

⑤ 285-200

小波谱估计用于雷达目标成像和识别*

李跃华 李兴国

(南京理工大学毫米波光波折感技术研究, 江苏, 南京, 210094)

TN957.52
TN911.1

摘要 研究了小波变换谱估计用于频率步进毫米波高分辨力雷达目标一维距离像的成像方法。选用巴调高斯函数作为小波基函数, 进行小波变换的信号功率谱估计, 获得高质量的频率步进毫米波雷达目标的一维距离像。实验结果表明这种方法对于提高目标识别率是有效的。

关键词 谱估计, 雷达信号, 图像处理, 小波变换, 多分辨分析

目标识别

引言

由于在频率步进毫米波雷达目标的一维距离像中包含了目标散点的个数、分布、径向长度等特征, 这些特征在工程实际中提取较容易, 目标识别的算法便于实时化。因此, 雷达目标一维距离像的成像是毫米波高分辨力雷达的复杂背景下进行敏感目标识别和探测的关键技术之一。

FFT 算法作为频率步进毫米波雷达目标距离像的一种成像方法已经得到深入的研究。但 Fourier 变换在时空域上没有任何分辨, 信号 $f(t)$ 的 FFT 变换 $F(\omega)$ 在任何有限频段上的信息都无法准确确定任意小范围内所对应的 $f(t)$, Fourier 变换的这种固有缺陷, 使得在工程应用中由于实时性的限制, 采样数据长度较短有限制, 可能导致 FFT 算法分辨力的显著下降, 由此丢失有关目标的一些重要信息。为了克服 Fourier 变换不能同时进行时间-频率局域性分析的缺点, 提出了 Gabor 变换等许多改进的方法, 但这些方法在解决时空域分辨方面仍然存在一定的不足, 例如: Gabor 变换的窗口尺寸一旦确定便无法改变, 这是由于 Gabor 变换的局部化格点是均匀分布的, 其时间、频率局部化的形式与格点的位置无关。这种局部化格点固定不变的特性, 限制了 Gabor 变换的应用, 只有将局部化参数 τ 取得很小时, 才能满足高频信号分析的要求, 但其代价是样本点数增多、运算时间增长、速度下降。

本文据小波变换所具有良好的局域性和逼近性, 将小波多分辨技术用于频率步进毫米波雷达目标的信号分析, 利用小波变换数学“显微”功能, 由基于小波变换的信号功率谱估计来获取高质量频率步进毫米波雷达目标的一维距离像, 为进行目标识别提供有效的依据。

1 小波变换原理和多分辨分析

小波分析作为一种时频局部化分析方法^[1], 其基本思想是寻求一个满足一定条件的基小波函数 $\Psi(t)$, 从其所具有的正则性、局部性、振动性出发, 通过对基小波函数的伸缩和平移构成小波函数族 $\{\Psi_{a,b}(t)\}$, 然后利用这个函数族来逼近或表示所要研究的信号, 并作

* 国防预研基金(编号 95J5. 15)资助项目
稿件收到日期 1998-11-24, 修改稿收到日期 1999-01-18

出相应的分析和处理.

对于函数 $\Psi(t) \in L^2(R)$, 若满足 $\int_{\mathbb{R}} \Psi(t) dt = 0$, 则称之为小波函数. 引入参数 a, b 对 $\Psi(t)$ 进行伸展和平移, 有 $\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi(\frac{t-b}{a})$, 称其为伸展小波; 其中 a 为尺度因子, b 为平移因子, 于是函数 $f(t)$ 关于小波函数 $\Psi(t)$ 的小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = f(t) * \Psi_a(t) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\Psi_{a,b}(t)} dt, \quad (1)$$

从信号分析角度看, 式(1)说明能量有限信号小波变换就是信号 $f(t)$ 通过一个传递函数为 $|a|^{-\frac{1}{2}} \Psi(a\omega)$ 的滤波器输出, 小波变换相当于一组带通滤波器对信号 $f(t)$ 进行多带通滤波. 这些滤波器具备面积相等、长宽比例随 a 变化的时频分辨单元, 一个尺度对应一个通频带, 由此获得信号 $f(t)$ 在不同频带内信息, 体现了小波变换的多分辨特性. 对于数字信号 $f(n)$, 令 $a = a_0^j, b = nb_0 a_0^j$, 其中伸缩步长 $a_0 > 1$, 位移步长 $b_0 \neq 0, j \in Z$, 离散小波变换为^[2]:

$$W_j(n) = W_j(a_0^j, nb_0 a_0^j) = a_0^{-\frac{j}{2}} \sum_k f(k) \overline{\Psi(a_0^j k - nb_0)}, \quad (2)$$

可见, 信号的小波分析相当于对信号进行低通滤波和高通滤波^[3], 即将不同频带内的信号成分“放大”, 将信号与噪声剥离, 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. 如果对频率步进毫米波雷达目标的回波实施小波变换, 由小波变换的信号功率谱估计可获取比 FFT 算法更好的雷达目标的一维距离像.

2 基于小波变换的信号功率估计

上述分析表明, 小波变换相当于一组带通滤波器对信号 $f(t)$ 进行多带通滤波, 这些带通滤波器的通带特性对被测信号 $f(t)$ 的谱估计十分重要. 由于采样信号的离散化, 故小波变换的运算也是离散且长度有限的; 据此, 只有紧支集的小波基才能在有限的数字信号进行小波变换的过程中获得有限的数字滤波, 以适应小波变换的要求. 另一方面, 根据小波理论, 小波变换的频率分辨率 Δf 和时间分辨率 Δt 的乘积与小波基函数有直接关系, 并受到 Heisenberg 测不准原则的限制: $\Delta f \times \Delta t \geq 1/(4\pi)$, Δf 减小必然导致 Δt 增大, 反之亦然, 即频率分辨率 Δf 和时间分辨率 Δt 不能任意小. 为了提高频率分辨率 Δf 和时间分辨率 Δt , 应选择小波基函数的 Δf 和 Δt 乘积尽可能接近 $1/(4\pi)$. 从小波基函数应具有波动性、衰减性、带通性以及 Heisenberg 不等式限制等几个方面考虑, 选择已调高斯函数作为小波基函数来构成一组特性较理想的带通滤波器^[4]:

$$\Psi(t) = \exp(j\omega t) \exp(-t^2/2), \quad (3)$$

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \exp[j\omega(t-b)/a] \exp\{-[(t-b)/a]^2/2\}. \quad (4)$$

图 1(a)和(b)示意了平移因子 b 一定, 尺度因子 a 变化时, 已调高斯小波函数的变化过程, 图 1(c)和(d)表示尺度因子 a 一定, 平移因子 b 变化时, 已调高斯小波函数的变化过程, 可见随着尺度因子 a 和平移因子 b 变化, 已调高斯小波函数的波形也随之展宽并在时间轴上平移. 这说明已调高斯小波基函数作为一种窗函数其明显的优点就是窗函数的区间可随

着频率的变化而变化,这一性质特别适于非稳态、瞬态信号的分析处理.

进一步将式(4)展开为:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \{ \cos[\omega(t-b)/a] + j \sin[\omega(t-b)/a] \} \exp\{-[(t-b)/a]^2/2\}, \quad (5)$$

记 $\Psi_{a,b}(t)$ 的实部为: $\Psi_{I,a,b}(t) = |a|^{-1/2} \{ \cos[\omega(t-b)/a] \} \exp\{-[(t-b)/a]^2/2\}$, 记 $\Psi_{a,b}(t)$ 的虚部为: $\Psi_{Q,a,b}(t) = |a|^{-1/2} \{ \sin[\omega(t-b)/a] \} \exp\{-[(t-b)/a]^2/2\}$, 则式(5)可写为:

$$\Psi_{a,b}(t) = \Psi_{I,a,b}(t) + j\Psi_{Q,a,b}(t). \quad (6)$$

于是根据式(1),已调高斯函数作为小波基函数时,信号 $f(t)$ 的小波变换为:

$$W_f(a,b) = W_{fI}(a,b) + jW_{fQ}(a,b), \quad (7)$$

其中实部 $W_{fI}(a,b)$ 构成无相移的滤波器,虚部 $W_{fQ}(a,b)$ 构成具有 90° 相移的滤波器,两者幅频特性相同,而相位相差 90° ,为正交关系.这种关系正好适合频率步进毫米波雷达系统检波器的 I、Q 正交通道数据处理的需要.由式(7)有:

$$|W_f(a,b)| = [W_{fI}^2(a,b) + W_{fQ}^2(a,b)]^{1/2}, \quad (8)$$

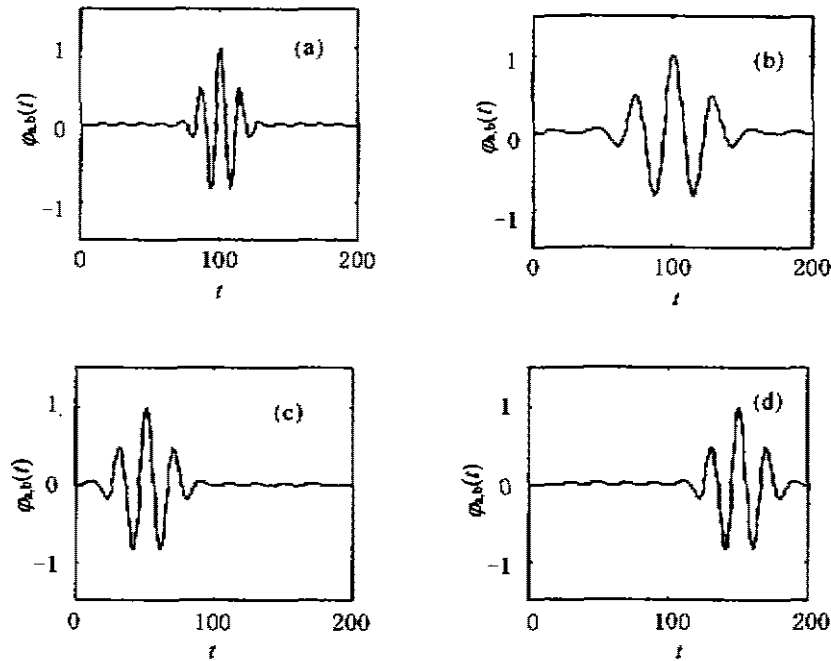


图1 尺度因子 a 和平移因子 b 对小波基函数的影响

Fig. 1 Effect of a and b on wavelet basic function

据信号分析理论,对于任意信号 $f(t)$,功率谱定义为: $S_f = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} P(f, \Delta f) / \Delta f$, 其中 Δf 为分析频率间隔.基于小波变换的信号分析,设 N 为采样点数, T_s 为采样间隔,信号 $f(t)$ 通过带通滤波器的输出瞬时功率即为 $W_f^2(a,b)$.对应每个尺度 a 值,即对应着一定频率点的

一定带宽,此频段输出平均功率表示为 $P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_f^2(a, b_i)$, 则对应此频率的信号功率谱为:

$$S_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_f^2(a, b_i) / \Delta f, \quad (9)$$

式(9)中对于任意尺度 a 下的带通滤波器的中心频率为: $f_0 = 1/(a \times T_1)$, 而小波带宽为 $\Delta f = 1/(N \times a \times T_1)$. 在不同尺度 a 下, 带通滤波器的中心频率 f_0 不同, 随着尺度 a 的减小, 对应的中心频率逐渐增大. 同样, 随着尺度 a 的减小, 对应滤波器的通带跟着展宽, 相当于在不同频段和不同分析精度下对信号 $f(t)$ 的功率谱估计, 从而获得雷达目标一维距离像.

3 实验结果

为了检验方法的有效性, 我们用三个角反射器组成雷达简化的坦克目标. 发射机发射中心频率为 $f_0 = 35\text{GHz}$, 步进频率为 $\Delta f = 10\text{MHz}$ 的脉冲串, 则点目标的回波信号为:

$$y_i = \begin{cases} B_i \cos\{2\pi f_i [t - \tau(t)] + \theta_i\}, & iT_2 + \tau(t) \leq t \leq iT_2 + T_1 + \tau(t), \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

取采样点数为 128 点, 对 I、Q 正交双通道的目标回波信号进行采样, 获得一系列回波信号的幅度和相位信息, 经过 I、Q 正交双通道处理, 得输出^[5]:

$$G_i = A_i \exp(j\Psi_i), \quad (11)$$

式(11)中: A_i 为混频输出信号幅度, $\Psi_i = -2\pi(f_0 + i\Delta f) \left[\frac{2R}{C} - \frac{2V_r}{C} \left(iT_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{2R}{C} \right) \right]$, T_2 为脉冲重复周期, T_1 为脉冲宽度, V_r 为雷达与目标的相对运动速度. 对每对数据作 DFT^{-1} 傅氏反变换, 则点目标的回波波形为: $H_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} A_i \exp(j\Psi_i) \exp(j \frac{2\pi}{n} ki)$, 综合后即可获得目标一维距离像.

图 2 给出了简化坦克目标的回波波形, 其中图 2(a) 为三个散点相对雷达距离分别为 3001m、3002m 和 3003m, 图 2(b) 为三个散点相对雷达距离分别为 3001m、3001.2m 和 3003m; 可见当散点之间距离很近时, 采用 FFT 算法获得的目标回波已经不能清晰地分辨出其中两个散点. 这是由于 Fourier 变换对目标散点的谱分辨率较低.

采用小波变换的信号功率谱估计对上述简化目标进行处理, 为提高谱分辨率, 选取尺度因子 a 具有较小的变化步长, a 的取值变化越小, 谱估计越精细, 为此取 $a = 1.025^j$, $j = 1, 2, \dots$, $b = i \times T_1$, $T_1 = 4/10^5\text{s}$. 由图 3 可见, 采用小波变换的信号功率谱估计的方法, 则可将相对雷达距离分别为 3001m 和 3001.2m 的两个散点清晰地区别开.

比较图 2 和图 3 可见, 利用小波变换的信号功率谱估计可获得高分辨率的目标距离像. 如果以此获得的高分辨率的目标距离像作为目标的特征, 更有利于雷达目标的识别.

为了比较, 选择图 4 所示的 BP 神经网络作为分类器进行目标识别. 这里输入模式的各个分量构成第 i 层神经元的输入, 隐层第 j 个神经元输入为 $net_j = \sum w_{ij} o_i$, 第 j 个神经元的输出为 $o_j = \frac{1}{1 + \exp(-net_j)}$, 输出层第 k 个单元的输入为 $net_k = \sum w_{jk} o_j$, $o_k = f(net_k)$, 当网络

输出 o_{pk} 与理想输出 t_{pk} 不一致时, 系统存在平均误差 $E = \frac{1}{2} \sum_p \sum_k (t_{pk} - o_{pk})^2$, 为了克服 BP 算法收敛慢和局部极小点的问题, 这里选用改进的 BP 算法^[5], 其权值调整公式为: $\Delta W_{ij}(n+1) = \eta(\delta_j \cdot o_j) + a \Delta w_{ij}(n)$, 其中, a 为调整变化量的比例常数, η 为学习率, $\delta_j = -\frac{\partial E}{\partial net_j} = o_j \cdot (1 - o_j) \sum_k w_{jk} \cdot (t_k - o_k) \cdot o_k \cdot (1 - o_k)$.

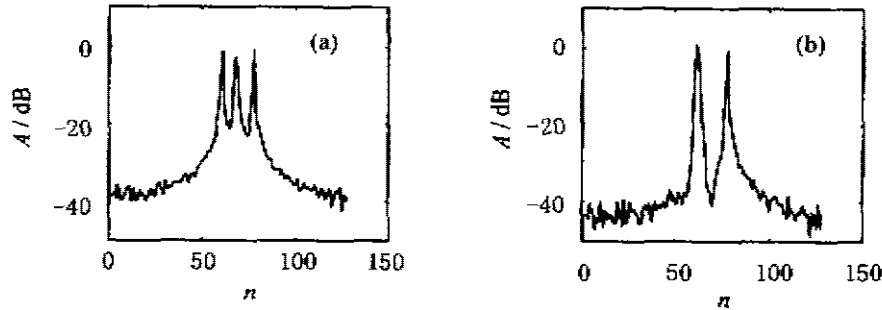


图 2 FFT 法处理目标回波信号
 (a) $R1=3001m, R2=3002m, R3=3003m$ (b) $R1=3001m, R2=3001.2m, R3=3003m$
 Fig. 2 Return signal with FFT

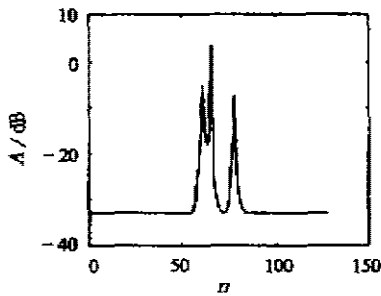


图 3 基于小波变换信号功率谱估计的结果
 Fig. 3 Results based on wavelet transform

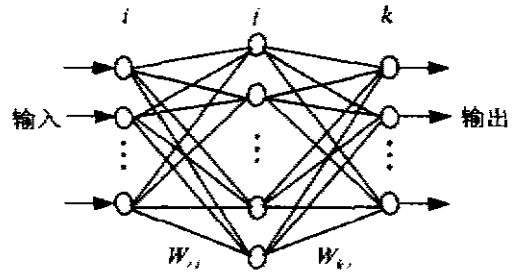


图 4 BP 神经网络结构
 Fig. 4 BP neural network

利用上述 BP 神经网络作为分类器, 对采样获得的汽车和坦克目标, 分别以 FFT 目标距离像和小波功率谱估计的目标距离像为特征, 进行分类识别, 结果如表 1 所示. 可见, 用同样的分类器, 对步进毫米波雷达目标进行识别, 基于小波谱估计目标距离像为特征, 具有良好的分类效果.

以上研究利用小波变换的信号功率谱估计获取频率步进毫米波雷达目标一维距离像的方法, 并基于此进行目标识别. 实验结果表明, 与 FFT 相比较, 这种方法具有更高的分辨率. 这对提高雷达目标的识别率是有利的.

表 1 不同特征模式下目标识别率
Table 1 Recognition rate of target on different model

目标类型	FFT 目标距离像		小波谱估计目标距离像	
	判坦克/(%)	判汽车/(%)	判坦克/(%)	判汽车/(%)
坦克	64.7	35.3	94.1	5.9
汽车	31.5	68.5	3.7	96.3

REFERENCES

- 1 Charles K Chui. *An Introduction to Wavelets*, Academic Press, 1995: 89~120
- 2 Mallat S. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Trans. PAMI*, 1989, 1(7): 674~693
- 3 Mallat S. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. on IT*, 1992, 38: 617~643
- 4 ZHANG Xu-Sheng, et al. The methods of extracting signal envelope—from Hilbert transform to wavelet transform. *Journal of Electronics* (张绪省等, 信号包络提取方法·从希尔伯特变换到小波变换, 电子科学学刊), 1997, (1): 120~123
- 5 Wechner D R. *High Resolution Radar*, Boston: Artech House, 1987: 63~182
- 6 Giles C L. Learning internal representations by error propagation. *IEEE Trans. on NK*, 1996, 5(2): 153~156

THE TARGET IMAGING AND IDENTIFICATION OF STEP FREQUENCY MMW RADAR BASED ON WAVELET TRANSFORMATION *

LI Yue-Hua LI Xing-Guo

(Research Institute of MMW & Light Wave Near-sensing Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The application of wavelet transform to the 1-D target imaging of the step frequency MMW high definition radar was studied. The algorithm based on multirange cells was proposed using modulated Gaussian wavelet transform and good-quality 1-D images of the radar target were obtained. The results indicate that the method is valuable for the improvement of target classification.

Key words frequency stepping, radar signal, image processing, wavelet transform, multiresolution analysis.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense
Received 1998-11-24, revised 1999-01-18