

改进暗通道遥感影像去雾方法及效果分析

江政远^{1,2,3}, 胡 勇^{2,3}, 宋文韬^{1,2,3}, 巩彩兰^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 遥感影像的预处理工作是遥感数据应用的基础。去除云雾是影像预处理工作的重要组成部分。针对遥感影像雾霾浓度分布不均匀的问题, 提出一种改进的暗通道遥感影像去雾方法。以“高分一号”(GF-1)卫星为例, 根据影像灰度图中的灰度值对影像雾霾浓度区域进行划分, 对每个区域中暗原色值的获取方式进行改进, 使用导向滤波优化大气传输率, 以归一化植被指数(NDVI)为基础, 设计用于评价影像去雾质量的定量指标。结果表明: 所提出的方法能明显去除雾霾干扰, 有效改善卫星影像数据的视觉效果, 增强影像细节。该方法去雾处理后的遥感数据能应用于定量遥感, 提高遥感影像的可用性及有效性。

关键词: 雾霾影像; 暗通道; 归一化植被指数; 导向滤波; “高分一号”卫星

中图分类号: P237 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.04.012

Defogging Effect Evaluation of Remote Sensing Image Based on Improved Dark Channel

JIANG Zhengyuan^{1,2,3}, HU Yong^{2,3}, SONG Wentao^{1,2,3}, GONG Cailan^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Remote sensing image preprocessing is the foundation of remote sensing data application. Removing the influence of cloud and fog on image data is an important part of image preprocessing. In this paper, an improved dark channel fog removal method is proposed based on the GF-1 satellite, in view of the uneven distribution of haze concentration in remote sensing images. Firstly, the image haze concentration region is divided according to the gray value of image, and the acquisition mode of dark original color in each region is improved. Then, the atmosphere transmission rate is optimized by guided filtering. Finally, based on the NDVI (normalized difference vegetation index), a set of image defogging quality evaluation indicators is designed and compared with the fog-free image data. The quantitative analysis on the results of fog removal is carried out. The results show that the method can obviously remove the fog interference, effectively improve the visual effect of the satellite image data and enhance image details, and the remote sensing data after processed by the improved dark channel fog removal algorithm can be applied to the quantitative remote sensing, improving the availability and effectiveness of the remote sensing data.

Keywords: remote sensing image with fog; dark channel; normalized difference vegetation index(NDVI); guided filter; GF-1 satellite

0 引言

随着遥感技术的飞速发展, 遥感影像的需求

量越来越大。然而, 遥感影像成像过程容易受到云、雾、霾等影响, 造成影像色彩灰暗、对比度降

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(41401490)

作者简介: 江政远(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感应用、图像处理等。

低、目标模糊不清等问题,导致影像数据利用率降低^[1]。随着大气污染日益严重、雾霾天气增多,消除遥感影像数据中的雾霾影响成为亟待解决的问题。遥感影像去雾不仅可以使影像数据中的可用范围增大,而且能降低各种复杂的气候条件对遥感成像的影响。

遥感影像去雾方法主要分为两类。一是基于大气物理模型的影像复原方法。通过了解影像退化的物理机理,构建大气传输模型,从传输方程的角度,对大气的散射和反射作用进行建模分析,使用反演手段去除雾霾^[2-3],这类方法考虑了影像的成像过程,更容易消除云雾影响,但所涉及的大气物理模型一般较为复杂,参数众多,如果没有足够多的约束条件,则在去雾过程中容易产生较多的影像噪声。二是基于影像增强的方法。其实质是削减处于低频的云雾信息,从而使影像对比度增强,如:自适应滤波的高分辨率遥感影像去雾霾算法^[4]、基于同态滤波的遥感影像去雾霾方法^[5]、基于直方图非线性拉伸的红外影像增强算法^[6]、基于线性拉伸的遥感影像处理方法^[7]、基于 Retinex 和小波变换的遥感影像去雾方法^[8],但这些方法在过滤处于低频的云雾信息时会过滤一部分地物细节信息,导致地物纹理的缺失及边缘模糊。

随着计算机视觉技术的发展,目前国内学者在自然影像的去雾处理方面已有一些卓有成效的方法。如 HE 等^[9]以暗原色统计先验去雾算法为约束条件,简化了大气散射物理模型的参数,在引入数学模型的同时,通过统计的先验知识简化数学模型的计算过程,使模型求解仅需少量容易获取的参数;王时震等^[10]针对遥感影像的特点,对基于暗原色统计先验的暗通道去雾方法中大气透射率及大气光值的求解过程进行了简化;李国等^[11]采用了暗原色统计规律对“天绘一号”卫星遥感影像去雾技术进行了研究;廖国忠等^[12]利用多核 CPU 并行计算,提高了基于暗原色统计先验去雾方法的效率。以上方法并未考虑卫星遥感影像的成像幅宽较大,导致成像区域内雾霾分布不均匀的问题。

本文以“高分一号”(GF-1)卫星遥感影像为例,在暗原色统计先验的基础上,针对卫星遥感影像雾霾分布不均匀的特点,改进了暗原色值的计算方法,使用导向滤波优化传输率影像,并基于归一化植被指数(NDVI)设计了可对去雾算法定量分析的指标。

1 基于暗原色统计先验的自然图像去雾算法

暗原色统计先验去雾算法是在对 5 000 多幅无雾自然图像统计后得到的规律。该规律认为在无雾自然图像的非天空区域内,总存在一部分能被认定为“暗像元”的像素,至少有 1 个颜色通道的像素值趋近于 0^[9],即局部影像 3 个颜色通道(R,G,B)像素值的最小值趋近于 0,其表达式为

$$J_{\text{dark}}(x,y) = \min_{c \in (R,G,B)} \left(\min_{(x,y) \in o(x)} (J_c(x,y)) \right) \approx 0 \quad (1)$$

在成像中使用大气退化模型来描述云雾退化过程,其表达式为

$$I(x,y) = J(x,y)t(x,y) + (1-t(x,y))A \quad (2)$$

式中: $I(x,y)$ 为观测图像的光照强度; $J(x,y)$ 为目标场景的反射强度; $t(x,y)$ 为场景内大气传输过程中的传递效率,即大气透射率; A 为大气光强。

对式(2)变换,得

$$\frac{I(x,y)}{A} = \frac{J(x,y)}{A}t(x,y) + 1 - t(x,y) \quad (3)$$

对式(3)进行 2 次最小值滤波运算,得

$$1 - \min_{c \in (R,G,B)} \left(\min_{(x,y) \in o(x)} \frac{I(x,y)}{A} \right) = t(x,y) \left(1 - \min_{c \in (R,G,B)} \left(\min_{(x,y) \in o(x)} \frac{J(x,y)}{A} \right) \right) \quad (4)$$

根据暗原色统计先验,结合式(1)、(4)可得

$$t(x,y) = 1 - \min_{c \in (R,G,B)} \left(\min_{(x,y) \in o(x)} \frac{I(x,y)}{A} \right) \quad (5)$$

因此,如果 A 值已知,则可得到 $t(x,y)$ 预估值。

在晴天,大气中也存在一些颗粒悬浮物,使肉眼在观察距离较远物体时,仍然感觉到雾的影响,这种影响会随着距离的增加而变大。如果不把雾的影响全部去除,而是保留一部分,则去雾后图像将更加真实,且具备一定的深度感,颜色也更为自然。因此,可在式(5)中引入 1 个修正因子 ω ($0 \leq \omega \leq 1$),将式(5)变换为

$$t(x,y) = 1 - \omega \min_{c \in (R,G,B)} \left(\min_{(x,y) \in o(x)} \frac{I(x,y)}{A} \right) \quad (6)$$

从自然图像中得到 A 值,用式(6)计算 $t(x,y)$,结合式(2),可得到去雾后图像的 $J(x,y)$,该过程用公式表示为

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - A}{t(x,y)} + A \quad (7)$$

2 本文算法

受雾霾浓度的影响,与薄雾区域相比,浓雾区域暗通道的灰度值较大。如果直接求解影像全局的暗原色,会使薄雾区域的去雾影像色彩失真。邻域尺寸会对去雾效果产生影响,尺寸过大会造成光环效应,尺寸过小则会使影像出现过饱和或暗沉现象。当对雾霾影像按像素点取其三原色通道中的最小值时,可消除光环效应,但暗沉现象最为严重。本文去雾算法

的具体流程如图 1 所示。具体包括以下步骤:

步骤 1 将影像按影像灰度值分为重度浓雾区域、中度雾气区域和轻度薄雾区域。使用 k_means 非监督分类算法对影像灰度图中按灰度值分类,把 k_means 分类后的结果作为 graph cuts 分割算法的初始输入,应用 graph cuts 算法将影像分为 3 个区域。

步骤 2 分区域统计暗原色值,得到暗原色分布,暗原色获取公式为

$$J_{\text{dark}}(x, y) = \begin{cases} \min_{c \in (R, G, B)} (J_c(x, y)), (x, y) \text{ 属于轻度薄雾区域} \\ \min_{c \in (R, G, B)} (\min_{(x, y) \in \Omega(x)} (J_c(x, y))), (x, y) \text{ 属于中度雾气区域} \\ \text{mean} (J_c(x, y)), (x, y) \text{ 属于重度浓雾区域} \end{cases} \quad (8)$$

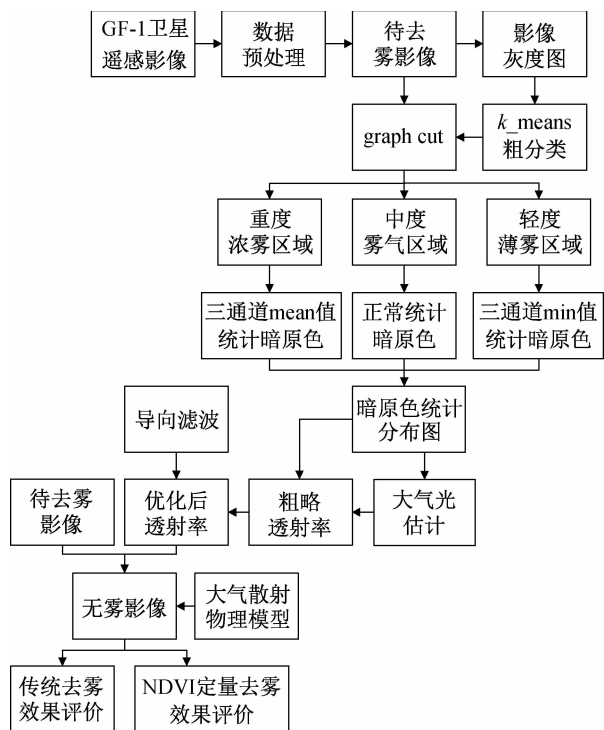


图 1 遥感影像去雾处理流程

Fig. 1 Process of fog removal for remote sensing image

步骤 3 计算式(7)中的 A 值。选取暗原色统计图中按亮度值的高低进行排列,提取前 1% 的像素,在原始有雾影像中计算对应像素位置上亮度值的平均值,将该平均值作为 A 值参与去雾运算。

步骤 4 计算式(7)中的大气透射率 $t(x, y)$ 分布。将步骤 3 中获得的 A 值代入式(6)计算大气透射率 $t(x, y)$, $\omega = 0.98$ 。

步骤 5 将 A 值和 $t(x, y)$ 代入式(7),获得去

雾后影像。

为获得暗原色值,根据影像灰度图中的像素灰度值将影像分为重度浓雾区域、中度雾气区域、轻度薄雾区域。采取分区域统计的原因在于暗原色值会随着雾气浓度的增加而增加,直接计算邻域内最小值所得到的暗原色值较低,将导致该区域透射率计算有误。选择像素点 3 个通道的平均值作为暗原色统计值,不仅能反映影像真实的雾气分布状况,还能得到更精细的暗原色值和透射率值,从而使原始影像的雾气分布痕迹很好保留,且其他区域不至于出现颜色失真的情况。薄雾区域与浓雾区域相比,由于受雾霾散射、反射的影响较小,整个区域色彩更接近于地物的真实色彩,亮度更低,对暗沉现象反应不明显,因此选择区域内像素点 3 个通道的最小值作为该像素点的暗原色统计值。这样不仅可以消除暗沉现象的影响,还可以防止光环效应的出现。改进前后暗原色统计分布如图 2 所示。

3 实验数据与实验结果

3.1 实验数据

本文采用 GF-1 卫星 PMS1 相机于 2013 年 12 月 8 日(雾霾天气)和 2013 年 12 月 12 日(晴空天气)拍摄的遥感影像,实验影像如图 3 所示,区域为江苏省苏州市常熟市,成像中心经纬度分别为 $(120.9^{\circ}\text{E}, 31.6^{\circ}\text{N})$ 和 $(120.8^{\circ}\text{E}, 31.6^{\circ}\text{N})$,成像幅宽优于 60 km,像素分辨率为 8 m。使用无雾影像的 NDVI 和去雾前后的 NDVI 组合起来设计 1 组指标,对算法的去雾效果进行定量分析。

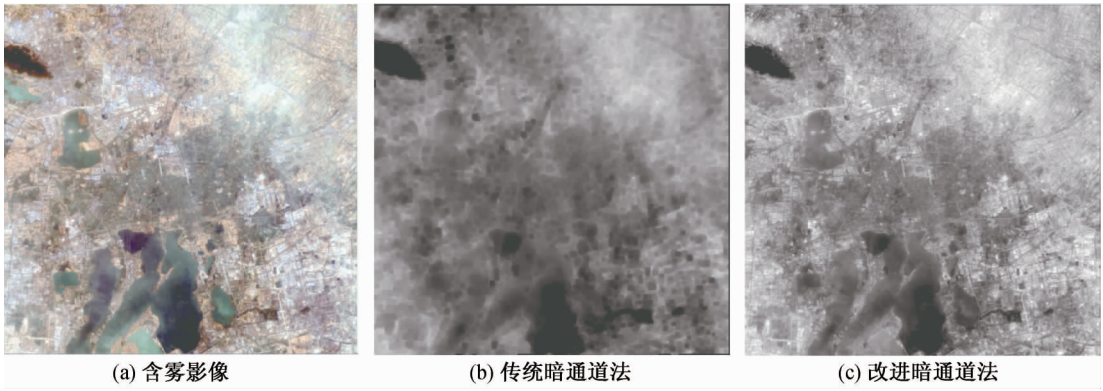


图 2 暗原色统计分布对比

Fig. 2 Comparison of dark original color statistic distribution

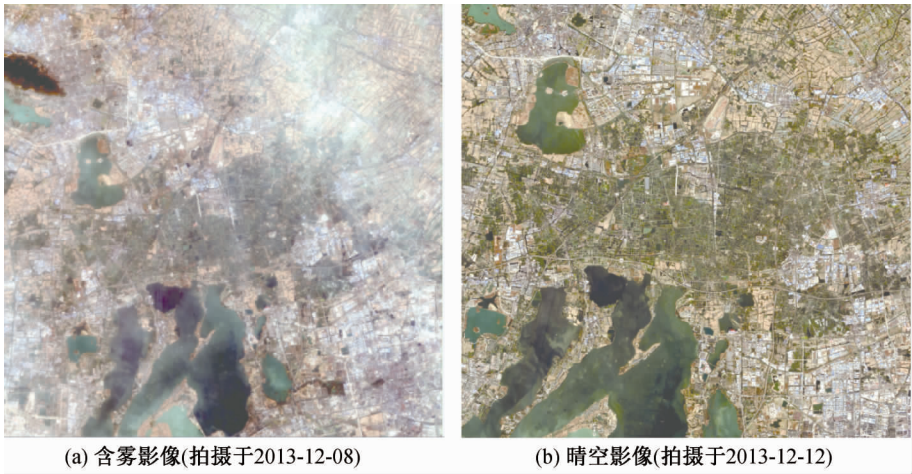


图 3 实验影像

Fig. 3 Image date of experiment

3.2 实验结果

采用改进暗通道法、传统暗通道法、同态滤波法 3 种去雾算法对遥感雾霾影像进行去雾处理,同时与 1 幅临近时相的晴空遥感影像[见图 3(b)]进行对比,实验结果对比如图 4 所示。由图可见:3 种算法都有一定去雾效果;改进暗通道法与传统暗通道法相比,对浓雾区域的去雾效果更为明显,处理后的影像更为清晰;同态滤波法在处理浓雾区域时去雾效果较差,且有一定的颜色失真;与无雾影像相比,3 种算法去雾后图像颜色相对较暗。

图 5 为局部影像的去雾效果,图中影像区域对应图 4 中红色矩形窗口标记的影像区域。由图 5 可知:与传统暗通道法和同态滤波法相比,改进暗通道法在处理含雾影像中“井”字形房屋时,细节边缘恢复效果更好,影像边缘及细节特征更接近于无雾影像。

4 分析与讨论

4.1 基于影像质量指标的去雾效果分析

影像质量评价指标主要为熵、能量、标准差、平均梯度等。各种去雾算法对影像处理前后的指标见表 1。

表 1 去雾前后影像指标对比					
Tab. 1 Comparison of image indexes before and after defogging					
指标	有雾影像	改进暗通道法	传统暗通道法	同态滤波法	无雾影像
熵	2.420	2.671	2.558	2.439	2.715
能量	0.115	0.167	0.128	0.119	0.185
标准差	20.509	36.481	32.413	29.535	38.447
平均梯度	1.093	4.003	3.685	3.613	4.106

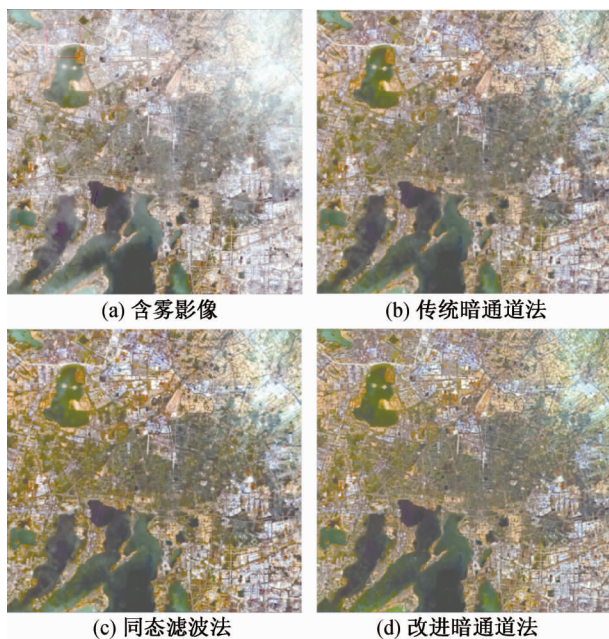


图 4 实验结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental results

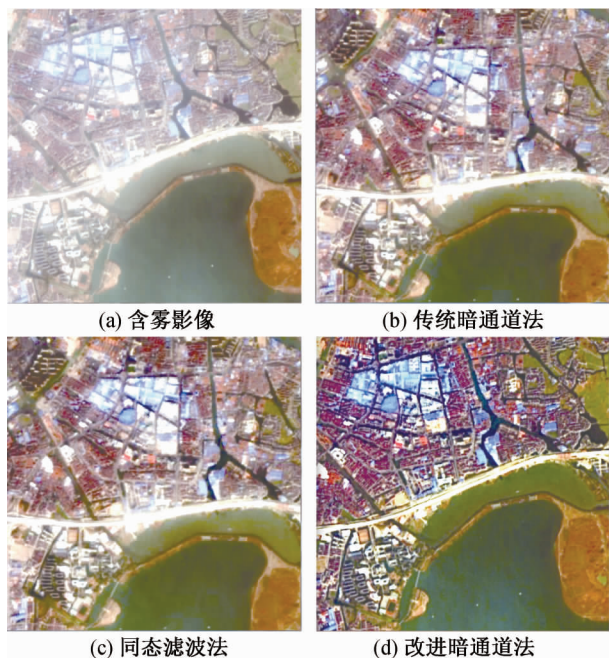


图 5 局部放大对比

Fig. 5 Comparison of partial enlarged details of fog removal image

熵是影像包含信息量的随机性度量,反映影像灰度分布的复杂程度。熵值越大,说明影像越复杂。由表 1 可见:经过 3 种算法去雾后,影像信息更加丰富。其中,应用改进暗通道法去雾处理后得到的影

像熵值最大,且更接近于无雾影像的熵值,说明本文算法去雾后的影像具有更丰富的纹理信息。

能量是灰度共生矩阵各元素值的平方和,反映影像灰度的分布均匀程度和纹理粗细度,其值越大,说明当前纹理的规则变化较为稳定。从表 1 可见:经过 3 种算法去雾处理后,影像能量值都有所增加。其中,应用改进暗通道法后得到的影像能量值增加最为明显,且最接近无雾影像的值,说明本文算法去雾后获得的影像更接近于真实无雾的影像。

标准差通常被用来度量影像对比度,其值越大,说明对比度越大,层次越丰富,目标越清晰。从表 1 可见:经过 3 种算法处理后,影像的标准差均有所提高。其中,应用改进暗通道法去雾后得到的影像标准差增加最为明显,且最接近无雾影像的标准差值,说明本文算法去雾后得到的结果影像对比更加明显,层次更为丰富。

平均梯度反映了影像细节,其值越大,说明影像细节越清晰,边缘保持效果越好。从表 1 可见:经过 3 种算法处理后,平均梯度均有所提高。其中,应用改进暗通道法去雾后得到的影像平均梯度增加最为明显,且最接近无雾影像的值,说明本文算法去雾后获得的影像可以恢复更多的影像细节。

4.2 NDVI 定量评价

与自然图像相比,遥感影像更为关注量化应用,但云雾的遮挡不利于遥感影像的定量运用。NDVI 被应用于检测植被生长状态、植被覆盖度等,是定量遥感的重要应用指数之一。本文将晴空影像的 NDVI 和去雾前后的 NDVI 进行组合,设计 1 组指标,对算法的去雾效果进行定量分析。将临近时相晴空影像的 NDVI 定义为 NDVI 真值;去雾前后影像的 NDVI 值与 NDVI 真值的差为去雾前后 NDVI 真值差。利用去雾前后 NDVI 面积比和去雾前后 NDVI 真值差 2 个指标,探讨改进暗通道去雾算法对含雾遥感影像数据定量运用的影响,将从原始影像中截取 1 000 像素×1 000 像素区域(见图 6)来进行 NDVI 的统计分析,结果见表 2、3。

将临近时相晴空影像的 NDVI 值定义为 NDVI 真值,使用去雾前后的 NDVI 值与 NDVI 真值相减,求得 NDVI 真值差。根据晴空影像 NDVI 真值的范围统计去雾前后相同区域内 NDVI 真值差的平均值,见表 2。由表可得:去雾后遥感影像的 NDVI 值更接近晴空影像的 NDVI 值。整体而言,去雾

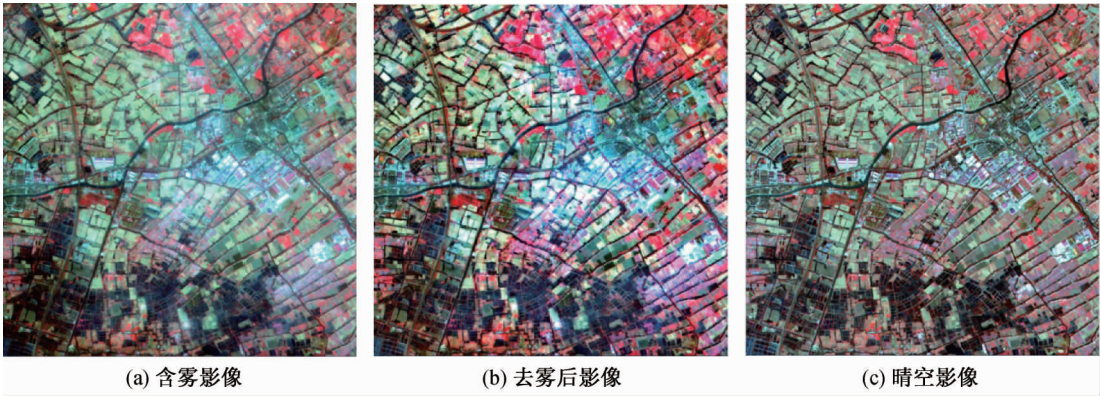


图 6 用于计算 NDVI 指数的假彩色合成影像

Fig. 6 False color composite images used to calculate NDVI index

表 2 去雾前后 NDVI 真值差

Tab. 2 NDVI difference before and after defogging

晴空影像 NDVI 区域	去雾前 NDVI 真值差	去雾后 NDVI 真值差
>0	-0.136	-0.076
>0.05	-0.154	-0.062
>0.10	-0.175	-0.045
>0.20	-0.216	-0.016
>0.30	-0.259	0.012

表 3 去雾前后 NDVI 面积比

Tab. 3 NDVI area ratio before and after defogging

NDVI 值区域	去雾前 NDVI 面积比/%	去雾后 NDVI 面积比/%
>0	55.93	65.82
>0.05	35.57	69.03
>0.10	21.34	77.21
>0.15	13.63	87.82
>0.20	11.26	103.80
>0.30	11.64	159.23

后 NDVI 真值差更趋近于 0,即与去雾前 NDVI 相比,去雾后的 NDVI 更接近晴空影像的 NDVI。随着 NDVI 值的增加,去雾后的 NDVI 真值差越来越趋近于 0。也就是说,随着 NDVI 值的增加,去雾后的 NDVI 更接近无雾影像的 NDVI 值,说明本文算法对于含雾遥感影像数据的定量运用有着积极作用,有雾影像去雾后可进行正常的定量应用。

当 $NDVI>0$ 时,可以认为有植被覆盖;NDVI 值随着植被覆盖率的增大而变大。本文将统计不同 NDVI 值区域时,去雾前后的 NDVI 区域的面积相

对晴空影像的面积,来分析去雾前后植被覆盖率的变化。去雾前后 NDVI 面积比见表 3。由表可得,当 $NDVI>0$ 时,去雾前后 NDVI 大于某个数值的面积都相应增加,且随着 NDVI 值增加,去雾后影像 NDVI 大于某数值的占比越来越大,逐渐接近于晴空影像的 NDVI 面积。经过本文算法去雾后,NDVI 面积比更接近于晴空时的状态,使含雾遥感数据能应用于定量遥感,提高了遥感数据的可用性 及有效性。

5 结论

本文基于暗原色统计先验去雾算法,以 GF-1 卫星遥感影像为例,采取分区域改进暗原色值的获取方式,解决由于遥感影像幅宽较大引起的雾气分布不均匀的问题。实验表明:利用本文改进的暗通道法可实现对卫星遥感影像的去雾处理,有效改善卫星影像数据的视觉效果,提高含雾卫星影像数据的可用性和有效性。该方法对卫星遥感影像数据预处理工作中的云雾去除具有一定的参考价值,对地物识别、分类等卫星影像数据后续的开发处理有一定促进作用。该方法与传统暗通道法相比,能获得更好的去雾结果。另外,对 NDVI 值统计结果说明该方法对于有雾遥感影像的定量应用有积极意义。但本文仅考虑了雾霾的去除,在遥感影像上,云和雾一般同时存在,不能仅考虑某种影响,而要对同时去除云、雾的方法进行研究;本文仅对高空间分辨率的遥感影像进行了研究,随着遥感技术的不断发展,如何对高光谱分辨率、高时间分辨率的遥感影像去雾将成为重点研究领域;此外,可将去除的雾霾信息单独保留,利用多时相的遥感数据进

行雾霾的动态变化研究。

参考文献

- [1] 陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以 5·12 汶川地震为例[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 276-279.
- [2] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Removing weather effects from monochrome images[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. [S. l.]: IEEE, 2001, 2: II-186-II-193.
- [3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [4] 贺辉, 彭望球, 匡锦瑜. 自适应滤波的高分辨率遥感图像薄云去除算法[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 305-311.
- [5] 叶秋果, 宗景春, 李钊, 等. 基于同态滤波的遥感图像去云雾处理[J]. 海洋测绘, 2009, 29(3): 45-46, 57.
- [6] 杨必武, 郭晓松, 王克军, 等. 基于直方图非线性拉伸的红外图像增强新算法[J]. 红外与激光工程, 2003(1): 1-3, 7.
- [7] 殷年. 基于线性拉伸的遥感图像处理[J]. 光电子技术与信息, 1998(5): 29-33.
- [8] 朱锡芳, 徐芳芳. Retinex 和小波变换去除遥感图像云雾方法分析[J]. 常州工学院学报, 2007, 20(5): 8-13.
- [9] HE K M, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on. [S. l.]: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [10] 王时震, 万惠琼, 曾令沙, 等. 应用暗原色先验规律的遥感图像去雾技术[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(3): 182-185.
- [11] 李国, 姜坚, 哈长亮. 暗原色与导向滤波结合的遥感影像去雾技术[J]. 北京测绘, 2017(4): 83-86.
- [12] 廖国忠, 高慧, 张伟. 基于多核 CPU 的遥感去雾并行算法研究[J]. 工程地球物理学报, 2017(3): 364-370.

(本文编辑: 应振华)