

一种像素级多传感器图像融合算法的研究¹

赵 巍 毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

摘 要 该文给出了一种像素级多传感器图像融合算法,并将其应用于不同波段 SAR 图像的融合。该算法先用基于卡尔曼滤波的图像融合技术得到一幅灰度融合图像,再用不同的 RGB 颜色通道分别表示灰度融合图像以及原图像中增强后的细节,最终得到一幅彩色融合图像。仿真结果表明,用此算法得到的彩色融合图像包含更多的细节,可辨识性强。

关键词 像素级图像融合, 灰度融合图像, 彩色融合图像, 卡尔曼滤波

中图分类号 TP391, TN911.73

1 引 言

多传感器图像融合属于多传感器信息融合的范畴。多传感器信息融合指的是将不同性质的多个传感器在不同层次上(也就是不同尺度上)获得的关于同一事物的信息、或同一传感器在不同时刻获得的同一事物的信息综合成一个信息表征形式的处理过程。相对于单传感器系统,多传感器系统具有信息冗余、信息互补、覆盖时间长和花费低等特征,所以多传感器信息融合系统可以在更短的时间内,用更小的代价获得关于目标更精确的信息^[1]。多传感器图像融合系统是针对于图像信息的多传感器信息融合系统。由于图像信息的可视性,多传感器图像融合技术的应用越来越广泛,关于图像融合的公开文献也越来越多见。

根据信息表征层次的不同,一些学者将图像融合分为 3 个层次:像素级图像融合、特征级图像融合和判决级图像融合^[1,2]。像素级图像融合指的是直接对各幅图像的像素点进行信息综合的过程。特征级图像融合是对图像进行特征抽取后,将边沿、形状、轮廓等信息进行综合处理的过程。而在进行判决级图像融合之前,每种传感器已独立地完成了决策或分类任务,融合工作实质上是做出全局的最优决策。相对于其它两个层次,像素级的融合图像所包含的信息量最大,最利于识别。

本文介绍的算法就是基于像素级的多传感器图像融合技术。在目前的图像融合技术中,大部分方法给出的融合图像是灰度图像。而人眼在灰度图像中只能同时区分出由黑到白的十多种到二十多种不同的灰度级,人眼对彩色的分辨率则可达几百种甚至上千种。基于这一事实,本文将灰度图像融合技术和彩色显示技术相结合,提出了一种基于像素级的多传感器图像融合算法,该算法先用灰度图像融合技术将两幅原图像融合成一幅灰度图像,再用不同的色彩表现各幅原图像与灰度融合图像之间的差异,最终形成一幅彩色融合图像。得到的彩色融合图像既在最大程度上保留了各幅原图像的细节信息,又提高了融合图像的直觉可视性。本文将这一算法用于融合不同波段的 SAR 图像,取得了很好的效果。文章的结构安排如下:第 2 节介绍了目前常用的图像融合技术;第 3 节提出了一种将灰度图像融合技术与彩色显示技术相结合的多传感器图像融合算法;第 4 节给出了仿真结果,对结果进行了分析;第 5 节对全文进行了总结。

2 图像融合技术

图像融合包含预处理(去噪、增强)、融合算法、图像显示这三个步骤。目前常用的融合算法有:加权平均法、多分辨率塔式算法、小波变换法、卡尔曼滤波算法等。图像的显示技术有:灰度显示、真彩色显示和假彩色显示。有些学者将显示方法和融合算法结合起来,在显示图像的过程中进一步完成图像的融合,这样就出现了彩色空间法和假彩色法。

加权平均法是一种最简单的多幅图像融合方法,其优点是简单直观,适合实时处理。但简单的叠加会使合成图像的信噪比降低;当融合图像的灰度差异很大时,就会出现明显的拼接痕

¹ 2002-03-28 收到, 2002-08-08 改回

迹^[3], 不利于人眼识别和后续的目标识别过程。

彩色空间变换法利用彩色空间 RGB(红、绿、蓝)模型和 HIS(色调、亮度和饱和度)模型各自在显示与定量计算方面的优势, 将图像的 RGB 模型转换成 HIS 模型。在 HIS 空间, 对 3 个相互独立且具有明确物理意义的分量 I, H, S 进行运算, 也就是进行多幅图像的融合, 再将融合结果反变换回 RGB 空间进行显示^[4,5]。

多分辨塔式图像融合算法是现在较为常用的图像融合方法^[6]。按照塔式结构形成方法的不同, 多分辨塔式图像融合算法可分为高斯-拉普拉斯金字塔^[7]、梯度金字塔、比率低通金字塔^[8-10]、形态学金字塔^[11]。图像的这种多分辨塔式表征将图像分解到一系列的频率通道中, 减少了融合图像时的拼接痕迹。但在拉普拉斯金字塔中, 不同分辨率的细节信息彼此相关。

基于小波变换的图像融合, 就是对原始图像进行小波变换, 将其分解在不同频段的不同特征域上, 然后在不同的特征域内进行融合。根据分解形式的不同又可分为金字塔形小波融合技术^[12]和树状小波融合技术^[13]。正交小波变换可去除两相邻尺度上图像信息差的相关性。在小波分解过程中, 由于图像的数据量不变, 同时各层的融合可并行进行, 所以其计算速度和所需的存储量都要优于拉普拉斯金字塔方法。

如果把两幅图像上的对应像素点当作是两个传感器在时刻 1 和时刻 2 的测量值, 就可用卡尔曼滤波给出以统计方法得到的最优融合结果^[1]。卡尔曼滤波方法实际上是一种加权处理, 权值的选择在最小方差意义下是最优的。

Toet 和 Jan Walraven 将假彩色技术用于热成像图像和电视图像的融合中, 其基本思想是用色差来增强图像的细节信息^[14]。但是, 用 Toet 提出的假彩色图像融合算法得到的融合图像反映的并不是事物的真实色彩, 所以融合图像的色彩不是很自然。另一种假彩色图像融合算法是 MIT 的 A. M. Waxman 等人提出的^[15], 这种算法利用了较为准确的人眼彩色视觉模型, 并针对假彩色合成图像色彩不自然这一情况, 对融合后的颜色进行了重新映射, 取得了很好的视觉效果。

上述的图像融合技术中, 小波变换、多分辨金字塔等方法并不改变图像的颜色。我们暂且称之为灰度图像融合技术。假彩色技术则利用彩色显示来融合多幅图像。如何将灰度图像融合技术和彩色显示结合起来, 便是第 3 节要阐述的内容。

3 一种像素级多传感器图像融合算法

本文给出的像素级图像融合算法由三部分组成: 获得灰度融合图像; 求出两幅原图像的细节增强图; 将两幅细节增强图和灰度融合图像送到三个颜色通道进行彩色显示。下面分别加以介绍。

3.1 获得灰度融合图像

先用一种灰度融合算法获得灰度融合图像, 本文采用卡尔曼滤波图像融合技术。卡尔曼滤波图像融合技术将多幅传感器图像中的像素点看作是在不同时刻对同一事物的观测, 同时假设目标状态在测量过程中是保持不变的, 于是可得到系统的状态方程和测量方程:

$$X(k+1) = X(k), \quad Z(k) = X(k) + W(k)$$

其中观测噪声 $W(k)$ 是均值为零、方差为 $R(k)$ 的高斯白噪声, 即

$$E[W(k)] = 0, \quad E[W(k)W'(l)] = R(k)\delta_{kl}$$

上式中的自变量 k 类似于时间变量, 但实际上它表示的是尺度的概念。如果有两个传感器得到的两幅图像 A 和 B , 其方差分别为 σ_1^2 和 σ_2^2 。由于两个传感器的工作相互独立, 则可认为两个传感器的观测噪声相互独立。将图像 A 中的某一像素点 $a(i, j)$ 看作是 $X(k)$ 初始状态值 $\hat{X}(0|0)$, 则协方差 $P(0|0)$ 等于 σ_1^2 。可以将图像 B 中同一位置的像素点 $b(i, j)$ 看作是尺度 1 上(类似于时刻 1)的观测值, 即 $Z(1) = b(i, j)$, $R(1) = \sigma_2^2$ 。对上述系统运用卡尔曼滤波, 先得到一步预测值

$$\hat{X}(1|0) = \hat{X}(0|0) = a(i, j) \quad (1)$$

一步预测协方差为

$$P(1|0) = P(0|0) = \sigma_1^2 \quad (2)$$

预测的观测值为

$$\hat{Z}(1|0) = \hat{X}(1|0) = a(i, j) \quad (3)$$

观测的预测误差协方差为

$$S(1) = P(1|0) + R(1) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (4)$$

滤波器增益为

$$K(1) = P(1|0)S^{-1}(1) = \sigma_1^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (5)$$

状态更新值为

$$\begin{aligned} \hat{X}(1) &= \hat{X}(1|0) + K(1)(Z(1) - \hat{X}(1|0)) = a(i, j) + [\sigma_1^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)](b(i, j) - a(i, j)) \\ &= [\sigma_2^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)]a(i, j) + [\sigma_1^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)]b(i, j) = f_g(i, j) \end{aligned} \quad (6)$$

上式中的状态更新值 $f_g(i, j)$ 便形成融合后的灰度图像 F_g 。从结果可以看出, 卡尔曼滤波方法实际上是一种加权平均的方法, 只不过权值的选择在最小方差意义下是最优的。

上述方法只适用于分辨率相同的两幅图像的融合, 将上述方法扩展便可适用于分辨率不同的多幅图像的融合, 这就是多尺度卡尔曼滤波算法^[16,17]。由于篇幅有限, 本文对多尺度卡尔曼滤波算法就不作详细介绍。用多尺度卡尔曼滤波算法得到的融合图像, 其各个区域的标准方差要比输入图像对应区域的方差小, 所以融合图像中每个像素点与其邻域像素点的灰度值较为相似, 这样就可减少斑点噪声的负面影响, 尤其对 SAR 图像来说这一点是非常重要的。

3.2 求出两幅原图像的细节增强图

当得到灰度融合图像后, 灰度融合图像并没有包含原图像所有的有用信息, 而是在细节上有一些差异, 所以应将这些差异求出来加以显示, 用来增强融合效果。由于图像的细节在频率域反映为高频分量, 所以可借助高频增强滤波器达到这一目的。对于图像 A , 乘以放大系数 α , 再减去灰度融合图像 F_g 的低频分量, 就可对图像 A 的细节进行增强。下面的公式可对这一原理进行直观的解释:

$$A^* = \alpha \times A - L * F_g \approx \alpha \times (A_s + A_d) - A_s \approx (\alpha - 1) \times A_s + \alpha \times A_d \quad (7)$$

其中 A^* 为图像 A 的细节增强图, L 为低通滤波器, F_g 为灰度融合图像, A_s 为图像 A 中的轮廓, A_d 为图像 A 中的细节。当 $\alpha = 1$ 时, 图像中表现的大部分内容均为图像 A 中的细节; 当 $\alpha > 1$ 时, 事物的轮廓图与图像 A 中的细节相加, 恢复了部分在细节增强时丢失的低频分量。

对于图像 B , 同样可求出 B 的细节增强图 B^* 。

3.3 彩色显示

在 3.1 和 3.2 节中分别得到了灰度融合图像 F_g 和图像 A, B 的细节增强图 A^*, B^* , 将这 3 幅图送到不同的彩色通道进行显示, 得到最终的彩色融合图像。至于如何选择颜色通道与图像的对对应关系, 可根据颜色的冷暖和各传感器的成像模式而定。下面给出的只是其中一种方案:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^* \\ F_g \\ B^* \end{pmatrix}$$

这样, 在本算法中既利用了灰度融合图像来表示两幅原图像中的信息, 又用彩色对比度表示了原图与灰度融合图像的细节差异, 两种表示形式互为补充, 增加了彩色融合图像中的色彩变化, 使图像更易识别。

4 仿真结果

本文采用的两张原图像是来自于美国喷气推进实验室 (JPL) 的两张机载综合孔径雷达 (AIR-

SAR) 图像^[18]。自 1988 年起, JPL 实验室每年至少都要执行一次 JPL-AIRSAR 飞行任务。载机是改装的 NASA DC-8 飞机, 飞行的平均地形高度为 8km, 飞行速度为 215m/s。图 1 和图 2 显示的是美国旧金山海湾的部分地区, 经度是 -121.46° , 纬度是 37.71° , 于 1995 年 4 月 11 日得到。其带宽为 20.00 MHz, 距离向的空间分辨率为 13.324m, 方位向的空间分辨率为 18.518m。图 1 是 P 波段的 AIRSAR 图像, 图 2 是 L 波段的 AIRSAR 图像。图中的景物大概分为 3 类: 左边为城市, 中间为海洋, 右下方为山脉。

用本文给出的算法将上述两幅图进行融合, 可以得到一幅彩色融合图像。从仿真结果可以看出, 彩色融合图像比 P 波段 AIRSAR 图像、L 波段 AIRSAR 图像都要清晰, 细节更加丰富, 立体感更强。例如, 在 L 波段 AIRSAR 图像中, 区域 1 内的细节线条不是很明显; 而在彩色融合图像中则比较易于辨识。对于中间的海域, 在彩色融合图中可很清晰地看到水的波纹, 而在两幅灰度图像中则不是很明显。在 P 波段 AIRSAR 图像中, 右边的山脉, 尤其是区域 2 并不是很清楚; 而在彩色融合图像中, 山的脉络非常清晰, 而且立体感比两幅灰度图像都要强得多。另外, 彩色融合图像的斑点噪声要比两幅原图小得多。图 3 是彩色融合图像转换成灰度图像的结果。

从上述讨论可以看出, 本文给出的彩色融合算法是非常有效的, 既包含了原图像的所有有用信息, 又提高了图像的可辨识性。

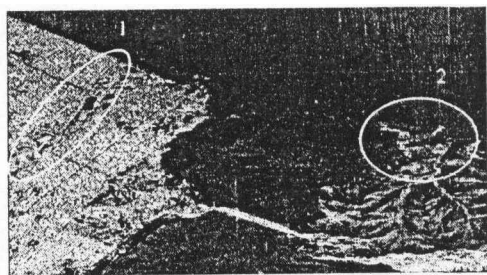


图 1 P 波段的 AIRSAR 图像

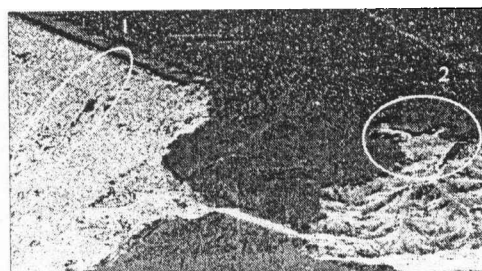


图 2 L 波段的 AIRSAR 图像

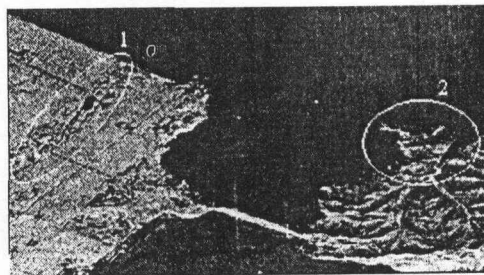


图 3 彩色融合图像转换成的灰度图像

5 结 论

本文给出了一种将彩色显示技术和卡尔曼灰度图像融合技术相结合的彩色图像融合算法, 并将其用于融合不同波段的 SAR 图像。首先用卡尔曼滤波算法得到一幅灰度融合图像, 其各个区域的方差比输入图像对应区域的方差小, 所以融合图像中每个像素点和其邻域像素点的灰度值较为相似, 这样就减少了 SAR 图像中斑点噪声的负面影响。接着求出灰度融合图像和两幅原图像的细节差异, 并进行增强。将增强后的细节差异和灰度融合图像送至不同的彩色通道进行显示, 得到最终的彩色融合图像。从仿真结果可以看出, 彩色融合图像的细节比两幅原图像都要清晰, 可辨识性强, 而且有很强的立体感。

参 考 文 献

- [1] 蒋晓瑜, 基于小波变换和伪彩色方法的多重图像融合算法研究, [博士论文], 北京, 北京理工大学, 1997.
- [2] 胡江华, 柏连发, 张保民, 像素级多传感器图像融合技术, 南京理工大学学报, 1996, 20(5), 453-456.
- [3] 张加友, 王江安, 红外图像融合, 光电子·激光, 2000, 11(5), 537-539.
- [4] 金红, 刘榴娣, 彩色空间变换法在图像融合中的应用, 光学技术, 1997, 23(4), 44-48.
- [5] J. Nñez, X. Otazu, *et al.*, Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1999, GRS-37(3), 1204-1211.
- [6] T. R. Meek, Multiresolution image fusion of thematic mapper imagery with synthetic aperture radar imagery, [Master Dissertation], Utah, Utah State University, 1999.
- [7] P. J. Burt, E. H. Adelson, The Laplacian pyramid as a compact image code, IEEE Trans. on Communications, 1983, COM-31(4), 532-540.
- [8] A. Toet, Multiscale contrast enhancement with applications to image fusion, Optical Engineering, 1992, 31(5), 1026-1031.
- [9] A. Toet, L. J. van Ruyven, J. M. Valetton, Merging thermal and visual images by a contrast pyramid, Optical Engineering, 1989, 28(7), 789-792.
- [10] 蒲恬, 倪国强, 应用于图像融合中的多尺度对比调制法, 北京, 北京理工大学学报, 2000, 20(2), 119-223.
- [11] A. Toet, A morphological pyramid image decomposition, Pattern Recognition Letters, 1989, 9(4), 255-261.
- [12] 崔岩梅, 倪国强, 等, 一种基于小波变换的多尺度多算子图像融合方法, 光学技术, 1999, 25(4), 37-39.
- [13] 李树涛, 王耀南, 基于树状小波分解的多传感器图像融合, 红外与毫米波学报, 2001, 20(3), 119-222.
- [14] A. Tcet, J. Walraven, New false color mapping for image fusion, Optical engineering, 1996, 35(3), 650-658.
- [15] D. A. Fay, A. M. Waxman, J. G. Verly, M. I. Braun, J. P. Racamoto, C. Frost, Fusion of visible, infrared and 3D LADAR imagery, Proc. of the 4th International Conference on Information Fusion, Montreal, Canada, 2001, WEC23.
- [16] G. Simone, F. C. Morabito, A. Farina, Radar image fusion by multiscale Kalman filtering, Proc. of the Third International Conference on Information Fusion, Paris, France, 2000, 10-17.
- [17] G. Simone, F. C. Morabito, A. Farina, Multifrequency and multiresolution fusion of SAR images for remote sensing applications, Proc. of the 4th International Conference on Information Fusion, Montreal, Canada, 2001, WEC14.
- [18] AIRSAR Homepage, <http://airsar.jpl.nasa.gov>, Jet Propulsion Laboratory.

STUDYING ON A PIXEL-LEVEL MULTISENSOR
IMAGE FUSION ALGORITHM

Zhao Wei Mao Shiyi

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract A pixel-level multisensor image fusion algorithm is proposed in this paper, and applied to fusion two SAR images of different frequency. A gray fusion image is firstly obtained using image fusion technique based on Kalman filter. Then, the gray fusion image, the enhanced details from two original images, are sent to RGB channels. A color fusion image is showed finally. The color fusion image includes more details, and the scene in it is easy to recognize.

Key words Pixel-level image fusion, Gray fusion image, Color fusion image, Kalman filter

赵 巍: 女, 1972 年生, 博士后. 主要研究领域为: 数据融合、图像融合、多尺度系统理论.

毛士艺: 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师. 主要研究领域为: 高分辨率雷达成像、信号建模与谱分析、多目标跟踪、数据融合等.