

308-312
⑬

小波变换在毫米波雷达目标识别中的应用*

陈明奇

(北京邮电大学信息安全中心, 北京, 100876)

娄国伟 李兴国

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

TN957.51
TN957.52

摘要 将小波分析引入了毫米波雷达目标识别中, 提出了基于小波分析的能量特征矢量法. 该方法结合小波分析和毫米波信号的特点, 克服了传统方法的局限, 提高了毫米波雷达的目标识别性能, 获得了仿真试验良好的识别结果, 并具有简便高效的优点.

关键词 小波变换, 毫米波雷达, 目标识别.

图像处理

引言

提高毫米波雷达的目标识别性能是提高精确制导武器系统战斗力的关键之一. 传统的毫米波目标识别技术往往是基于付氏分析的, 其缺点是只能获得整个信号的频谱, 难以获得信号的局部频谱. 但实际上, 在许多情况下, 我们往往更关心信号的局部特征. 虽然加窗付氏变换可在一定程度上弥补这一不足, 但对于毫米波雷达回波信号这样的突变信号和非平稳信号仍难以获得较理想的结果.

近年来, 小波分析(Wavelet Analysis)理论已经引起了众多领域专家的关注. 目前, 小波分析在信号与图像分析, 地震信号处理, 计算机视觉与编码, 语音合成与分析及信号的奇异性检测与谱估计等方面都取得了很多成果^[1]. 对于毫米波目标识别的应用, 小波分析则不仅保持了传统付氏分析的直观简便的优点, 同时, 也弥补了付氏分析的不足. 小波分析在时域频域都具有良好的局部(Localization)性质, 适于分析突变信号及非平稳信号, 它具有可变的分辨率, 还可对信号进行整体至局部的分析, 这正是我们所期望的性质. 因为毫米波雷达的目标回波具有突变信号及大量平稳信号的特征. 基于上述对小波分析与毫米波雷达信号关系的认识, 我们提出了基于小波变换的毫米波雷达目标识别, 得到了满意的结果, 并与时域波形编码技术, 目标中心识别技术及最佳辨识矢量算法等目标特征提取方法进行了比较.

本文介绍了小波变换及其实现算法, 从理论上分析探讨了基于小波分析的毫米波雷达目标识别的优势. 为了克服传统目标识别方法的局限, 结合考虑了小波分析和毫米波信号的特点, 提出了基于小波分析的能量特征矢量法, 并给出了分析实例及结果.

* 国防科技预研基金(编号: 95 J5. 1. 3. BQ0208)资助项目
稿件收到日期 1997-10-22, 修改稿收到日期 1998-04-20

1 小波变换及其实现

1.1 小波变换

与付氏分析类似,根据信号域与变换域的不同,小波变换可分为连续小波变换(CWT),小波级数变换(WST)与离散小波变换(DWT)^[2].CWT 在理论上具有重要地位,其定义为:

$$CWT_x(a,b) = \int_R x(t)\Psi_{a,b}^*(t)dt, \quad (1)$$

式(1)中 $x(t) \in L^2(R)$, $\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2}\Psi(\frac{t-b}{a})$, * 为取共轭运算, $a \in R - \{0\}$ 为尺度因子, $b \in R$ 为时移因子, $\Psi(t)$ 为母小波函数.

$$C_\Psi \doteq \int_R |\Psi(\omega)|^2/\omega d\omega < \infty, \quad (2)$$

式(2)中, $\Psi(\omega)$ 为 $\Psi(t)$ 的付氏变换.我们称式(2)为允许条件(Admissible condition).母小波函数在满足该条件时才有理想恢复式成立.即存在逆连续小波变换(ICWT):

$$x(t) = C_\Psi^{-1} \iint_{RR} CWT_x(a,b)(t)/a^2 da db. \quad (3)$$

由于信号的 CWT 是高度冗余的,所以,我们能以一定方式对(a,b)平面进行采样,从而得到 WST 和 DWT.但 WST 是计算 CWT 的采样系数,这涉及到模拟信号的积分运算,不便于在计算机上实现,而 DWT 的输入输出都是离散的,并且可采用 Mallat 算法,易于在计算机上实现,因此,DWT 在实际中得到广泛的应用.

1.2 小波变换的实现

S. Mallat^[3]提出的多分辨分析实质是小波变换在信号处理中一种具体实现方法.由文献[3]定义的一组多分辨分析空间:

$\dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \dots$ 存在函数 $\varphi(x) \in V_0$,使集合 $\Phi_m = \{\varphi_{m,n}(t) | n \in Z\}$ 构成 V_m 的标准正交基,式中 $\varphi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\varphi(t-n2^{-m})$,我们称 $\varphi(t)$ 为尺度函数.由 $\varphi(t)$ 可导出函数 $\Psi(t)$,对于给定的 $m \in Z$,可以证明集合 $\Psi_m = \{\Psi_{m,n}(t) | n \in Z\}$ 构成 V_m 的正交补空间 W_m 的标准正交基,其中: $\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\Psi(t-n2^{-m})$,即 $\Psi(t)$ 为小波函数.

从实际实现的角度看,实现多分辨分析的分解和综合算法的关键在于实现由 $\varphi(t)$ 决定的低通滤波器 $H(\omega)$ 及由 $\Psi(t)$ 决定的高通滤波器 $G(\omega)$.通常采用的 Mallat 分解和综合算法如图 1 所示. $A_j f$ 为信号序列 $f(n)$ 在空间 V_j 上的逼近信号, $D_j f$ 则表示由 $A_j f$ 再投影到 $A_{j+1} f$ 时所损失的细节信号.(图 1 中的 $2\downarrow$ 为从相邻的两个样本中取一个样本; $2\uparrow$ 为在相邻的两个样本中插入一个零值样本.)

1.3 毫米波雷达目标识别中的应用

毫米波雷达目标识别探讨的课题是如何从视频信号中提取更多的有助于目标识别的信息,实质是一特征识别问题.我们首要的任务便是提取特征,因此,特征的提取采用何种算法,对识别性能的好坏影响很大.我们提取的特征应能反映目标的本质特征,同时具有一定的稳定性.从目标识别的角度看,毫米波雷达的回波信号经混频器混频和后级的零中频处理

后的输出信号即为待处理的视频信号,它具有以下特点:

(1) 毫米波雷达收到的回波信号应视为具有局部特征的有限个等效散射中心所组成的分布式目标. 散射中心一般位于目标物体的边缘,拐角和联接处,反映在目标回波的前后沿及顶部上. 目标特性可以表征为各个散射中心在目标物体上的空间分布及其散射面积的相对关系. 我们说毫米波雷达回波信号中含有了目标的精细结构信息,正是这些局部的精细结构信息反映出了目标的本质特征. 如果能从回波信息中重现目标散射中心的分布与截面积的关系,这样我们就能够获得目标的本质信息. 但是,基于传统的付氏分析的方法则在这方面性能的改善是有限的. 相比之下,小波变换在这方面就有相当大的优势,因为它具有较好的时频局部性,有助于从回波中提取出重要的局部信息特征.

(2) 毫米波雷达的回波随时间,气候,状态,背景的变化而变化(即使是目标的数量,距离,方位保持不变),因此,我们可以把它们看作一种非平稳过程. 从特征提取的角度看,非平稳信号的粗略形状(长时间行为)和波形变化较大点(短时间行为)包含了信号的主要特征,因此,区分目标回波信号在突变状态下表现出的与时间密切相关的形态对目标识别具有重要作用. 小波变换可通过小波变换系数反映且描述突变信号.

我们采用的小波基是 Daubechies 小波,它是一类紧支正交小波,可将信号分解至多个相交的子空间,这避免了得出的特征之间的相关性,有利于我们得到较好的特征量. 另外,还具有充分光滑和较好的局部性.

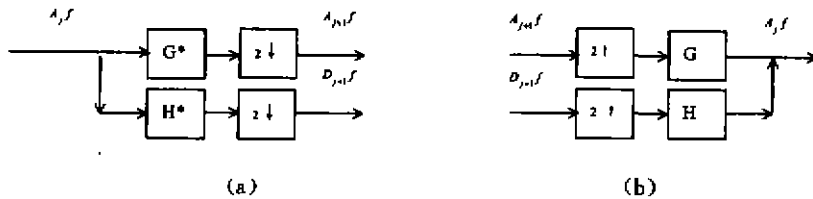


图 1 Mallat 分解及综合算法

(a) 分解算法 (b) 综合算法

Fig. 1 Mallat decomposition algorithm and synthesis algorithm

(a) decomposition algorithm (b) synthesis algorithm

2 实例分析

我们所分析的信号均是毫米波雷达回波的视频信号的采样,经过一定的预处理(如:归一化及去除时移因子等)后得到的.

2.1 特征提取

图 2 中的原始信号为典型的毫米波信号采样序列(采样长度为 256 点). 为了看出我们所关注的信号中反映的目标局部特征的信息对应于小波变换后得到的哪一级细节信号,我们分别令分解结果中的某一级细节信号为零,其余的保持不变,然后再重建信号,观察重建信号的变化. 图 2 中的重建信号 1 是令 $D_2 f$ 为零时所得的重建信号,重建信号 2 是令 $D_3 f$ 为零时所得的重建信号.

从图(2)中可看出,重建信号为 1,2 的前,后沿及顶部均有较大的畸变,我们不难得出结论:前,后沿及顶部的时域信息主要反应在相应的细节信号中. 这也证明了小波变换的确能

分析局部特征,即各级分辨率不同的信号反映了不同的时域局部特征.因此,我们可认为每级细节信号的能量值即代表了信号在该尺度空间上的变化程度.另外,考虑到逼近信号中包含了关于波形的总体信息,其能量大小反映了瞬态信号波形整体的信息.于是,我们可构造出如下的小波特征矢量:

$$\vec{E} = \{E_i | i = 1, 2, \dots, J, J = [\log_2 N]\}, \quad (4)$$

式(4)中, E_i 为小波分析后所得各级信号的能量, N 为输入信号序列的长度, J 为小波分析所输出的各级信号的总数.采用小波分析提取出的能量分布矢量作为特征矢量还有如下优点:可以不考虑瞬态信号有时移的情况,而且抗噪能力较强,这对实际应用十分有利.

2.2 识别结果

在引入小波分析提取出能量分布特征矢量后,我们进行了目标识别分类,以检验能量特征矢量区分目标的能力.我们从毫米波雷达得到三种模拟目标的回波信号(见图3).各取这三种目标的20条样本曲线,对每条样本曲线利用离散小波变换实现对他们的小波分析,计算出它们对应的各级细节信号和逼近信号的能量.然后,我们根据得到的能量特征矢量对目标进行分类.目标的识别分类法有很多种,考虑到实际应用中要求所采用的算法应尽量简单而有效.我们采用物理意义清楚,运算简单的最近邻域法.在毫米波雷达目标识别中应用小波分析提取能量特征矢量所得出的结果见表1.

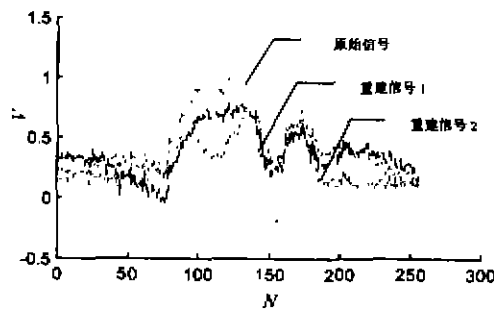


图2 毫米波信号的分解与重建
Fig. 2 decomposition and reconstruction of MMW signal

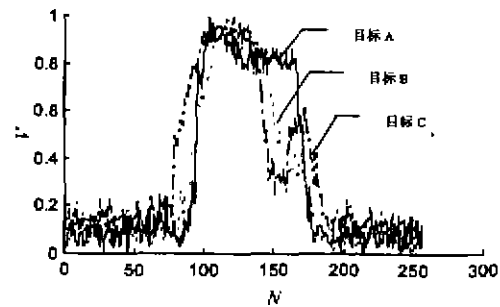


图3 三类目标的毫米波信号
Fig. 3 MMW signal of the three kinds of targets

表1 三类目标的能量特征矢量及识别结果

Table 1 Energy characteristic vectors and recognition results of three kinds of targets

目标	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	识别率/(%)
A	0.2114	0.1415	0.1085	0.6214	1.4061	6.3074	11.7381	95
B	0.2495	0.1548	0.1005	0.1854	0.4549	7.9950	9.2399	85
C	0.2104	0.1186	0.1587	0.1573	1.5692	5.1842	9.3987	90

表1结果表明:能量特征矢量可准确地区分不同的毫米波雷达目标,是一种性能较好的特征矢量.以前所采用的时域波形编码技术,目标中心识别技术及最佳辨识矢量算法等目标特征提取方法都有一定的不足之处,时域波形编码技术存在最优码字的选择问题,而且码字优化程序直接影响提取的特征量的稳定性及识别准确度;目标中心识别技术提取目标特

征时需要已知距离信息;最佳辨识矢量算法只适用于低分辨率雷达的时域波形特征提取;相比之下,基于小波分析的目标识别方法无需先验信息,稳定性较好,抗噪声能力较强,运算简便,是一种较好的毫米波目标识别方法.

3 结语

小波分析的理论和方法已有了多篇文献讨论,但是,要在毫米波雷达目标识别中实际应用,则还必须解决如下问题:怎样使小波变换提取的目标特征在目标方位,距离及毫米波雷达的俯仰角变化时仍保持相对稳定,这些问题还有待于进一步的研究解决.另一关键是在利用小波分析的固有特点来刻画出瞬态信号的本质特点,因此,我们必须关注的一个问题是:如何构造出具有某些特殊性质的小波函数,而这个小波函数能更方便地刻画出所要分析的信号的性质,以更好地解决实际应用中的问题,但是现有的许多成果大多数是关于信号的逼近或重建问题的最佳小波的构造方法.然而,在毫米波目标识别中,这些“最佳小波”却不一定是最好的,这个问题的解决还有待于数学家及工程技术专家的努力.

REFERENCES

- 1 QIAO Li-Cheng, BAO Zhen. *Acta Electronica Sinica*(焦李成,保铮.电子学报),1993,21,91~96
- 2 Daubechies I. *Comm Pure and Applied Mathematics*,1988,41: 909~996
- 3 Mallat S. *IEEE Trans. PAMI*,1989,11: 674~693
- 4 Mallat S. *Trans. Amer Math Soc*,1989,315,69~87

APPLICATIONS OF WT TO TARGET RECOGNITION OF THE MMW RADAR*

CHEN Min-Qi

(Information Security Center, Beijing University of Posts and Telecoms, Beijing 100876, China)

LOU Guo-Wei LI Xin-Guo

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

Abstract . Wavelet Analysis was introduced into the target recognition of MMW radar, and the scheme of energy characteristic vector was proposed based on the wavelet analysis, which combines the properties of the wavelet analysis and MMW signal of target, overcomes the shortcomings of the traditional methods and improves the target recognition performance of the MMW radar. And it also can be easily and efficiently realized. At last, satisfactory results were achieved.

Key words wavelet transformation, MMW radar, target recognition.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence
Received 1997-10-22, revised 1998-04-20