

文章编号: 1672-8785(2013)05-0008-08

气象卫星红外云图与水汽图的 融合技术研究

刘 凯 寇 正

(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘 要: 将多分辨率分析融合方法和多尺度几何分析融合方法应用于气象卫星水汽图和红外云图的融合中, 并用主观视觉、平均互信息和 Xydeas-Petrovic 指标对各种融合算法的性能分别进行了定性和定量评价。结果表明, 与源图像相比, 融合图像取得了更好的视觉效果, 图像中包含了更多的信息量, 云体清晰度和云的层次感得到了提高, 纹理变得细致了。从平均互信息和 Xydeas-Petrovic 指标看, 多尺度几何分析融合方法的效果较多分辨率分析融合方法更好。

关键词: 图像融合; 红外云图; 水汽图; 多分辨率分析融合方法; 多尺度几何分析融合方法

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.05.02

Study of Fusion of Meteorological Satellite Infrared Image and Water Vapor Image

LIU Kai, KOU Zheng

(Institute of Meteorology and Ocean, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The multi-resolution analysis fusion method and multi-scale geometric analysis fusion method are used for fusing the infrared cloud images and water vapor cloud images from FY-2E meteorological satellite. Moreover, the mean mutual information and Xydeas-Petrovic index are used to evaluate the performance of different fusion algorithms qualitatively and quantitatively. The results show that the visual effect of the fused image is actually improved relatively to the raw images. The fused image contains more abundant information about the cloud and the texture and hierarchy of cloud are improved as well. In light of two objective evaluation indexes, the multi-scale geometric analysis fusion method is better than the multi-resolution analysis fusion method in fusion effectiveness.

Key words: image fusion; infrared cloud image; water vapor cloud image; multi-resolution analysis fusion method; multi-scale geometric analysis fusion method

0 引言

自 20 世纪 60 年代第一颗气象卫星成功发射以来, 气象卫星探测技术得到了迅猛发展, 世界上已经建立了全球气象卫星探测体系。气

象卫星探测技术大大地丰富了气象观测的内容和范围, 特别是对一些难以进行气象观测的地区, 现在都可以通过气象卫星进行观测。气象卫星的出现极大地促进了大气科学的发展, 它在探测理论和技术、灾害性天气监测、天气预报

收稿日期: 2013-03-13

作者简介: 刘凯(1970-), 女, 江苏常州人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为卫星遥感图像处理和模式识别。

E-mail: liukaiqy@163.com

等方面发挥了重要作用。卫星资料有两大类,一类是图像资料,另一类是探测资料。将卫星携带的成像仪在不同谱段测得的辐射转换为不同色调的图像就形成了卫星图像。目前的气象卫星图像有两种:一种是卫星云图,主要反映大气中云系的分布;另一种是水汽图,主要反映大气中水汽的分布。卫星云图中的红外云图是卫星通过探测地表和云顶的红外辐射获取的,主要反映的是地表和云顶的温度特征,所以红外云图在昼间、夜间均可获得。图像的灰度取决于地表或云顶的温度,温度越低,灰度值就越大,色调越白;温度越高,灰度值就越小,色调越暗。水汽图则是卫星通过接收以 $6.7\ \mu\text{m}$ 为中心的水汽吸收带的红外辐射而得出的图像,其中包含着大量的大气水汽信息。水汽图上色调越白,即卫星接收到的红外辐射越少,被水汽吸收的红外辐射就越多,表示大气中的水汽含量越多;反之,水汽图上色调越暗,大气中的水汽含量就减少。目前应用分析气象卫星图像时主要应用云图,而水汽图用得很少,水汽图资料没有被有效地利用起来。但在决定大气运动规律的几个关键性因素中,水汽的作用仅次于大气能量。红外云图和水汽图从不同的角度反映大气的特性,尤其是对夏季强对流天气如暴雨、雷暴、冰雹等的识别中,单独使用云图或单独使用水汽图都有不足,最好将两者结合起来使用。为了提高识别强对流天气的能力,余远东^[1]提出利用像素级图像融合技术将红外云图和水汽图融合成一幅图像,然后再进行强对流云团的识别。余远东^[1]在研究中只是利用小波变换融合方法对红外云图和水汽图的融合进行了初步研究,没有采用其他多分辨率融合方法和新型的多尺度几何分析融合方法。本文的主要工作就是将几种多分辨率融合方法和多尺度几何分析融合方法运用到红外云图和水汽图的融合中,并用主观视觉和客观评价指标分别对融合结果进行质量评价,为进一步的识别、分割等高级应用奠定一定的基础。

1 多分辨率分析图像融合方法

敬忠良等^[2]指出,图像融合就是将多个图像传感器或同一图像传感器以不同工作模式获取的同一场景的图像信息加以综合,以获得新的关于此场景更准确的描述。按照信息的抽象程度,图像融合通常可分为三个级别:像素级 (Pixel-level) 融合、特征级 (Feature-level) 融合和决策级 (Decision-level) 融合^[2]。其中,像素级融合直接在图像的原始数据层上进行融合,是最低层次的融合,也是应用最广泛的融合技术^[3]。该层次的融合准确性最高,能够提供其他层次融合所不具有的细节信息,可以为进一步的图像处理提供更多的特性信息,有利于图像的进一步分析、处理与理解。但相比之下像素级融合需要处理的信息量最大^[3]。目前主流的像素级图像融合方法包括多分辨率分析融合方法和多尺度几何分析融合方法。

多分辨率分析图像融合方法的基本思想就是利用多分辨率分析方法提取出输入源图像的多分辨率系数,然后通过某种融合规则合成融合图像的多分辨率分析系数,最后利用多分辨率分析逆运算得到融合图像^[4]。多分辨率图像融合的框架如图1所示^[4]。

1.1 基于金字塔分解的图像融合方法

金字塔 (Pyramid) 分解融合法是最早出现的

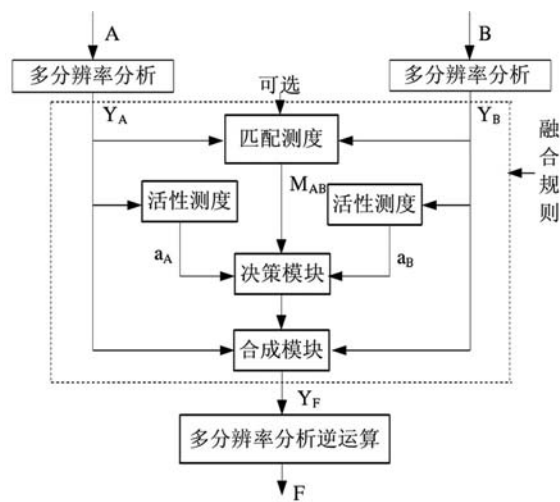


图1 多分辨率图像融合的框架示意图

多分辨率分析图像融合方法。由 Burt P J 和 Adelson E H^[5] 在 1983 年提出。该算法首先将滤波后的源图像用金字塔结构表示, 然后按照一定的融合规则在塔的每一层进行数据融合, 得到一个合成的金字塔结构, 最后对合成的塔状结构进行重构, 得到融合图像。常用的金字塔分解融合方法有拉普拉斯 (Laplace) 金字塔分解^[6]、低通比率 (ration of low-pass) 金字塔分解^[7]、梯度 (gradient) 金字塔分解^[8]、对比度 (contrast) 金字塔分解和形态学 (morphologh) 金字塔分解融合算法。总的来说, 金字塔变换是一种冗余的图像多分辨率分析方法, 分解后的各层数据之间彼此相关。除了梯度金字塔变换以外, 其他的金字塔变换无方向性。

1.2 小波变换融合法

小波 (Wavelet) 变换融合法是另一类多分辨率分析图像融合方法。1995 年 Li H 等^[9] 和 Chipman L J 等^[10] 首先分别将小波变换引入到图像融合领域中。小波变换融合的过程可以分为三步: 第一步对源图像进行二维离散小波变换, 将图像分解在不同频率上, 形成小波金字塔; 第二步按照某种融合规则对不同分解层上的各个子带图像进行融合, 形成融合图像的小波金字塔; 第三步对融合图像的小波金字塔进行离散小波逆变换得到融合图像。同金字塔变换相对比, 小波变换具有能提供方向信息和非冗余的优点。

2 多尺度几何分析图像融合方法

焦李成等^[11] 指出虽然小波变换具备优良的时-频局部特性, 但不能最优地表示含线或者面奇异的高维函数。在上个世纪末, 以 Ridgelet^[12]、Curvelet^[13,14]、Bandlet^[15], Contourlet^[16,17] 和非下采样 Contourlet^[18] 为代表的多尺度几何分析工具相继产生。多尺度几何分析作为一种新的高维函数的最优表示方法, 提供了一种具有灵活的局部性和方向性的多分辨率图像表示方法。2005 年, Choi 等^[19] 将 Curvelet 变换引入到了遥感图像融合中, 2007 年屈小波等^[20] 将 Bandlet 变换引入到了图像融合中, 同年, 贾建等^[21] 提

出了基于非下采样 Contourlet 变换的多传感器图像融合方法。多尺度几何分析融合方法的基本思路同金字塔变换和小波变换融合法相似, 但多尺度几何分析方法的计算复杂度相对较高。

3 图像融合质量评价

图像融合质量评价是图像融合领域中一个非常重要的问题。由于图像类型的不同、观察者感兴趣的部分不同及对图像的要求不同等, 到目前为止还没有一种统一的评价标准。融合图像质量评价标准大体上可分为主观和客观两种。

图像的主观评价主要是依靠人的主观感觉对图像效果进行评价, 比如图像色彩是否一致, 是否有重影, 图像清晰度如何, 边缘是否清晰等。主观评价简单、直观、快捷、方便。

客观评价是用图像的统计参数来进行判定, 它能克服人的主观因素的影响。很多学者提出了多种客观评价方法, 包括以参考图像为基础的客观评价方法和不需要参考图像的客观评价方法。对于水汽图和红外云图的融合, 由于无法得到标准的参考图像, 因此以参考图像为基础的客观评价方法就不能用于评价红外和水汽融合图像。本文采用平均互信息^[22,23] 和 Xydeas-Petrovic^[24,25] 指标来评价融合图像的质量。

3.1 平均互信息

源图像 A(或 B) 和融合图像 F 之间的互信息的定义如下:

$$MI_{A,F} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{g=0}^{L-1} P_{A,F} \log_2 \frac{P_{A,F}(k,g)}{P_A(k)P_F(g)} \quad (1)$$

$$MI_{B,F} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{g=0}^{L-1} P_{B,F}(k,g) \log_2 \frac{P_{B,F}(k,g)}{P_B(k)P_F(g)} \quad (2)$$

式中, $P_{A,F}(k,g)$ (或 $P_{B,F}(k,g)$) 是源图像 A(或 B) 和融合图像 F 的归一化联合灰度直方图。平均互信息^[22,23] 的定义为

$$MI_{AB,F} = \frac{MI_{A,F} + MI_{B,F}}{2} \quad (3)$$

平均互信息越大, 说明融合图像从源图像中提取的信息就越多, 融合的效果也越好。

3.2 Xydeas-Petrovic 指标

Xydeas 和 Petrovic^[24,25] 提出了一种与边缘信息相关的融合质量客观评价指标。该指标可以度量源图像的边缘信息在融合图像中的融入程度, 其定义为

$$Q^{AB/F}(m, n) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (Q^{AF}(m, n)w^A(m, n) + Q^{BF}(m, n)w^B(m, n))}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (w^A(m, n) + w^B(m, n))} \quad (4)$$

式中, M , N 为图像的行数和列数, 权值 $w^A(m, n)$ 和 $w^B(m, n)$ 为一个关于边缘强度的函数。 $Q^{AB/F}(m, n)$ 的值域范围为 $[0, 1]$, 值越大表示融合图像保留的源图像边缘信息越多, 融合的效果越好。

4 融合实验结果及分析

在实际应用中, 低频红外云图的重要性高于水汽图, 高频红外云图和水汽图同等重要^[1], 因此我们在融合实验设计中, 对低频部分和高频部分采用不同的融合规则。进行融合实验的红外云图和水汽图像来自于我国的 FY-2E 卫星的红外一 (IR_1) 和水汽通道 (IR_3), 红外一通道的波长为 $10.5 \mu m$, 水汽通道的波长为 $6.2 \mu m$, 两个通道的光谱分辨率为 8-bit, 其成像被分成 256 个灰度级。红外云图和水汽图像在融合前都已经过配准, 大小均为 512×512 。

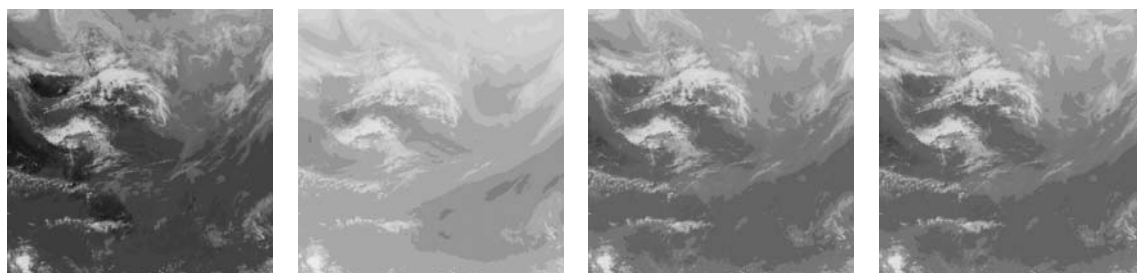
实验分别用拉普拉斯金字塔融合 (LAP 算法)、离散小波变换融合 (DWT 算法)、平移不变离散小波变换融合 (SIDWT 算法)、非下采样 Contourlet 变换融合 (NSCT 算法) 和带状波变换融合 (Bandlet 算法) 五种方法对两组红外云图和水汽图像进行融合。对低频子带系数采用非均

匀融合规则, λ 为红外云图的权系数, 分别取 0.5、0.8 和 1.0; 对高频子带系数采用取平均的融合规则。SIDWT 算法、LAP 算法、DWT 算法的分解级数为 4 级, NSCT 算法和 Bandlet 算法的分解级数为 3 级。采用 MI 和 Xydeas-Petrovic 指标分别对五种融合方法融合的图像进行客观评价。

图 2、图 3、图 4 是分别采用加权系数 0.5、0.8 和 1.0 对春季红外和水汽图像进行融合的结果, 图 5、图 6、图 7 是分别采用加权系数 0.5、0.8 和 1.0 对夏季红外和水汽图像进行融合的结果。表 1 给出了对春季红外和水汽图像进行融合的五种算法的质量评价指标结果, 表 2 给出了对夏季红外和水汽图像进行融合的五种算法的质量评价指标结果。

由图 2~图 7 可以看到, 五种融合算法都取得了良好的视觉效果。红外图像和水汽图中的边缘、细节等信息在融合图像中都有不同程度的体现, 云体清晰, 纹理细致, 云的层次感和图像的对比度都得到了提高。低频子带加权系数越大, 融合图像的视觉效果越好。在实验云图的融合中, 多尺度几何分析融合方法的效果比多分辨率分析融合方法的效果好。

如表 1 和表 2 所示, 从融合图像质量的客观评价指标来看, 无论是夏季云图还是春季云图, 对于 LAP、SIDWT 和 DWT 这样的多分辨率分析融合算法, 随着低频子带加权系数 λ 的增大, 互信息量 MI 和 Xydeas-Petrovic 指标 $Q^{AB/F}$ 的值都有所下降。而对于 NSCT 和 Bandlet 这样的多尺度几何分析融合算法, 随着低频子带加权系数 λ 的增大, 互信息量 MI 的值稍有增大, $Q^{AB/F}$ 出现微小的波动。综合两种指标, 当 λ 为 1.0 时, 运用 Bandlet 算法得到的融合图像的质量最好, 融合图像保留的边缘信息最多, 从源图像中提取的信息也最多。NSCT 算法次之。由于 NSCT 算法和 Bandlet 算法的计算复杂度较高, 相对于多分辨率分析算法耗时较多, 而且图像越大耗时越多。

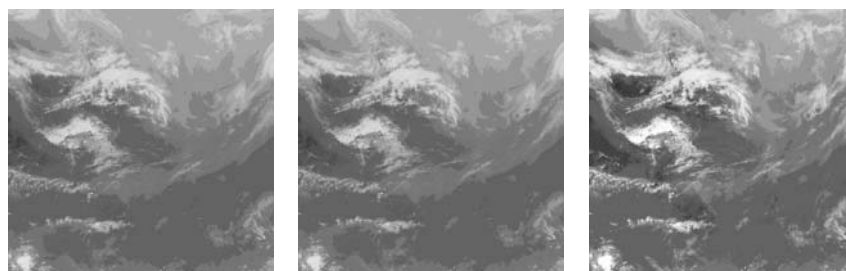


(a) 红外云图 1

(b) 水汽图 1

(c) LAP 算法结果

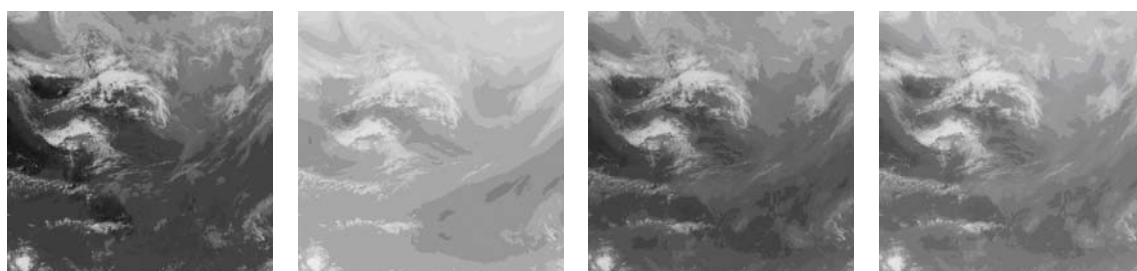
(d) SIDWT 算法结果



(e) DWT 算法结果

(f) NSCT 算法结果

(g) Bandlet 算法结果

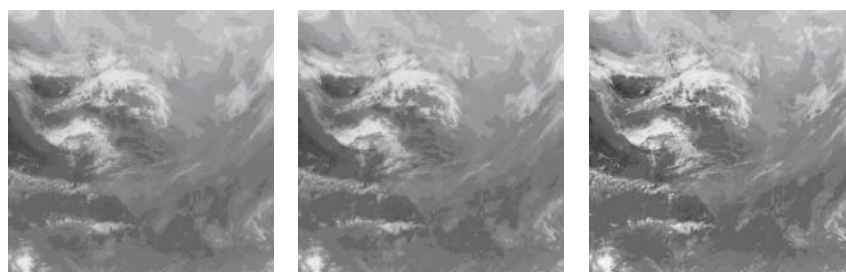
图 2 红外云图 1 和水汽图 1 ($\lambda=0.5$) 及其融合结果

(a) 红外云图 1

(b) 水汽图 1

(c) LAP 算法结果

(d) SIDWT 算法结果

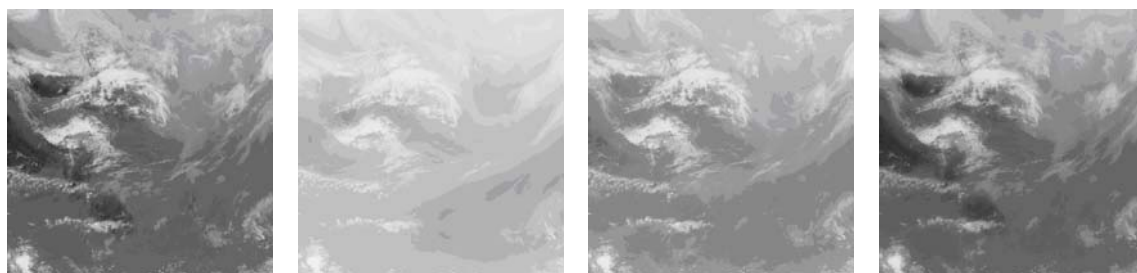


(e) DWT 算法结果

(f) NSCT 算法结果

(g) Bandlet 算法结果

图 3 红外云图 1 和水汽图 1 ($\lambda=0.8$) 及其融合结果

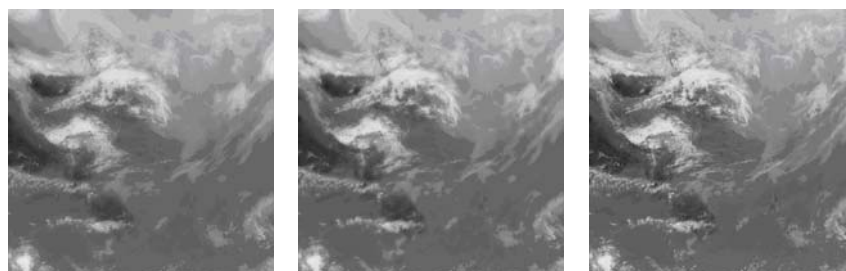


(a) 红外云图 1

(b) 水汽图 1

(c) LAP 算法结果

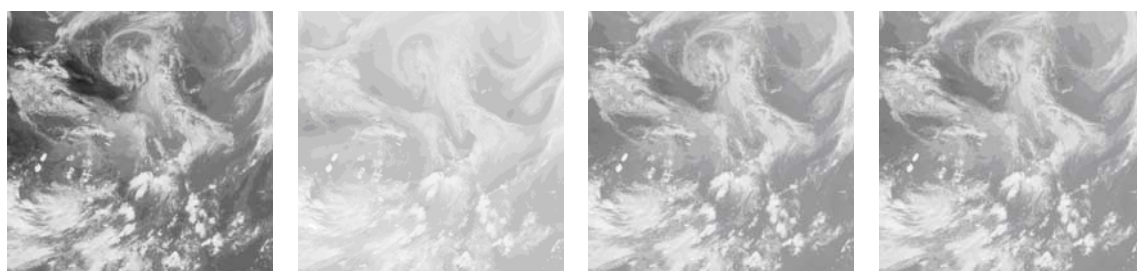
(d) SIDWT 算法结果



(e) DWT 算法结果

(f) NSCT 算法结果

(g) Bandlet 算法结果

图 4 红外云图 1 和水汽图 1 ($\lambda=1.0$) 及其融合结果

(a) 红外云图 1

(b) 水汽图 1

(c) LAP 算法结果

(d) SIDWT 算法结果

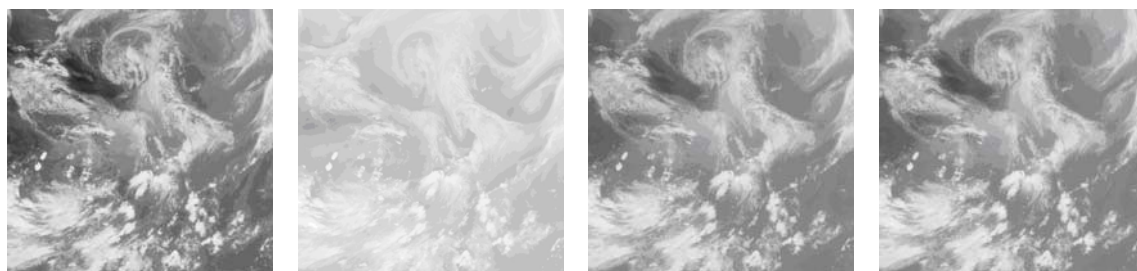


(e) DWT 算法结果

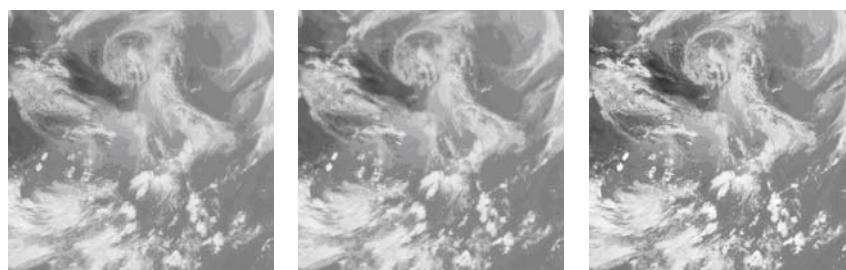
(f) NSCT 算法结果

(g) Bandlet 算法结果

图 5 微光云图 2 和红外云图 2 及其融合结果 ($\lambda=0.5$)

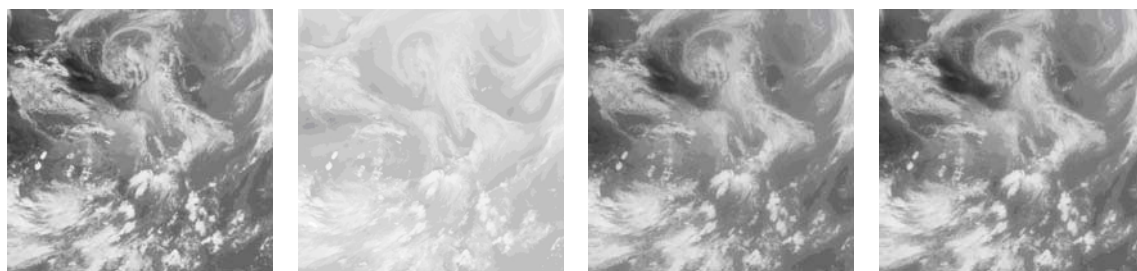


(a) 红外云图 1 (b) 水汽图 1 (c) LAP 算法结果 (d) SIDWT 算法结果

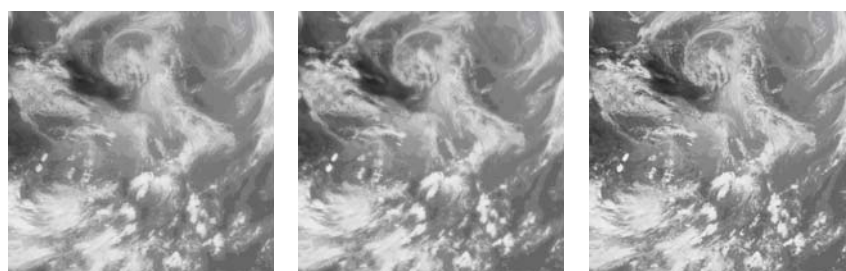


(e) DWT 算法结果 (f) NSCT 算法结果 (g) Bandlet 算法结果

图 6 微光云图 2 和红外云图 2 及其融合结果 ($\lambda=0.8$)



(a) 红外云图 1 (b) 水汽图 1 (c) LAP 算法结果 (d) SIDWT 算法结果



(e) DWT 算法结果 (f) NSCT 算法结果 (g) Bandlet 算法结果

图 7 微光云图 2 和红外云图 2 及其融合结果 ($\lambda=1.0$)

表 1 对冬季红外云图和水汽图的各种融合算法的客观评价指标比较

加权 系数 λ	LAP 算法		SIDWT 算法		DWT 算法		NSCT 算法		Bandlet 算法	
	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$
0.5	4.9170	0.7009	4.8770	0.6871	4.9188	0.7005	4.9005	0.6997	4.0938	0.7754
0.8	4.7183	0.6995	4.8659	0.6874	4.8405	0.6889	5.1797	0.6992	5.0974	0.7730
1.0	4.5958	0.6832	4.8404	0.6710	4.7400	0.6612	5.2837	0.6693	5.9343	0.7659

表 2 对夏季红外云图和水汽图的各种融合算法的客观评价指标比较

加权 系数 λ	LAP 算法		SIDWT 算法		DWT 算法		NSCT 算法		Bandlet 算法	
	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$
0.5	5.3218	0.7265	5.2632	0.7172	5.3219	0.7262	5.2971	0.7260	3.9778	0.7873
0.8	4.6157	0.7231	4.8414	0.7157	4.7852	0.7108	5.3373	0.7212	5.3518	0.7880
1.0	4.1105	0.7215	4.4252	0.6995	4.3065	0.6803	5.0220	0.6867	7.0116	0.7835

5 小结

本文将多分辨率分析融合方法和多尺度几何分析融合方法运用到 FY-2E 气象卫星红外云图和水汽图的融合中。融合实验结果表明,融合图像取得了良好的视觉效果。融合图像包含了水汽图的边缘信息,纹理细致,云体层次感和图像的对比度都得到了提高。从平均互信息 (MI) 和 Xydeas-Petrovic 指标 ($Q^{AB/F}$) 看,带状波融合 (Bandlet 算法) 和非下采样 Contourlet 融合算法 (NSCT 算法) 的融合效果较其它方法更好。融合结果有助于红外云图和水汽图的匹配和分析,便于进行强云团的识别和其他感兴趣目标的检测等进一步的工作。这也是后续要开展的研究工作。

致谢: 本文中多分辨率分析融合算法采用 Rockinger 编写的 fusetool 工具箱, Bandlet 变换融合采用 Dr.Gabriel Peyre 编写的 Bandlet 变换工具箱, NSCT 变换采用 Arthur L. Cunha, Jianping Zhou and Minh N. Do 编写的 NSCT 工具箱,在此对所有作者表示感谢。

参考文献

- [1] 余远东, 胡荣强. 气象卫星遥感云图和水汽图的图像处理及强云团识别 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [2] 敬忠良, 肖刚, 李振华. 图像融合十理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [3] 楚恒. 像素级图像融合及其关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [4] 张红. 像素级多分辨率图像融合方法研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [5] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, **31**(4):532-540.
- [6] Burt P J, Adelson E H. Merging Images through Pattern Decomposition [C]. *Proceedings of SPIE on Application of Digital Image Processing VIII*, 1985, **575**(3):173-181.
- [7] Toet A. Image Fusion by a Ratio of Low-pass Pyramid [J]. *Patten Recognition Letters*, 1989, **9**(4):245-253.
- [8] Burt P J. A Gradient Pyramid Basis for Pattern Selective Image Fusion [C]. *Processings of the Society for Information Display Conference*, 1992:467-470.
- [9] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, **27**(3):235-244.
- [10] Chipman L J, Orr T M. Wavelets and Images Fusion [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 1995:248-251.
- [11] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望 [J]. *电子学报*, 2003, **31**(12A):1975-1981.
- [12] Candès E J. Ridgelets: Theory and Applications [D]. Stanford University, USA, 1998.
- [13] Candès E J, Donoho D L. Curvelets—A Surprisingly Effective Nonadaptive Representation for Objects with Edges. Cohen A, Rabut C, Schumaker L L, Curves and Surface Fitting[M]. Nashville, TN, Vanderbilt University Press, 1999.

(下转第 22 页)