

# 基于高维空间几何信息学的 遥感图像去薄云算法

李新宇,刘扬阳,蒋雪娜,王守觉

(中国科学院半导体研究所神经网络实验室,北京 100083)

**摘要:** 遥感图像中薄云的存在为遥感图像的判读带来了极大的影响,本文针对遥感图像中的薄云雾提出了一种基于高维空间几何信息学(High-Dimensional Space Geometrical Informatics)(HDSGI)的去云的新算法.基于HDSGI理论,将一副带有薄云的遥感图像作为高维空间中的一点,通过各向同性滤波器将该高维空间点几何分解到不同尺度的两个子空间,对各个子空间的分解分量分别进行抑制、增益变换,将经过变换后的子空间分量合成得到最终所需的去云后遥感图像.采用实际卫星影像和航空影像对该算法进行实验验证,用同态滤波和小波分解算法进行同类算法比较,并采用若干客观图像评价参数评价分析处理后图像.实验结果表明,本文算法不仅能有效降低薄云覆盖及相关的噪声干扰,而且可以增强原始遥感图像边缘信息,达到去除薄云的目的.

**关键词:** 遥感图像; 薄云去除; 高维空间几何信息学(HDSGI)

**中图分类号:** TP751      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2011)05-1002-05

## An Novel Algorithm to Remove the Thin Cloud from Remote Sensing Images Based on High-Dimensional Space Geometrical Informatics

LI Xin-yu, LIU Yang-yang, JIANG Xue-na, WANG Shou-jue

(Laboratory of Artificial Neural Networks, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

**Abstract:** The presence of thin cloud in remote sensing images has brought great impact for follow-up image interpretation. An novel algorithm was proposed to remove the thin cloud from remote sensing images based on the theory of High-dimensional space geometrical informatics(HDSGI). One Image is mapped into an original point (vector) of a high-dimensional space by the theory of HDSGI, namely, a remote sensing image including of cloud is a point of high-dimensional space. In this new algorithm, through homomorphic filter, this high-dimensional space point is geometrically decomposed into two individual sub-spaces of different scales, decomposition components is done "restraining \ enhancing transformation" separately, the transformed sub-space components had been maken final synthesis be the required remote sensing image without the cloud. Using by actual satellite image and aviation image, experimental results have shown that the algorithm can not only remove the noisy of cloud but also is efficient for enhancing the edge information contrasting to the homomorphic filter and wavelet transform algorithms.

**Key words:** remote sensing image; thin cloud removal; high-dimensional space geometrical informatics(HDSGI)

### 1 引言

遥感卫星获得的大部分是光学遥感图像.虽然光学遥感图像相对其他遥感图像具有信息量大、分辨率高和几何定位性质稳定等特点,但它极易受到气候因素的影响而大大降低其应用的价值,例如云层遮挡就是其中影响之一.当地面景物受到云层遮挡时,传感器无法准确接收到来自地表的信息,造成所获得的遥感图像模糊,分辨率下降,这对后续的遥感图像分析与应用,以致系

统快速反应能力都带来严重的影响.因此采取特殊的处理方法去除图像中的云层干扰来复原云层下面的地貌信息就具有十分重要的意义.

根据云层厚度程度不同,所应用的消除云雾的方法也不同.对于厚云所遮盖的地区,在没有任何辅助信息的情况下,要将地表地物的信息还原出来是十分困难甚至是不可能的<sup>[1]</sup>,鉴于此,本文所进行的研究与讨论都是基于光学遥感图像(以下简称遥感图像)中的云层遮挡为薄云而展开的.目前,遥感图像薄云去除的方法有

以下几种:(1)多幅图像叠加去云<sup>[2]</sup>; (2)多传感器融合去云<sup>[3]</sup>; (3)单幅图像去云. 其中以单幅图像去云难度最高,这正是本文研究的内容. 针对单幅遥感图像去云算法,目前比较成熟的方法为同态滤波法和基于小波分解的去云算法.

同态滤波方法的去云原理<sup>[4]</sup>可以简述为:将带云遥感图像先取对数运算后,将图像转换到频域,使用巴特沃斯高通滤波器进行滤波,以达到抑制低频,增强高频信息的目的,最后将滤波后结果经过指数运算得到去云后图像. 而基于小波分解的遥感图像薄云去除方法<sup>[5,6]</sup>是将图像进行适当层次的小波变换,通过增大细节系数来突出背景信息,减小近似系数来去除云雾信息. 但是值得注意的是,同态滤波损失了图像背景的低频成分,使深色的背景变淡,甚至反转,同时也去除了部分有用的高频信息,使图像细节变得模糊;表现在视觉上,就是原始图像的白色云层被去掉的同时,无云地区的背景细节信息也被削弱了. 而对于小波方法,由于我们无法得知云层与景物信息所包含的具体频率成分,所以只能通过实验验证以及人工调节小波分解层数来寻求最佳的去云效果. 虽然小波变换在薄云去除方面比同态滤波效果更好,但在背景细节保持上表现仍差强人意.

针对以上问题,依据王守觉院士提出的高维空间几何信息学(HDSGI)理论,本文提出一种新的遥感图像薄云去除算法,在高维几何空间中,将遥感图像做高频、低频子空间分解,在高低频子空间中分别采用抑制、增益变换,最后再合并图像高低频空间信息,以达到去云并增强背景细节信息的目的.

## 2 算法原理

卫星传感器上接收到的遥感图像是由两个因素决定的. 一是诸如云、大气等的影响,另一个是由于地面反射特性的不同决定. 如果忽略大气等因素认为前者主要是由云引起的,且假设地面的反射特性是完全相同的全反射,则传感器上得到的图像就完全反映了云的分布<sup>[7]</sup>. 通过频域角度分析可知,图像中由薄云所引起的干扰主要集中在图像的低频,削弱了遥感图像的细节内容,即高频信息. 由此可以推测,如果能够在降低干扰低频信息的同时,提升并恢复遥感图像高频信息,将会达到去云的目的.

王守觉院士提出的高维空间几何信息学理论<sup>[8]</sup>,把待处理的图像看作高维空间中的点(矢量),从高维空间的坐标系空间变换入手,通过简单的高维空间矢量运算来达到图像处理目的. 设  $f(x, y)$  表示一幅  $M \times N (0 < x < M, 0 < y < N)$  的图像,本文依据该高维空间几何信息学理论,将遥感图像看作是高维几何空间的

一点,即是把图像映射为  $M \times N$  维空间中的一个点(矢量)<sup>[9]</sup>.

这里介绍一下高维空间中一些几何计算方法,假设  $n$  维空间中有图像向量  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_k), \mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_j)$ :

(1)高维空间中向量  $\mathbf{A}$  的模值:

$$|\mathbf{A}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_k^2} \quad (1)$$

(2)高维空间中向量  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  的夹角余弦值:

$$\cos(\theta) = \cos(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}|} \quad (2)$$

(3)向量  $\mathbf{A}$  到向量  $\mathbf{B}$  的投影向量记为  $\mathbf{C}$ :

$$\mathbf{C} = \frac{|\mathbf{A}| \cdot \cos(\theta)}{|\mathbf{B}|} \cdot \mathbf{B} \quad (3)$$

(4)向量  $\mathbf{A}$  到向量  $\mathbf{B}$  的垂直向量记为  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} - \mathbf{C} = \mathbf{A} - \frac{|\mathbf{A}| \cdot \cos(\theta)}{|\mathbf{B}|} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{A} - \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2} \cdot \mathbf{B} \quad (4)$$

考虑到遥感图像中高、低频信息受薄云覆盖情况各异,在这里引入一个各向同性滤波器  $h$ ,其目的是将遥感图像中高、低频信息首先各自分离. 根据实际情况的不同可以选择不同的滤波器,但是为了能适应大多数图像的处理,经大量的实验,本文选择高斯滤波器. 其函数形式表现如下:

$$h(x, y) = \begin{cases} K \exp(-\alpha(x^2 + y^2)), & (x, y) \in C \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

将原始向量与参数设置不同的高斯滤波器做卷积运算的结果可以得到新的向量,在高维空间中即表现为不同尺度子空间下的相应矢量,该新矢量表明了从遥感图像中滤波分离出的低频分量方向,但该矢量并不仅仅包含原始遥感图像中的低频分量,是近似低频分量,也就是说原始遥感图像中低频部分还没有精确的分离出来. 如图 1 所示,这个过程表现出经过不同滤波器得到的低频分量方向可以有很多,下部点和中部点代表了高维空间中低频尺度子空间下的不同分量. 而且在分离低频分量过程中,由于无法预先得知图像中薄云所在低频信息段,针对不同的原始遥感图像,与卷积核做卷积的次数会有所不同,高斯卷积核的参数选择也会有所不同. 以所得到的低频图像中基本只包含云层的低频信息为标准依据,确定所需卷积的次数和卷积核参数的大小. 除高斯卷积核外,也可以采用非高斯的卷积核函数作用于原图像,实施  $f * h$  操作,从而获得不同种类的低频图像.

从物理意义上分析,

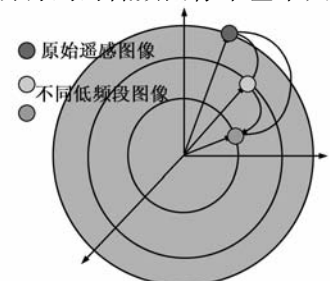
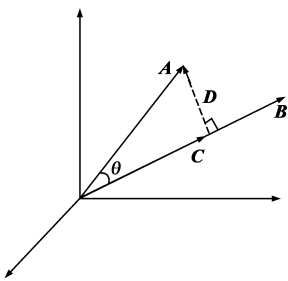


图1 高维空间原始图像与卷积核函数卷积过程示意图

这种操作在一定程度上类似于小波的多层分解,此步骤时间复杂度主要集中在卷积滤波过程中,可以采用快速 FFT 操作,其算法复杂度为  $O(n \log_2 n)$ 。

得到了低频尺度空间下的近似低频分量方向,利用式(3)和式(4)将原始图像矢量向该低尺度空间下的低频分量方向做几何映射,从而将原始图像空间分解为一系列的低频尺度子空间与高频尺度的子空间.其分解过程如图 2 所示:向量  $A$  代表原始遥感图像在高维空间中原始向量,向量  $B$  是  $A$  通过各向同性滤波器迭代滤波后的相应低尺度子空间下的低频分量方向,由原始图像向该低频分量方向做映射得到的向量  $C$  为相应低尺度子空间分量,垂直向量  $D$  即为高尺度子空间分量.然后对得到的低尺度及高尺度子空间分量分别进行抑制、增益变换,分别实现降低并保存遥感图像低频信息的同时,恢复并增强遥感图像高频信息,以便能够达到最后在高维空间中得到新的去云图像的目的。

图2 高维空间中向量的分解计算关系二维示意图



### 3 算法实现与参数选择

由于本算法针对单幅遥感图像,只能利用图像本身的信息.根据对遥感图像的分析,本文采用如下的条件假设作为前提<sup>[7]</sup>:

(1)图像中有薄云覆盖区域的亮度值比图像清晰区域的亮度值大,且图像中云覆盖区域的清晰度比无云区域差;

(2)薄云干扰主要集中在图像的低频区域,地物背景细节相对集中在图像的高频区域;

(3)图像中薄云的分布是有一定厚度变化的,它是一个从最厚处到清晰区域的逐渐减小的过程。

从实际遥感影像来看,相当部分的薄云影响的遥感图像满足这些条件假设.因此,本算法适宜这些遥感图像去云与地表景物细节增强。

根据以上设定的三个前提条件,可以通过对低尺度子空间向量  $C$  及高尺度子空间向量  $D$  的抑制、增益变换来达到遥感图像去云增强的目的,整个算法过程分为如下几个步骤:

(1)利用各向同性滤波器和高维几何分解计算,将高维空间中的图像(点)分解到两个不同尺度的子空间下,前面小节已经对此详细描述。

(2)在不同尺度子空间下,对各向量进行适当的抑制、增益变换,以达到抑制薄云信息、增强地物细节的目的.由于图像中云层的薄厚不均,我们不能以通用的

参数进行抑制或增强.在这里引入一个系数  $\mu$ ,  $\mu$  值大小取决于云层的薄厚,由前面的假设我们已知,云层厚的地方向量变换的幅度应该大,云层薄的地方向量变换幅度应该小.因此  $\mu$  值设置如下:对于低尺度子空间图像成分:( $c_{\max}$  和  $c_{\min}$  分别为所得低频图像中像素最大值与最小值)  $\mu$  表现为  $\mu_L$ ,其变换关系如下:

$$\mu_L(i) = \lambda_L \times \left( 1 - \frac{c(i) - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \right), i \in [1, K] \quad (6)$$

对于高尺度子空间图像成分:( $d_{\max}$  和  $d_{\min}$  分别为所得高频图像中最大值与最小值)  $\mu$  表现为  $\mu_H$ ,其变换关系如下:

$$\mu_H(j) = \lambda_H \times \left( 1 + \frac{d(j) - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \right), j \in [1, K] \quad (7)$$

$\mu_L$  和  $\mu_H$  分别是对低尺度子空间和高尺度子空间分量进行抑制、增益变换的比例系数,这样设置是为了更好的处理“云与非云”的过渡地带,使复原结果边缘更加平滑与自然.在这里  $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  的选择很关键,经多次实验与经验判断, $\lambda_L$  取 0.3 和  $\lambda_H$  取 10 时复原能取得较满意的效果.选取原则为  $0 < \lambda_L < 1, \lambda_H > 1$ 。

(3)将经过相应变换后的各子空间分量在高维空间中重新进行矢量运算,得到去云效果图,在高维空间中的处理过程如图 3 所示.  $C'$  为  $C$  经过变换后的新的低尺度子空间分量,  $D'$  为  $D$  经过变换后的新的高尺度子空间分量.  $A'$  为在高维空间中经过矢量合成的最终的去云矢量.再将所得合成矢量重新映射为图像空间,得到去云遥感图像。

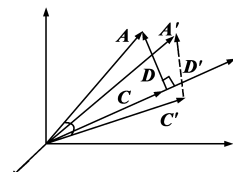


图3 高维空间中高低频分量去云后矢量合成二维示意图

### 4 实验结果与分析

本文选取两幅不同源的单波段光学遥感图像进行实验,图像大小限制为  $256 \times 256$  像素.图 4(a)是一幅航空拍摄农田的遥感图像,图 4(b)~(d)是采用文献[4]中的传统同态滤波去云算法、采用文献[5]中小波分解的去云算法和采用本文去云算法处理后的效果图.图 5(a)是四川省江油市震后遥感图像(部分),图 5(b)~(d)是采用文献[4]中的传统同态滤波去云算法、采用文献[5]中小波分解的去云算法和采用本文去云算法处理后的效果图.所采用同态滤波算法中阶数为 2

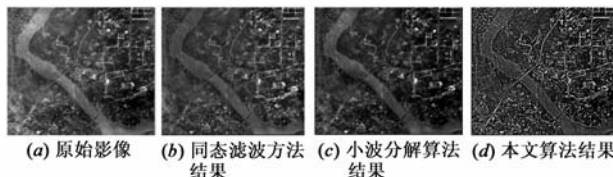


图4 一幅航空农田遥感图像复原结果对比

阶,截至频率距原点为 5 的巴特沃思高通滤波器;小波分解算法中采用 sym3 小波函数进行 5 层小波分解。

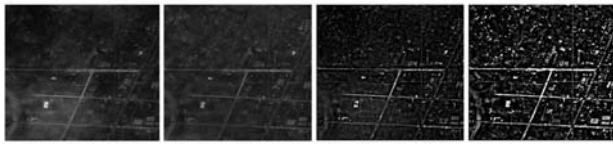


图 5 四川省江油市震后遥感图像(部分)复原结果对比

依靠人眼视觉评价从图中可以看出,直接采用同态滤波处理,图像的整体亮度都得到了降低,因为在高通滤波同时,背景信息的一些低频成分也同时被滤除掉了,因此图像的无云覆盖区域也同时受到影响。而采用小波分解算法的处理结果图在云层去除与景物信息增强方面的表现均不如本文算法。从两幅图像的复原结果可以看出本文算法在云层去除和清晰区域的保护方面均要优于与之对比的两种方法。值得一提的是,本文算法在去除云层的同时还提高了图像主观视觉上的清晰度。本文算法的复杂度不高,用本文算法有助于提高图像处理的速度。

视觉评价图像处理带有主观性,下面采用均值、熵和标准差作为评价参数来客观评价图像处理效果。

(1)均值:均值表示图像中所有像素的平均灰度,图像去云之后,灰度将有所下降。

(2)熵:熵的值反映了图像的信息含量,其值越大,信息越丰富。根据香农(Shannon)信息论的原理,一幅灰度范围是 0~255 的图像,它的熵可用下式计算:( $P_i$  为像素灰度级为  $i$  的出现概率)

$$H = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i \quad (8)$$

(3)标准差:标准差反映了图像的细节信息,其值越大,细节越突出。标准差定义为

$$std(x, y) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum \sum (f(x, y) - \overline{f(x, y)})^2} \quad (9)$$

式中,  $M, N$  是图像的行数和列数,  $f(x, y)$  为坐标  $(x, y)$  处的像素值,  $\overline{f(x, y)}$  是灰度均值。

表 1 和表 2 分别给出了针对两幅遥感图像利用不同的薄云去除算法得到的均值、熵和标准差的大小。处理后的图像均值都小于原图,这是薄云去除的预期结果。熵值反映了图像信息的含量,由于同态滤波在去除薄云的同时也滤掉了一部分有用信息,因此它的熵值小于原图像。而本文算法得到的结果熵值最大,从物理意义上表明了本算法不仅消减了薄云干扰,同时也更多的保留了背景的细节信息。这一点从标准差的值当中也可以看出。从表 1 和表 2 可以看出,本文算法在客观评价标准方面也优于小波与同态滤波算法。

表 1 实验 1 本文算法与对比方法处理结果的均值、熵和标准差

对比结果	均值	熵	标准差
原图	139.1201	7.3485	41.4553
同态滤波	129.6680	6.9416	30.4273
小波算法	104.4407	7.3828	43.0405
本文算法	107.3314	7.5982	65.4259

表 2 实验 2 本文算法与对比方法处理结果的均值、熵和标准差

对比结果	均值	熵	标准差
原图	96.2294	6.8157	28.5498
同态滤波	79.6113	6.0827	17.5716
小波算法	67.5443	7.1827	40.5526
本文算法	79.1379	7.3903	63.0651

## 5 结论

受薄云影响的遥感图像,多数情况下其云雾干扰相对集中在低频部分,地表景物细节相对集中于高频部分。基于高维空间几何信息学将原始遥感图像从图像空间转换至高维空间,在高维空间中做低频与高频分量几何分解,并分别对高频及低频分量在矢量大小和方向上进行抑制、增益变换处理,最终得到去云效果后的新幅遥感图像。

实验结果及其分析表明,本文提出的遥感图像去云算法,能有效的去除遥感图像中的薄云干扰,同时还能增强图像的边缘信息,其计算复杂度低、算法稳定,应用于单幅遥感图像复原,在主观视觉效果和客观评价参数方面优于传统的同类方法。本文从高维空间角度分析解决问题,采用高维空间投影等计算方法,计算直观明了,意义明确。

本文算法的一点不足之处在于:图像处理过程中,原遥感图像与卷积核需要多次卷积得到所需低频段矢量分量(图像),卷积核及卷积次数需要根据不同的遥感图像进行不同选择,很大程度上依赖于主观经验,这降低了整个算法的通用性,因此如何自动寻找合适参数和各项异性滤波器,来提升去云效果将成为下一步研究、改进和发展的主要内容。

## 参考文献

- [1] 王润,刘洪斌,宫瑞.多光谱遥感图像去云方法[J].计算机与现代化,2005,6:13-15.  
Wang Run, Liu Hong-bin, Gong Rui. A method of removal cloud of multispectral satellite image[J]. Computer and Modernization, 2005, 6: 13-15. (in Chinese)
- [2] Song M, Civco D L. A knowledge-based approach for reducing cloud and shadow[A]. Proc. of 2002 ASPRS-ACSM Annual Conference and FIG 22 Congress[C]. Washington, D. C. 2002.

- [3] Wang H, Tan B, Shen Z Y. The processing technology of removing clouds images based on the multi-resource RS image[J]. Journal of Institute of Surveying Mapping, 2001, 18(3):41-44.
- [4] 赵忠明, 朱重光. 遥感图像中薄云的去除方法[J]. 环境遥感, 1996, 11(3):195-199.  
Zhao Zhong-ming, Zhu Chong-guang. Approach to removing cloud from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 11(3):195-199. (in Chinese)
- [5] 朱锡芳, 吴峰, 庄燕滨. 基于 Mallat 算法遥感图像去云雾处理的改进方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(2):241-246.  
Zhu Xi-fang, Wu Feng, Zhuang Yan-bin. An improved approach to remove cloud and mist from remote sensing digital images based on mallat algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2):241-246. (in Chinese)
- [6] 张新明, 沈兰荪. 基于小波的同态滤波器用于图像对比度增强[J]. 电子学报, 2001, 29(4):531-533.  
Zhang Xin-ming, Shen Lan-sun. Image contrast enhancement by wavelet based homomorphic filtering[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(4):531-533. (in Chinese)
- [7] 陈奋. 高分辨率全色波段遥感影像处理中的图像复原问题研究[D]. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文, 2006.  
Chen Fen. Image Restoration in High-resolution Panchromatic Remote Sensing Images[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, 2006. (in Chinese)
- [8] 王守觉, 王柏南. 人工神经网络的多维空间几何分析及其理论[J]. 电子学报, 2002, 31(1):1-4.  
Wang Shou-jue, Wang Bai-nan. Analysis and theory of high-dimension space geometry for artificial neural networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 31(1):1-4. (in Chinese)
- [9] Shoujue Wang, Yangyang Liu. An algorithm for removing facial makeup disturbances based on high dimensional imaginal geometry[J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 15(4A):789-792 (SCI No.: 103XJ).

## 作者简介



**李新宇** 男, 1976 年生于贵州贵阳, 1999 年本科毕业于清华大学材料系; 2002 年毕业于中科院过程工程所, 获硕士学位; 2006 年毕业于中科院半导体所, 获博士学位. 研究领域: 图像处理、高维几何信息学、语音信号处理.  
E-mail: lixinyu2000@tsinghua.org.cn



**刘扬扬 (通信作者)** 女, 1976 年生, 中国科学院半导体研究所神经网络与形象思维实验室副研究员, 主要研究领域有: 人脸(目标)识别、跟踪、多传感器信息处理、图像理解、高维几何信息学等. 在国内外核心期刊和各类学术会议上发表学术论文十余篇, 其中 SCI、EI 检索 10 篇.  
E-mail: liuyangyang@semi.ac.cn



**蒋雪娜** 女, 1984 生于吉林省长春市, 中国科学院半导体所硕士研究生, 主要研究领域: 图像处理、智能信息处理、机器形象思维等.



**王守觉** 男, 院士, 1925 年生于上海, 早年就读于西南联大和同济大学, 1960 年成立半导体所后历任器件室主任、副所长、所长等职务, 1980 年当选为中国科学院学部委员(院士), 现从事半导体超高速电路与神经网络算法、高维空间几何信息学研究.