

雷达目标一维距离象多分辨特征描述和快速匹配法研究¹

张 亮 何松华 庄钊文 郭桂蓉

(国防科技大学电子工程学院 ATR 实验室 长沙 410073)

摘 要 文中首先阐述了信号奇异性与小波变换模极大值的关系、含噪非平稳信号在小波变换下信号与噪声的不同特性;然后提出了可用于高距离分辨力雷达目标识别的一维距离象多分辨分解和目标结构特征的多分辨描述方法。根据目标结构特征的多分辨描述,定义了距离象的相异度概念,利用相异度可以实现目标的快速匹配识别。

关键词 小波变换, 雷达目标识别, 距离象, 特征描述

中图分类号 TN951, TN957.7

1 引 言

现代雷达技术正朝着超宽带、多功能、智能化方向发展,对于冲击雷达一类超宽带信号,常规的 FFT 根本无法分析所接收到的渐变脉冲回波,而小波变换对这类信号的分析具有独特之处。此外,小波变换可以对雷达所得到的一维距离象回波数据进行局部特征提取,实现目标参数估计、检测和识别,为未来雷达智能信号处理提供有效的手段。

2 小波变换下的信号分析

2.1 信号奇异性与小波变换模极大值的关系

由于小波变换具有空间局部化性质,因此,利用小波变换来分析信号的局部奇异性,即奇异点的位置和奇异度的大小是比较有效的。一般地,我们利用 Lipschitz 指数来描述函数的局部奇异性,即一个函数 $f(t)$ 在点 t_0 处是一致 Lipschitz 指数 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$, 当且仅当存在一个常数 K , 使得在 t_0 的某一邻域内的任意点 t , 均有

$$|f(t) - f(t_0)| \leq K|t - t_0|^\alpha. \quad (1)$$

这样,通过奇异性就描述了信号的不规则结构。例如,阶跃信号在跃变处的奇异性为 0,而冲击信号则具有负的奇异性。由此可知,奇异性越大函数越光滑,越小则表示函数在某点处变化越剧烈。

函数 $f(t)$ 的局部 Lipschitz 奇异性与其小波变换系数的关系可以用下面的定理来描述:

定理 令 $f(t) \in L^2(R)$, $[a, b]$ 为 R 上的闭区间, $0 < \alpha < 1$. $\forall \varepsilon > 0$, 则 $f(t)$ 在 $(a + \varepsilon, b - \varepsilon)$ 上一致 Lipschitz 指数为 α 的函数,当且仅当存在一个常数 K 和 $t \in (a + \varepsilon, b - \varepsilon)$, 对 $\forall \varepsilon > 0$, 有

$$|Wf(s, t)| \leq K \cdot s^\alpha. \quad (2)$$

¹ 1996-12-20 收到, 1997-09-11 定稿

若 $\partial W(s,t)/\partial t$ 在 t_0 处等于 0, 称 t_0 为小波变换的模极大值点。则对属于 t_0 的某一邻域内的任意点 t , 有 $|Wf(s,t)| \leq |Wf(s,t_0)|$ 。因此, 对于 t_0 某一邻域内的任意点 t , (2) 式指出当尺度 s 趋于 0 时 $|Wf(s,t)| = O(s^\alpha)$ 。对于奇异点 t_0 , 由于其 Lipschitz 指数小于邻域内其余点的 Lipschitz 指数, 所以当 s 充分接近于 0 时, t_0 处的小波变换绝对值衰减得最慢, 从而 t_0 的邻域内的点 t 收敛到 t_0 且成为模极大值。因此可以利用小波变换的模极大值特性来检测函数的局部奇异性 and 估算 Lipschitz 指数, 并且利用这种局部奇异性可得到信号的一种小波变换模极大值表示方法。

2.2 含噪非平稳信号的小波分析

实际中经常遇到的非平稳信号, 需要分析每个时刻内含有的频率分量。由于这类信号 (如短暂突发信号) 的谱特性沿时间轴无限扩展, 利用 Fourier 变换的基函数很难与其匹配, 且不能区分信号和噪声。而小波变换由于其多分辨特性, 在合适的尺度下原来是非平稳的跳变信号也会呈现出同噪声截然不同的特性。

设噪声是一实的, 方差为 σ^2 的宽平稳噪声 $n(t)$, 则

$$|W_s(n(t))|^2 = \iint n(u)n(v)\psi(t-u,s)\psi(t-v,s)dudv, \quad (3)$$

$$E[|W_s(n(t))|^2] = \iint \sigma^2 \delta(u-v)\psi(t-u,s)\psi(t-v,s)dudv = \|\psi\|^2 \sigma^2 / 2^s. \quad (4)$$

如果 $n(t)$ 为高斯的, 则 $W_s n(t)$ 也是高斯的。对于可微的高斯过程, 其平均过零稠度为 $\{-R^{(2)}(0)\}/[\pi^2 R(0)]$ 。如果过程二次可微, 那么局部极值稠度等于过程微分的过零稠度。由于微分的自相关系数是 $-R^{(2)}(\tau)$, 因此极值平均稠度为 $\{-R^{(4)}(0)\}/[\pi^2 R^{(2)}(0)]$ 。根据

$$R(\tau) = \sigma^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau+u,s)\psi(u,s)du \quad (5)$$

以及模极值数 = 1/2 局部极值 + 过零数, 可得到 $W_s n(t)$ 的模极值数的平均稠度为

$$d_s = \frac{1}{s\pi} \left(\frac{\|\psi^{(2)}\|}{2\|\psi^{(1)}\|} + \frac{\|\psi^{(1)}\|}{\|\psi\|} \right). \quad (6)$$

这表明 $W_s n(t)$ 的模极大值的平均稠度反比于 s , 即尺度越大, 模极大值越稀疏。

白噪声是一种几乎处处都有奇异性的分布。可以证明, 对任何 $\epsilon > 0$, 这样的分布其一致 Lipschitz 指数为 $-1/2 - \epsilon$; 而对于一般非平稳信号, 最坏的奇异性是非连续, 而此时的 Lipschitz 指数为 0。根据 (2) 式, 令 $s = 2^j, j \geq 0$, 那么, 如果函数的奇异性是正的, 其小波变换模极大值随尺度的增大而变大; 如果函数的奇异性是负的, 情况正好相反。由于噪声所产生的 Lipschitz 指数是负的, 因此观察连续尺度上小波变换的极大性可以区分它们是由白噪声还是由信号所产生的。如果小波变换模极大值处的幅度随尺度减小而急剧增大, 这表明所对应的 Lipschitz 指数是负的, 它由噪声产生, 应予消除。在信号具有正 Lipschitz 指数处, 有时叠加了更大的噪声的负 Lipschitz 指数, 从数学上讲, 此处信号与噪声的和有负的 Lipschitz 指数。但是如果信号确定的奇异点处的幅值比噪声要大, 则在大尺度时, 信号产生的模极大值就可以从噪声产生的模极大值中区分出来, 且当尺度减小时, 它们的幅值增长很少。因此, 当在小波变换微分的过零点处, 删除那些随尺度减少而幅值平均增长的所有极大点, 或者不传递到大尺度上的极大点之后, 就达到了去噪声的目的。

3 多分辨分析下的一维距离象特征提取和快速匹配方法

3.1 二进小波变换的距离象多分辨分解

根据多分辨分析理论和文献 [1] 证明, 任何一个能量有限的离散信号, 都可看成是连续信号在尺度 1 时低通滤波分量的均匀采样, 即

$$Sf(1, n) = dn, \quad (7)$$

其中 $\{dn\}$ 表示能量有限的一维离散信号序列。相应地将 $\{\{Wf(2^j, n)\}, \{Sf(2^j, n)\}; 1 \leq j \leq J, n \in Z\}$ 称为离散信号 $\{Sf(1, n) = dn\}$ 的有限尺度多分辨分解表示。图 1 给出了一幅坦克一维距离象的小波多分辨分解结果, 其中图 1(a) 为原始信号; 图 1(b) 为模糊分量; 图 1(c) 为细节分量, 分辨率层数 $J = 4$ 。

3.2 目标结构特征的多分辨描述

理论计算和实验测量均表明, 在光学区, 目标散射不是全部目标表面所贡献的, 目标总的电磁散射可以认为是某些局部位置上的电磁散射的合成, 这些局部性的散射源通常被称为等效多散射中心, 或简称多散射中心。雷达技术的发展, 使得人们能够利用宽带信号技术来获得目标散射中心在径向距离上的高分辨, 实现对目标多散射中心的孤立。因而在光学区, 许多雷达目标的散射特性可以用一组散射中心来近似, 通过对散射中心的分析可获得目标的精密结构特征描述。散射中心一般在距离象中表现为信号的突变点。

根据前文的论述, 小波变换的模极大值对应信号的突变(奇异)点。图 1 也表明了这一点。通过观察还可发现, 信号的正突变点对应小波变换的极大值点; 负突变点对应小波变换的极小值点。并且, 由于非平稳信号中噪声与信号的不同小波变换特性, 使得在尺度较大时, 信号的小波变换模极大值占优。因此, 距离象的多分辨分析反映了目标的结构特征。

3.2.1 散射中心的多分辨描述法 一般地, 认为在距离象的多分辨分解中, 当 $2 \leq j \leq 4$ 时, $Wf(2^j, n)$ 的极大值点基本上是目标的散射中心的反映。但如果某极大值点与其左右两边相邻的极小值点的差值都小于门限 T 时, 则认为该极大值点由噪声引起, 应予去除。门限 T 主要取决于信号的幅度、信噪比和所选用的尺度。一维距离象在处理之前都进行功率归一化, 所以门限 T 主要由信噪比和尺度决定。这样, 可以获得不同的分辨率下散射中心的数目。

3.2.2 径向长度的多分辨描述法 散射中心并不代表目标上的孤立点, 而往往是目标上多个散射体的合成, 它本身就反映了目标的一定径向长度。因此, 如果目标的多分辨散射中心数目等于 1 时, 则认为目标在该分辨率下的径向长度等于 m (在本文的实验研究中, 令 m 等于 4 可以获得最佳性能); 如果目标的多分辨散射中心数目大于 1 时, 则认为目标在该分辨率下的径向长度等于相隔最远的两个散射中心之间的距离加上 m 。

3.3 距离象间的多分辨立体相异度估算

设 $N(2^j, f)$ 、 $L(2^j, f)$ 分别为距离象 f 在分辨率 2^j 下目标的散射中心数目和径向长度。 $2 \leq j \leq 4$ 时, 则距离象间的多分辨立体相异度 $D(f_1, f_2)$ 可定义为

$$D(f_1, f_2) = \sum_{2 \leq j \leq 4} A_j |N(2^j, f_1) - N(2^j, f_2)| + \sum_{2 \leq j \leq 4} B_j |L(2^j, f_1) - L(2^j, f_2)|, \quad (8)$$

其中 A_j 、 B_j 是加权常数。

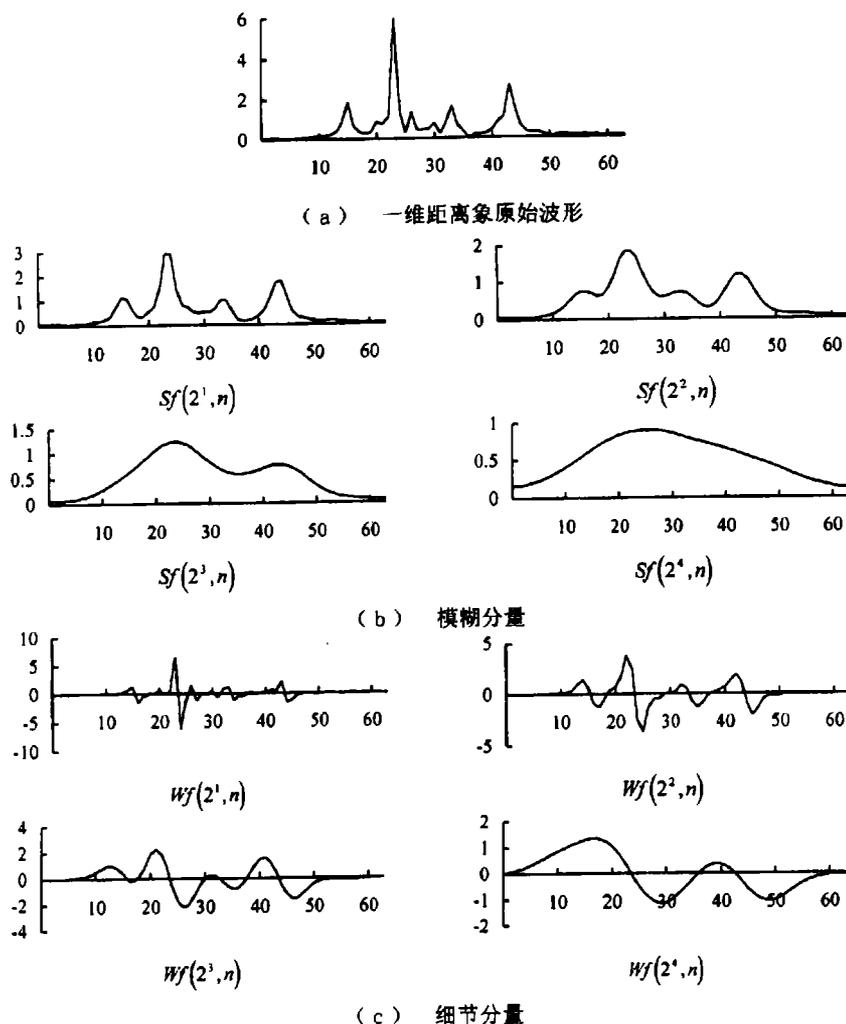


图1 一维距离象小波分解 (图中横坐标为目标径向距离, 纵坐标为距离象幅度)

距离象的相异度反映了距离象间的差异程度, 如果相异度为 0, 那么就认为两幅距离象是完全相同的。

3.4 基于距离象目标识别的快速匹配法

在建立目标全姿态角距离象数据库时, 把目标结构特征的多分辨描述当作每幅特征距离象的“目录”和距离象一起存到数据库中。这样, 在进行目标识别时, 可以先用数据库中每幅特征象的“目录”算得与未知目标距离象的相异度。找出所有相异度小于某个门限的特征象, 然后用相关匹配准则^[2]进行目标识别。由于距离象的相异度估算只是几个简单的乘加运算, 而根据距离象的相异度可以极大地缩小目标相关匹配的搜索空间, 从而达到了目标识别的快速匹配。

4 实验研究结果

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, 每组数据为 904 点。实验中把每组 904 点数据补 0 至 1024 点, 然后经过 IFFT 获得目标的一维距离象。用二进小波变换算

表 1 识别结果统计表

目标类型	坦克	装甲车	卡车	吉普车
坦克	60	2	1	0
装甲车	3	17	1	1
卡车	1	2	12	2
吉普车	1	0	0	11
正确识别率	92.3%	80.9%	85.7%	78.6%

得每幅距离象的多分辨特征, 建立目标模式库。识别时, 对任意一幅未知距离象, 用其多分辨特征算得与模式库中的所有距离象的相异度, 如果相异度大于预先设定的门限值则略过; 如果相异度小于门限, 则求其相关, 相关值最大的那类目标即判为未知目标的种类。最后的总识别率见表 1。

参 考 文 献

- [1] Mallat S. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models. IEEE Trans. on ASSP, 1989, ASSP-37(12): 2091-2110.
- [2] 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]. 国防科技大学研究生院, 1997.

RESEARCH OF MULTI-RESOLUTION FEATURE DESCRIPTION
AND FAST MATCHING FOR RADAR TARGET ONE
DIMENSIONAL RANGE PROFILES

Zhang Liang He Songhua Zhuang Zhaowen Guo Guirong

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

Abstract This paper, at first, expounds the relation between the singular signal and the modular maximum for wavelet transform, and the different features of signal and noise in wavelet transform. Then, in the light of high-resolution radar target one dimensional range profiles, it is decomposed in multi-resolution and the multi-resolution feature description are obtained. According to the multi-resolution feature description of radar target, the conception of difference degree for the range profiles is defined. Using the difference degree, the fast matching for target recognition can be obtained.

Key words Wavelet transform, Radar target recognition, Range profiles, Feature description

张 亮: 男, 1969 年生, 博士, 从事目标识别理论算法、信号处理软硬件开发和并行实时处理等研究工作。

何松华: 男, 1964 年生, 副教授, 现从事目标识别、信号处理等领域的理论算法研究工作。

庄钊文: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 现从事目标识别、模糊信息处理方面的研究工作。

郭桂蓉: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 现从事目标识别、信号处理、模糊数学方面的研究。