

基于区域特征的非下采样 Contourlet 变换卫星云图融合

汪 大¹, 毕硕本^{2*}, 王必强³, 颜 坚¹

(1. 南京信息工程大学 计算机与软件学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 遥感学院, 南京 210044;

3. 武汉市气象局, 武汉 430040)

(* 通信作者电子邮箱 bishuoben@163.com)

摘 要: 对不同的卫星云图进行融合处理, 可为灾害性天气的监测和预警提供更为全面的信息, 提出一种基于区域特征的非下采样 Contourlet 变换(NSCT)卫星云图融合新方法。首先, 采用 NSCT 对卫星云图进行多尺度和多方向分解, 得到低通子带系数和各带通方向子带系数; 然后, 对低通子带系数采用基于图像区域相关系数和区域能量的自适应融合规则, 对各带通方向子带系数采用加权 and 区域方差相结合的融合规则; 最后, 对融合系数进行 NSCT 逆变换得到融合云图。实验结果表明, 该算法在增强融合云图的纹理及边缘等细节信息的同时, 能更好地保留源红外云图的红外信息, 融合效果更好。

关键词: 卫星云图; 非下采样 Contourlet 变换; 区域能量; 区域方差

中图分类号: TP317.4; TP75.1 **文献标志码:** A

Satellite cloud image fusion based on regional feature with nonsubsamped contourlet transform

WANG Da¹, BI Shuo-ben^{2*}, WANG Bi-qiang³, YAN Jian¹

(1. College of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

2. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

3. Wuhan Meteorological Bureau, Wuhan Hubei 430040, China)

Abstract: The fusion of different satellite cloud images can provide more comprehensive information for surveillance and early warning of disastrous weather. A satellite cloud image fusion algorithm based on regional feature with NonSubsampled Contourlet Transform (NSCT) was proposed. Firstly, the source images were decomposed at multi-scale and multi-direction by NSCT. Then the self-adaptive fusion rule based on regional correlation coefficient and regional energy was used to fuse the low frequency coefficients, and the fusion rule of regional variance in combination with weighting was used for the fusion of the high frequency coefficients. Finally, the fused image was obtained by performing the inverse NSCT on the fused coefficients. The experimental results illustrate that while the texture and edge feature of the fused cloud image are enriched, the infrared information are preserved as much as possible and the proposed algorithm acquires better fusion result.

Key words: satellite cloud image; NonSubsampled Contourlet Transform (NSCT); regional energy; regional variance

0 引言

在灾害性的天气监测和预警中, 卫星云图资料已成为重要的信息来源。红外云图反映的是云层的温度分布, 可用于判断云顶的高低, 但它分辨率较低, 细节信息不丰富。可见光云图反映的是地面或云面的反照率大小, 可用于判断云面特征和类别, 分辨率较高, 含有丰富的细节信息^[1]。将图像融合技术应用到红外云图和可见光云图中, 可以充分利用彼此信息的互补性, 提高卫星云图的综合利用能力。

近几年来, 多尺度分析方法已成为图像融合领域的一个研究热点, 人们相继提出了许多基于多尺度分析的图像融合方法, 例如小波变换融合方法^[2-3]、Curvelet 变换融合方法^[4-5]、Contourlet 变换融合方法^[6], 以及非下采样 Contourlet 变换 (NonSubsampled Contourlet Transform, NSCT) 融合方法^[7-9]。其中, NSCT 作为一种新的图像多尺度几何分析工

具, 采用迭代非子采样滤波器组对图像进行分解, 使得 NSCT 不仅具有多尺度性、多方向性以及良好的时频局部化特性, 同时还具有平移不变性^[10-11]。因此 NSCT 可以有效地表示图像中细节信息结构的方向性和各向异性, 能取得较好的融合结果。

根据卫星云图的融合要求, 本文提出了一种基于区域特征的 NSCT 卫星云图融合方法。对低通子带系数和各带通方向子带系数分别采用不同的融合规则进行融合。

1 非下采样 Contourlet 变换

Cunha 等^[11]应用 à trous 算法在 Contourlet 变换的基础上提出了 NSCT, 其结构如图 1 所示。NSCT 分为非下采样塔式滤波器和非下采样方向滤波器两部分。首先采用非下采样塔式滤波器对图像进行多尺度分解, 然后采用非下采样方向滤波器组对得到的各尺度子带图像进行方向滤波, 就可以得到

收稿日期: 2012-03-13; 修回日期: 2012-05-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071253); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才培养对象资助项目(20080249)。

作者简介: 汪大(1988-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 气象信息融合、遥感图像处理; 毕硕本(1965-), 男, 山东昌邑人, 教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 数据挖掘、遥感图像融合; 王必强(1984-), 男, 陕西澄城人, 硕士, 主要研究方向: 地理信息系统; 颜坚(1988-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 气象信息融合。

不同尺度和方向的子带图像^[7,10-12]。

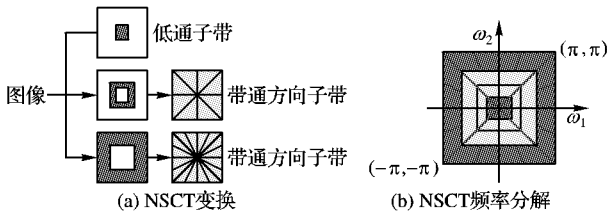


图1 NSCT结构示意图

2 基于区域特征的 NSCT 卫星云图融合

文献[13-14]研究表明,图像中的每个像素是属于某一区域的,其特征信息不是由单一的像素所表征的,而是由这一区域内的多个像素来表征和体现,且区域内像素间具有较强的关联性。基于区域特征的融合方法考虑了相邻像素之间的关联性,能突出区域特征,降低噪声的敏感度,可取得良好的融合效果。在灾害性天气预警应用中主要利用红外云图的亮温差值监测强对流云团,因此卫星云图融合要求在提高融合云图纹理及边缘等细节信息的同时,尽可能多地保留源红外云图的红外信息。基于此融合要求,本文提出了一种基于区域特征的 NSCT 卫星云图融合方法。

2.1 低通子带系数融合

图像的低通子带系数包含了图像的主要能量,反映源图像的近似特征。在灾害性天气预警应用中主要利用红外云图的亮温差值监测强对流云团,红外云图的重要性和客观性比可见光云图要高,即红外云图的低通子带部分比可见光云图重要。因此低通子带系数融合策略的选择对红外云图与可见光云图的融合至关重要。传统的加权平均法降低了图像的对比度,得不到理想的融合结果。而能量加权方法没有考虑到红外云图的重要性,红外信息进一步淡化。考虑到红外云图与可见光云图的低通子带之间存在着区域相关性,结合卫星云图的融合要求,低通子带系数的融合采用基于图像区域相关系数和区域能量的自适应融合规则:

待融合的红外云图和可见光云图在以 (x, y) 为中心点的区域窗口(窗口大小取 3×3)的能量 $E_{IR}(x, y)$ 及 $E_{VIS}(x, y)$ 定义为:

$$E_{IR}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 [A_{IR}(x+m, y+n)]^2 \quad (1)$$

$$E_{VIS}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 [A_{VIS}(x+m, y+n)]^2 \quad (2)$$

其中: $A_{IR}(x, y)$ 和 $A_{VIS}(x, y)$ 分别表示红外云图和可见光云图在 (x, y) 点的低通子带系数。

图像的相关系数是描述图像间相关程度的统计量,反映了两幅图像所含信息量的重叠程度,即两幅图像的相似度。其定义为:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{A_{IR}(x+m, y+n) - \mu_{IR}}{\sqrt{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 [A_{IR}(x+m, y+n) - \mu_{IR}]^2}} \times \frac{A_{VIS}(x+m, y+n) - \mu_{VIS}}{\sqrt{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 [A_{VIS}(x+m, y+n) - \mu_{VIS}]^2}}}{\sqrt{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 [A_{VIS}(x+m, y+n) - \mu_{VIS}]^2}} \quad (3)$$

其中: μ_{IR} 和 μ_{VIS} 分别表示红外云图和可见光云图在该局部区域低通子带系数的均值, $r(x, y)$ 是红外云图和可见光云图在该局部区域图像的相关系数。

当 $r(x, y) > 0.9$ 时,表明红外云图和可见光云图相似度极高,取红外云图的低通子带系数为融合系数;当 $0.5 \leq r(x, y) \leq 0.9$ 之间时,考虑到红外云图的重要性高于可见光云图,采用非均匀性加权(红外云图的权重高于可见光云图)予以融合。当 $r(x, y) < 0.5$ 时,表示红外云图与可见光云图相似度不大,如果选取具有较大区域能量的云图的低通子带系数为融合系数,这样就造成另一幅云图有用信息的丢失。对此方法进行改进,取两者系数加权值为融合系数,加权重由区域能量和相关系数共同决定。融合函数如下所示:

$$A_{Fus} = \begin{cases} A_{IR}, & p > 0.9 \\ 0.7 * A_{IR} + 0.3 * A_{VIS}, & 0.5 \leq p \leq 0.9 \\ (1-p) * A_{IR} + p * A_{VIS}, & p < 0.5 \text{ 且 } E_{IR}(x, y) > E_{IR}(x, y) \\ p * A_{IR} + (1-p) * A_{VIS}, & p < 0.5 \text{ 且 } E_{IR}(x, y) \leq E_{IR}(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

其中: A_{Fus} 为融合后的低通子带系数, $p = r(x, y)$ 。

2.2 带通方向子带系数融合

带通方向子带系数反映了图像的亮度突变特征,含有丰富的纹理及边缘等细节信息。区域方差通常用来反映图像灰度分布的离散程度,方差越大,离散程度越高,包含的信息就越丰富^[25]。因此可将区域方差的大小作为带通方向子带系数融合的依据。但当红外云图的区域方差小于可见光云图的区域方差时,如果只选择可见光云图的子带系数为融合系数,就会造成红外信息的丢失。针对这种情况,带通方向子带系数的融合采用区域方差与加权相结合的融合规则。

选取以 (x, y) 为中心的一个 3×3 局部区域,红外云图和可见光云图在分解尺度 j 上 k 方向对应的区域方差定义如下:

$$V_{IR}^k = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 (H_{IR}^k(x+i, y+i) - \bar{x}_{IR}^k)^2 \quad (5)$$

$$V_{VIS}^k = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 (H_{VIS}^k(x+i, y+i) - \bar{x}_{VIS}^k)^2 \quad (6)$$

其中: H_{IR}^k 和 H_{VIS}^k 分别为红外云图和可见光云图在 (x, y) 点的带通方向子带系数, \bar{x}_{IR}^k 和 \bar{x}_{VIS}^k 分别为红外云图和可见光云图在局部区域内的系数均值。当 $V_{IR}^k \leq V_{VIS}^k$ 时,取红外云图的带通方向子带系数为融合系数;当 $V_{IR}^k > V_{VIS}^k$ 时,取红外云图与可见光云图系数的加权值为融合系数,其中可见光云图的权重高于红外云图。这样可以在提高融合云图纹理及边缘细节信息的同时,尽可能多地保留源红外云图的红外信息。融合准则如下:

$$H_{Fus}^k(x, y) = \begin{cases} H_{IR}^k(x, y), & V_{IR}^k(x, y) \geq V_{VIS}^k(x, y) \\ H_{IR}^k(x, y) * m + W_{VIS}^k(x, y) * n, & V_{IR}^k(x, y) < V_{VIS}^k(x, y) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $H_{Fus}^k(x, y)$ 为分解尺度 j 上 k 方向对应的融合后的带通方向子带系数; m, n 为权重, $n = 1 - m$,通过实验结果得出, m 取值一般为0.2左右。

2.3 算法描述

基于区域特征的 NSCT 卫星云图融合方法基本步骤如下:

- 1) 对红外和可见光云图分别进行多级 NSCT 分解,得到低通子带系数和带通方向子带系数;
- 2) 按照上述融合规则分别对低通子带系数和带通方向子带系数进行融合处理;

3)对融合后的子带系数进行 NSCT 逆变换,所得到的图像即为融合云图。

3 实验结果与分析

实验所采用的数据为我国中部地区某时刻的红外云图和可见光云图,如图 2(a)和图 2(b)所示。云图大小为 256×256 ,已经过直方图匹配预处理。为了验证算法的有效性,本文采用了 4 种方法进行了融合实验。图 2(c)和图 2(d)为基于小波变换图像融合方法,小波基采用 Db4,分解层数为 3。图 2(c)的低频和高频系数均采用加权平均法,图 2(d)的低频和高频分别采用加权平均法和区域方差取大法。图 2(e)为基于 Contourlet 变换的结果,低频取平均,高频绝对值取大。图 2(f)为本文融合方法融合结果。

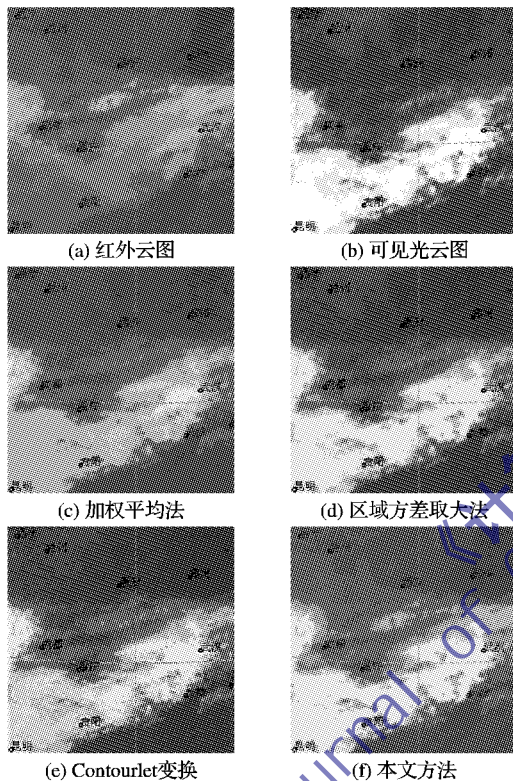


图2 原始云图和各种方法融合结果

从主观上看,加权平均法虽然简单,但降低了融合云图的对比度,融合云图不够清晰;区域方差取大法虽然很好地提高了融合云图的纹理及边缘等细节信息,但同时也丢失了部分有用的红外信息。而 Contourlet 变换法虽然整体对比度较好,但由于不具备平移不变性,融合云图有明显的 Gibbs 效应,产生了一些虚影模糊,云层不够清晰。而本文方法采用了 NSCT,较好地消除了 Contourlet 变换产生的 Gibbs 效应,且在子带系数融合时考虑了红外云图的重要性,因此在提高了融合云图的纹理及边缘等细节信息的同时,较好地保留了原红外云图的红外信息,云层特征更为分明。

本文使用信息熵、平均梯度、相关系数 3 个变量对融合结果进行客观评价^[16-17],如表 1 所示。从表 1 可看出,本文算法得到的融合图像的信息熵是最大的,说明本文算法可以提供含有更多信息量的融合图像。虽然平均梯度有所降低,但此时相关系数最好,表明融合云图与原始云图更接近,信息损失更少。总体而言,在红外云图和可见光云图的融合实验中,本文算法要优于其他算法,取得了较好的融合效果。

表1 红外云图与可见光云图的融合性能评价

融合方法	信息熵	平均梯度	与 IR 相关系数	与 VIS 相关系数
加权平均	6.4067	4.2154	0.8377	0.8245
区域方差取大	6.6734	5.5703	0.7428	0.8823
Contourlet 变换	6.8250	5.6106	0.7672	0.8551
本文方法	6.9564	5.3687	0.8572	0.8654

4 结语

本文针对卫星云图的融合要求,提出了一种基于区域特征的 NSCT 卫星云图融合算法。经 NSCT 得到的低通子带系数包含了图像的主要能量,存在着区域相关性,因此低通子带系数采用基于图像区域相关系数和区域能量的自适应融合规则;带通方向子带系数含有丰富的边缘及纹理等细节信息,当红外云图区域方差小于可见光云图区域方差时,如果只选择可见光云图信息,就会造成红外信息的丢失,因此带通方向子带系数的融合采用区域方差与加权相结合的融合准则。实验结果表明,该算法能更好地保留原红外云图的红外信息,同时纹理细节特征及边缘区域也清晰可见,云层特征更为分明,融合效果较为理想,且各项性能指标上均优于其他算法。

参考文献:

- [1] 朱青. 卫星红外云图与可见光云图融合方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [2] 薛东剑, 何政伟, 周游, 等. 改进的小波变换在多源遥感图像融合中的应用[J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2568-2574.
- [3] 曾宇燕, 何建农. 基于区域小波统计特征的遥感图像融合方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(19): 198-2005.
- [4] 刘军, 李德仁, 邵振锋. 利用快速离散 Curvelet 变换的遥感影像融合[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(3): 333-337.
- [5] FAN H, LI Y W, WANG H F. Image nonlinear fusion algorithm based on the second generation Curvelet transform[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2011, 6(11): 343-351.
- [6] LIU K, GUO L, CHEN J S. Contourlet transform for image fusion using cycle spinning[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(2): 353-357.
- [7] 马东辉, 薛群, 柴奇, 等. 基于图像信息的红外与可见光图像融合方法研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1168-1171.
- [8] ZHANG Q, GUO B L. Multifocus image fusion using the nonsubsampled Contourlet transform[J]. Signal Processing, 2009, 89(7): 1334-1346.
- [9] 张莹, 李言俊, 张科, 等. 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 196-198.
- [10] 张海朝, 张芳芳, 孙士保, 等. 基于非向下采样 Contourlet 的自适应图像融合算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 262-265.
- [11] CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampled Contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [12] 柴奇, 杨华, 杨伟. 基于非采样 Contourlet 变换的红外与可见光图像融合方法[J]. 红外与激光, 2009, 39(1): 92-96.
- [13] ZHANG Z, BLUM R S. Region based image fusion scheme for concealed weapon detection[C]// Proceedings of the 31th Annual Conference on Information Sciences and System. Baltimore, MD: [s. n.], 1997: 168-173.
- [14] PIELLA G. A region based multiresolution image fusion algorithm[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 1557-1564.
- [15] 李钢, 王雷, 张仁斌. 基于特征能量加权的红外与可见光图像融合[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 83-87.
- [16] PETROVI V. Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 208-216.
- [17] 邵桂芳, 李祖枢, 成卫, 等. 基于视觉感知的融合图像质量评价[J]. 计算机应用, 2004, 24(5): 69-71.