

毫米波辐射图像的融合研究

张光锋, 张祖荫, 郭 伟

(华中科技大学 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:微波辐射计具有全天时全天候的工作能力, 可提供红外、可见光不能提供的信息。然而提高微波辐射图像的质量是一个急需解决的关键问题。针对简单场景, 研究了波段相差极大的多传感器图像的融合算法, 提出利用小波变换将基于光学的模拟毫米波图像和实测毫米波辐射图像的相关信息融合, 合成的图像可作为精确制导中地图匹配的标准地图。仿真结果表明: 融合图像包含了模拟图像和实测图像的更多互补信息, 在一定程度上提高了图像的分辨率。

关键词:辐射图像; 高分辨率; 模拟图像; 图像融合; 小波变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0545-04

Fusion for millimeter wave radiometric images

ZHANG Guang-feng, ZHANG Zu-yin, GUO Wei

(Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Because of work at all day and all weather, radiometer can provide the specific information which infrared and optical detectors can't provide. However it is urgent to improve the image resolution. On basis of studying the fusion algorithm for multisensor, a new approach to fuse the millimeter wave measuring image and optical-based simulated image by wavelet transform is presented. The simulation result shows that fusion image has more complementary information than the measuring image and possesses higher resolution as guidance matching map.

Key words: Radiometric image; High resolution; Simulated image; Image fusion; Wavelet transform

0 引 言

由于微波辐射探测器具有全天时、全天候的工作能力, 可以提供红外和可见光探测系统不能提供的信息, 而且设备简单, 易于集成, 所以在军事制导中得到

了广泛的应用, 一个重要应用方式是基于地图匹配技术的精确制导^[1]。这种方式是利用弹载微波辐射探测器测得的图像和弹上存储的微波辐射图像不断进行相关匹配, 以达到精确制导的目的。然而受侦察手段的限制, 目前比较容易得到相关的光学侦察图像, 而光学图像和微波辐射图像又具有很大的差异, 采用

收稿日期: 2003-10-17; 修订日期: 2003-12-12

作者简介: 张光锋(1975-), 男, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事毫米波辐射成像技术和微波辐射图像处理的研究, 已发表论文 10 余篇。

常规的特征提取和匹配技术很难对其进行处理,其巨大的工作量也不利于工程化实现。可见光得到的信息取决于物体表层分子的谐振特性,而微波辐射图像所获得的信息取决于物体的几何特性和介电特性,将微波辐射图像与可见光图像进行数据融合,可以获得地物多层次信息,进一步揭示地物的本质特征^[2]。一种可行的方法就是首先利用光学图像模拟生成微波辐射图像,再利用微波辐射模拟图像与弹载微波辐射探测器实测的图像进行相关图像信息的融合,合成的图像可作为地形匹配的基准地图。

1 图像融合的基础

1.1 模拟微波图像的生成技术

光学图像反映的是地物在光波段的反射特性,不仅与地物的特性有关,还与光源的位置、强度等有关;而微波辐射图像反映的是地物在微波频段的辐射特性,它们之间有很大的差异,不可能找出它们之间的直接变换关系,因此只能分两步走。首先将已知的光学图像分割成不同类型的区域并分析这些区域究竟代表哪些地物类别,然后根据其在微波频段的辐射特性,计算出亮度温度及视在温度,再根据天线方向函数求得天线温度后,才能生成一幅比较“逼真”的微波辐射图像。对简单场景(可近似为平面的场景),一种可行的方法是:先将光学图像分割成不同的区域并分析其地物类别,然后根据其在微波频段的辐射特性,计算出亮度温度及视在温度,并由天线方向函数求得天线温度后,即可生成微波辐射图像^[3]。但是,这种方法只适用于平坦的地物,对于复杂场景就不适用了。对于复杂场景,需要在简单场景辐射图像模拟生成方法的基础上,利用由单幅图像获得物体表面形状的技术,从可见光图像中得到地物的表面方向,进而生成复杂场景的微波辐射图像^[4]。具体的方法请参阅参考文献[1]、[3]、[4],在此不作赘述。

在研究卫星光学图像模拟生成微波辐射图像时,为了评估生成图像的质量,需将生成的图像和实测的图像进行比较,而获得同时同地的卫星光学图像和微波辐射图像很困难。由于照相机和地基微波辐射计分别与星载光学摄影仪器和星载或机载微波辐射计的成像原理基本相同,而用照相机和地基微波辐射计

又可以很容易获得同时同地的光学图像和微波辐射图像,因此用照相机和地基微波辐射计作为获取同时同地的可见光图像和微波辐射图像的手段。进而可以研究光学图像、实测的微波辐射图像与模拟生成的微波辐射图像的差异,通过图像融合技术找到实现高分辨率图像的途径。在微波辐射图像的模拟生成和图像的融合过程中将利用小波变换的理论和方法来提高图像的分辨率。

1.2 小波变换和 Mallat 算法

小波变换是用一簇函数信号去逼近一信号,此一簇函数称为小波函数系。它是由基本小波函数在不同尺度下经平移和伸缩构成的。若记基本小波函数为 $h(x)$, 伸缩和平移因子分别为 a, b , 则小波是一个满足条件的函数通过平移和伸缩而产生的一个函数簇 $h_{a,b}$:

$$h_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} h\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

式中 h 通常称为基本小波。令 $L^2(R)$ 为可测的、平方可积函数 $f(x)$ 的矢量空间, R 为实数集, 对于任意的 $f(x) \in L^2(R)$, 连续小波可定义为:

$$W_{a,b}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_{a,b}(x) f(x) dx = |a|^{-\frac{1}{2}} \times \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) h\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

写成内积形式, 即有:

$$W_{a,b}(x) = \langle f(x), h_{a,b}(x) \rangle \quad (3)$$

它对应于 $f(x) \in L^2(R)$ 在函数簇 $h_{a,b}$ 上的分解, 需满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx = 0$ 。函数 $h(x)$ 可以描述为一带滤波器的脉冲响应。因此小波变换公式(2)和(3)可以描述为函数 $f(x) \in L^2(R)$ 通过一带滤波函数的输出, 且具有频率放大作用。

小波变换为信号分析提供了一种新工具, 但有应用意义的是离散二进小波与正交镜像滤波器(QMF)的巧妙结合, 它是小波变换的核心。在 Burt 和 Adelson 图像分解和重建的塔形算法的启发下, 基于多分辨率分析框架, Mallat 建立了离散正交小波的一种快速算法——Mallat 算法, 通过与 QMF 的卷积可以分解或重建给定的信号。小波的分解与重建过程如图 1 所示。

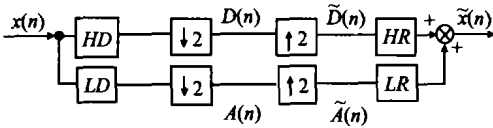


图 1 小波的分解和重建过程

Fig. 1 Decomposition and reconstruction of wavelet

1.3 图像的融合理论

传统的金字塔多传感器图像融合方法主要是高斯-拉普拉斯金字塔结构,而基于小波变换的图像融合是利用小波将原始图像分解到一系列的频率通道中,再利用金字塔结构在不同特征域进行融合。设小波变换金字塔的分解层数为 N ,分别使用融合算子作用于各源通道图像小波金字塔最底层的低频和高频,获得融合图像的最顶层。对该层融合金字塔进行小波逆变换,得到最顶层的融合图像。将该层融合图像作为 $N-1$ 左上角层的数据,即 $N-1$ 层的低频部分。用融合算子作用于第 $N-1$ 层,取其值的高频部分作为第 $N-1$ 层的高频部分。依此类推,直到得到最终融合图像。小波变换的层数越多,顶层融合损失的信息量越大,因此基于小波分解的层数不宜过高,一般 N 取 3。

通常的图像融合是指将来自不同探测器的图像进行合并,以得到一个更为完整的图片或场景。图像融合的主要目的是通过对多幅图像间的冗余数据的处理来提高图像的可靠性,通过多幅图像间的互补信息的处理来提高图像的清晰度。图像融合示意图见图 2。

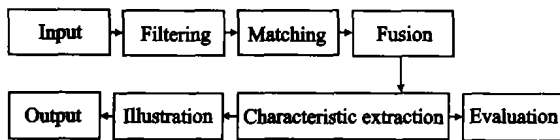


图 2 图像融合模型

Fig. 2 Image fusion mode

图像融合的处理过程一般可以概括为:图像预处理,如去除噪声、图像配准等;确定图像的融合算法;抽取特征、辨识、图像理解等。将图像融合效果的评价信息加入到融合规则的选取和参数的选择过程中,可以更充分地利用信息源提供的信息,得到更好的融合效果^[5]。

2 基于小波的融合算法

多分辨率小波分析是一种典型的时域/频域分析工具。它可以把信号分解到更低分辨率水平上,这一级的信号表示由低频的轮廓信息和原始信号在水平、垂直和对角线方向高频部分的细节信息组成,而且每一次分解均使信号的分辨率变为原信号的 $1/2$,如图 3 所示。这样就能使人们很容易找到变换后的小波系数和原始图像内容在空间和频率域两方面的对应关系。近年来多分辨率小波分析方法已被广泛地用于多传感器图像数据的融合之中,而且这种方法最大限度地保留了低分辨率图像的原始信息。

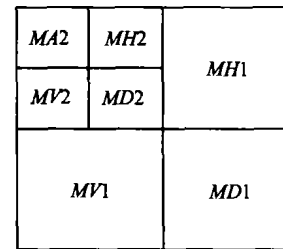


图 3 小波分解的示意图

Fig. 3 Decomposition components of wavelet

基于像素的融合规则在融合处理时表现出对边缘的高度敏感性,使得在预处理时要求图像严格对准,加大了预处理的难度。基于窗口的融合规则由于考虑了与相邻像素间的相关性,降低了对边缘的敏感性,但是如何选择窗口成了这种融合规则的难点,这要求所选窗口的小波系数有较大的相关性,否则无法发挥出该方法的优越性。将图像看作是由不同灰度等级的区域构成的,而物体的边缘表现为灰度差。边缘反映了图像的细节特征,包含有价值的目标边界信息,由边缘信息可以进行图像的定位、识别、滤波等操作。提取出源图的边缘作为参考,围绕边缘建立融合的窗口($N \times N$),然后结合区域内的图像信息,应用基于窗口的融合规则进行融合处理。本文采用的是基于小波变换的图像融合,主要包括以下的步骤:

(1) 首先对高低分辨率图像进行配准,由于两幅图像是在同一位置获得的,特征点从山的边缘选取。通常配准的精度要求在 1pixel,但是在实际工程中,可以适当地放宽。在文中,模拟微波辐射图像源于光学图像,和辐射计的采样精度一致,由于照相机和辐射计所获得的场景范围不同,故需要对模拟图像作适

当的剪裁,应以实测辐射图像的范围为准。

(2) 分别对两幅微波图像取 N 次小波变换。考虑到模拟图像和实测图像的分辨率较低,对模拟图像进行 3 次小波变换(sym4 小波),同时对测量图像进行 3 次小波变换,分别得到各自的高频和低频细节纹理图像。

(3) 利用模拟图像的高频分量代替(实际应用中采用的是叠加的方法)测量图像的高频分量,这样可以充分利用模拟图像的高频特性,生成一幅混合图像。

(4) 对混合图像进行小波逆变换,经图像增强等处理后得到最终的融合图像。

不同融合方法的结果可以用目视判别。优点是直接、简单,可根据图像处理后的对比作出定性评价,缺点是主观性较强。为了客观定量评价融合效果,对融合图像包含的信息进行了分析。不同融合方法的结果,可以用熵、交叉熵、平均梯度、标准偏差等来定量描述^[6]。具体到本文,考虑到微波图像与可见光图像包含的信息差别很大,所以采用定性的直接观察方法。



图 4 光学图像
Fig. 4 Optical image



图 5 模拟微波辐射图像
Fig. 5 Simulated microwave radiometric image

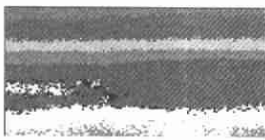


图 6 实测微波辐射图像
Fig. 6 Actual microwave radiometric image



图 7 融合的图像
Fig. 7 Fusion image

3 结果分析

成像用的 8 mm 地基微波辐射计的 3 dB 波束宽度为 1.5° ,采样间隔为每波束 4 个点。成像的天气条件为:大气温度 20°C ,晴天,地面水蒸汽密度为 7.5 g/m^3 ,大气压 $P_0 = 1.013 \times 10^5\text{ Pa}$ 。模拟成像采用了与实测成像相同的天气参数。为简化处理,模拟成像时假定地物温度与大气温度相同。

光学图像生成的模拟微波辐射图像存在以下缺点:由于是根据地物场景“计算”出的图像,场景的轮

廓不够清晰,尤其山间的建筑因树木的遮掩而不够清晰,因此地物层次的可视程度直接影响了生成的图像,如图 4 和图 5 所示。而由图 6 可看到实测微波辐射图像有天空温度分层的现象,景物之间的距离不够清晰,天线到远端的距离层次不能很好地显现出来。根据图 7 融合的结果,可以得出以下的结论,融合图像具有比模拟微波辐射图像和实测微波辐射更多的有用信息;去掉了实测微波辐射图像中天空温度的分层现象;较清晰地显示出山间的建筑,较清楚地凸显出从天线到山之间的树木的距离层次。

4 结束语

微波辐射图像与源于光学图像的微波模拟图像的融合可以提供更多的有用信息,以弥补微波辐射图像本身低分辨率的固有缺陷。利用本文的方法可以在一定程度上改善微波辐射图像的质量。基于微波辐射图像和光学模拟图像的融合没有现成的标准,在图像的融合过程中还存在许多亟待解决的问题:(1) 图像的配准,由于波段的差异,光学图像和微波辐射图像具有明显不同的成像机理,反映的信息也存在较大差别,因此图像的配准是一个需要研究的重要问题。(2) 图像的评价方法,融合图像的评价方法需要结合具体应用的情况。对于本文,应以测量的微波图像为标准,判断融合图像增加的信息是否可以接受,具体的客观量化评价准则需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 黄全亮,张祖荫,郭伟. 地基毫米波辐射图像模拟生成方法研究[J]. 红外与毫米波学报,2002,21(6):339-442.
- [2] 陈东,李飏,沈振康. SAR 与可见光图像融合算法的研究[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(9):93-97.
- [3] Huang Quan-liang, Zhang Zu-yin, Wei Guo. Approach to generate radiometric images[J]. Int J Infrared & Millimeter Waves, 2001,22(12): 1805-1811.
- [4] 黄全亮,张祖荫,郭伟. 复杂场景微波辐射图像的模拟[J]. 红外与激光工程,2003,32(1):87-91.
- [5] 陈勇,皮德富,周士源,等. 基于小波变换的红外图像融合技术研究[J]. 红外与激光工程,2001, 30(1):15-17.
- [6] 陶观群,李大鹏,陆光华. 基于小波变换的不同融合规则的图像融合研究[J]. 红外与激光工程,2003,32(2):173-176.