷积。可见宽带相关处理相当于基于子波的时间尺度域的匹配滤波。

3 目标特征提取

超宽带雷达回波是具有局部细微特征的有限个散射中心所组成的分布式目标的集合, 其散射中心一般位于目标的边缘、拐角和连接处。回波信号中的这些精细结构信息反映了目标的本质特征。目标特征表现为散射中心在目标上的空间分布和散射面积的相对关系, 若能从回波信息中再现其散射中心, 就能获得目标的特征信息。基于传统的傅氏变换受其分辨率的限制和相当大的计算量难以满足要求, 而子波变换具有良好的时频局部化性质, 有助于从目标后向数据中提取出重要的局部信息特征。

我们采用Morlet子波来分析目标频域采样数据。在频域内, 其形式为^[6]

$$\psi(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha}\right] \quad (11)$$

式中 α 和 ω_0 为常数。利用Morlet子波能有效检测出回波信号峰值。图3是某一姿态角下录取的飞机缩比模型后向散射频域采样数据, 其中幅度为 A , 采样点数 $N = 128$, 信噪比 $SNR = 12$ dB, 频率步进超宽带雷达发射信号载波基频 $f_0 = 1$ GHz, 步进频率 $\Delta f = 20$ MHz, 载波频率 $f = f_0 + N\Delta f$ 。图4是利用Morlet子波对采样数据作连续子波变换所得到的结果, 归一化幅度为 A_r , 从图中可以明显看到局部散射中心的距离像。

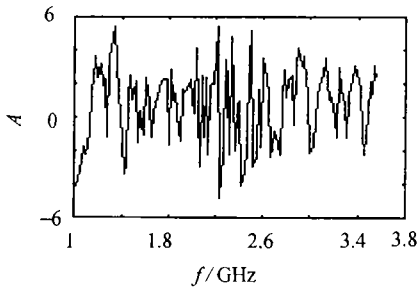


图3 回波数据

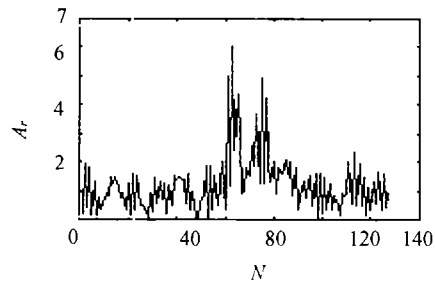


图4 距离像

4 结论

本文研究了子波变换在UWB信号处理中的应用。宽带相关处理相当于基于子波的时间尺度域匹配滤波, 只要选择满足允许条件的母子波作发射信号, 就可以使子波变换与相关处理得到统一。同时, 采用连续子波变换能提取出目标散射中心, 把各散射中心在距离像中的位置和峰值作为特征矢量, 进而可达到目标识别的目的。

参 考 文 献

- 1 Taylor James. Introduction to ultrawideband radar system. U S A: CRC Press, 1995
- 2 黎海涛, 徐继麟. 超宽带雷达方程. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 115~117
- 3 王光泰, 徐继麟. 超宽带雷达技术特点. 电子科技大学学报, 1997, 26(增刊): 13~16
- 4 Chen K M, Rethwell E J, Nyquist D P, et al. Ultrawideband short pulse radar for target identification and detection-laboratory study. IEEE International Radar Conference, Alexandria, Virginia, 1995: 450~455
- 5 Weiss G. Wavelets and wideband correlation processing. IEEE Signal Processing Magazine, 1994, (1): 13~32
- 6 Le-Tien T, Talhami H, Nguyen D T. Target signature extraction based on the continuous wavelet transform in ultrawideband radar. Electronics Letters, 1997, 33(1): 89~90

Application of Wavelet Transform in Ultra-wideband Radar

Li Haitao Xu Qing Xu Jilin

(College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The wavelet transform has favorable localization character in time domain and frequency domain, which is specially applicable in wideband signal. In this paper, the applications in wideband correlation processing and target feature extraction are studied. Theoretic analysis and experimental results show that the continuous wavelet transform is an effect approach in ultra-wideband radar signal processing.

Key words ultra-wideband radar; wavelet transform; wideband correlation processing; target feature extraction

· 科研成果介绍 ·

智能多路液体流量监测装置

主研人员: 雷霖 钱光弟 谢文楷

智能多路液体流量监测装置是在分析现有众多的流量传感器及检测方法的基础上,对现有产品进行研究,设计出一种新型、通用化的液体流量监测装置,可广泛应用于石油、化工、食品、医药、科研等领域的计量、监测与控制。

该装置采用Intel8032单片微控制器,结构设计紧凑、体积小、重量轻、性能价格比高、精度达 $\pm 0.5\%$,并采用开关电源模块供电。该装置可与多种电脉冲信号输出型的流量传感器如涡轮、涡街等配接,实现16路液体流量的自动巡回检测与数字显示,检测结果可由RS-232C传到上位机,具有稳定性好、可靠性高、抗干扰能力强等优点。

宽带大功率行波管多级降压收集极的设计程序研究

主研人员: 王文祥 赵国庆 谢克维

宽带大功率行波管多级降压收集极的设计程序研究CAD软件能通过接口文件与高频结构相联系,构成完整的行波管的设计。该软件能处理任意收集极边界形状(包括凹、凸形状、含有设置防止二次电子返回的挡板等),包含了对空间电荷、二次电子、反射电子的处理。结果数据包含收集极效率以及原电子、二次电子的着落边界位置等。该软件界面清晰、布局合理、操作方便,设计师能较快熟悉、使用,计算快速、准确,将传统的数周设计时间缩短到不足半天就能完成收集极的设计;方便设计师对边界形状、极电压进行修改,并分别进行计算,从而快速、准确地完成收集极的设计。

· 科 卞 ·