

# 基于独立成分分析的偏振遥感图像大气校正

汪杰君<sup>1,2,3</sup> 杨杰<sup>1</sup> 张文涛<sup>1,2</sup> 王新强<sup>1,3</sup> 叶松<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学, 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

<sup>2</sup>桂林电子科技大学, 广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

<sup>3</sup>广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 针对不存在天空区域的偏振遥感图像, 提出基于独立成分分析的大气校正算法。根据大气光和场景光高频信息的独立性, 由独立成分分析和互信息最优化原则估算大气偏振度, 再结合源图像中的先验知识和大气散射物理模型估算无穷远处大气光强。通过实验对比分析, 得到的大气信息结果与理论值相匹配, 验证了大气信息估算的合理性。同时, 为抑制大气介质造成的遥感图像退化影响, 提出基于模糊规则修正线偏振度, 校正大气光信息  $A$ , 改善了图像质量。校正后的偏振遥感图像更准确地反映了地物目标特征, 提高了目标探测和识别能力。

**关键词** 图像处理; 偏振图像; 图像复原; 物理模型; 散射

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.011001

## Atmospheric Correction of Polarization Remote Sensing Image by Independent Component Analysis

Wang Jiejun<sup>1,2,3</sup> Yang Jie<sup>1</sup> Zhang Wentao<sup>1,2</sup> Wang Xinqiang<sup>1,3</sup> Ye Song<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

<sup>2</sup>*Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

<sup>3</sup>*Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin, Guangxi 541004, China*

**Abstract** when the sky is not in the field of view, the atmospheric correction algorithm based on independent component analysis is proposed. According to the independence of the high frequency information of the atmosphere and scene light, the polarization degree of atmosphere is estimated by independent component analysis and mutual information optimization principle, and the airlight intensity at infinity is estimated with prior knowledge of the source image and atmospheric scattering physical model. Through experimental contrast analysis, the obtained atmospheric information results match the theoretical value, and the reasonability of atmospheric information estimation is verified. Meanwhile, for the influence of sensing image degradation caused by atmospheric medium, the linear polarization degree is fixed based on fuzzy rule, the airlight information is corrected, and the image quality is improved. The polarization remote sensing image reflects the terrain target characteristics more accurately after correction, and the ability of target detection and recognition is improved.

**Key words** image processing; polarimetric image; image reconstruction; physical model; scattering

**OCIS codes** 100.3020; 110.5405; 330.0330; 260.5430; 150.1488

## 1 引言

利用偏振信息复原遥感图像已经有了广泛的研究<sup>[1-5]</sup>, 这类算法通过估算大气光参数, 依据场景先验条

收稿日期: 2015-05-25; 收到修改稿日期: 2015-07-03; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 广西自然科学基金(2012GXNSFBA053170)、广西教育厅重点项目(ZD2014053)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ14108, YQ15111)

作者简介: 汪杰君(1974—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测和遥感信息处理等方面的研究。

E-mail: wangjiejun@guet.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: yesongmail@sina.com

件建立大气散射物理模型反演图像信息<sup>[6-7]</sup>。而目前对大气光的估算多为基于天空区域<sup>[8-11]</sup>,利用无穷远处大气光强和大气偏振度由天空区域来估算,然而当不存在天空区域时,先前的大气信息估算算法不再适用。针对上述问题,提出了基于独立成分分析的大气偏振度的估算算法,根据场景中两个不同景深的相似目标估算大气光强,实现大气信息的估算,同时对大气信息进行校正,达到了改善图像质量的目的。

## 2 理论背景

根据大气散射模型<sup>[9]</sup>(图1),成像系统接收到的强度信息由场景光强  $D$  和大气光强  $A$  组成。成像系统获得的总光强表达式为

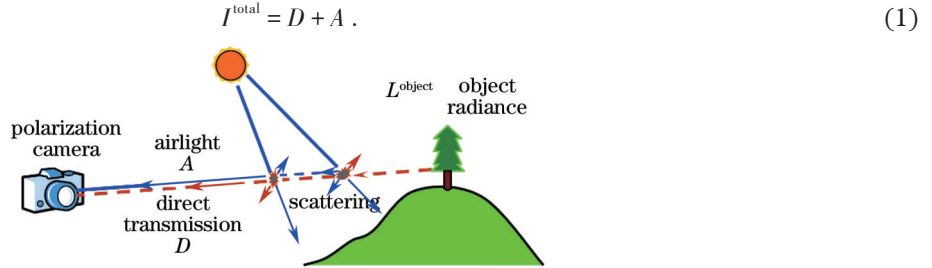


图1 大气散射物理模型

Fig.1 Physical model of atmospheric scattering

定义在有大气散射影响时的场景目标强度为  $L^{\text{object}}$ , 摄像系统获取的场景光强信息为

$$D(x, y) = L^{\text{object}} T, \quad (2)$$

式中  $T$  为大气透射比。根据大气散射物理模型可得大气光强  $A(x, y)$  为

$$A(x, y) = A_{\infty}(1 - T) = \frac{P_s(x, y) \cdot I^{\text{total}}(x, y)}{p}, \quad (3)$$

式中  $A_{\infty}$  为无穷远处大气光强,  $p$  为大气偏振度,  $P_s$  为场景线偏振度。光的偏振特性可以用 Stokes 向量  $[I^{\text{total}} \quad Q \quad U \quad V]^T$  表示, 绝大多数地物的圆偏振分量  $V$  在仪器检测范围内可以忽略, 因此可以取  $V = 0$ 。当光束通过方位角度为  $\beta$  的起偏器后, 偏振相机获得的光强  $I(\beta)$  为

$$I(\beta) = \frac{1}{2} [I^{\text{total}} + Q \cos(2\beta) + U \sin(2\beta)]. \quad (4)$$

利用不同  $\beta$  角度的偏振图像  $I(\beta)$  可求解出 Stokes 参量  $I^{\text{total}}$ 、 $Q$  和  $U$ , 并计算  $P_s$ ,

$$P_s(x, y) = \frac{\sqrt{Q(x, y)^2 + U(x, y)^2}}{I^{\text{total}}(x, y)}. \quad (5)$$

由(1)~(3)式得校正后的场景辐射

$$L^{\text{object}} = \frac{D}{T} = \frac{I^{\text{total}} - A}{1 - \frac{A}{A_{\infty}}}. \quad (6)$$

## 3 大气信息参数的估算

### 3.1 大气偏振度 $p$

独立成分分析<sup>[12]</sup>通过已知的图像,找到最优的分离矩阵使得  $A$  和  $D$  之间的相关程度最小。通常独立成分分析过程是寻找  $A$  和  $D$  之间统计学的独立性<sup>[13]</sup>,然而由(1)式可知,  $A$  和  $D$  存在较大的负相关。事实上,这种高相关性主要存在于  $A$  和  $D$  低频信息中,而高频分量具有较好的独立性。因此,可利用图像的高频成分估算大气偏振度。为便于分析,将  $I^{\text{total}}$  分解<sup>[3]</sup>为平行偏振方向上的分量  $I^{\parallel}$  和垂直于偏振方向上的分量  $I^{\perp}$ , 则:

$$\begin{cases} I^{\parallel}(x, y) = \frac{D(x, y)}{2} + A(x, y) \frac{1+p}{2} \\ I^{\perp}(x, y) = \frac{D(x, y)}{2} + A(x, y) \frac{1-p}{2} \end{cases}. \quad (7)$$

由(7)式可知,  $I^{\parallel}$  中包含大气光分量最大, 偏振片对大气光抑制作用最弱, 而  $I^{\perp}$  表示偏振片对大气光抑制作用最强。

采用小波变换对图像进行分解得到图像  $I^{\perp}$ 、 $I^{\parallel}$ 、 $D$  和  $A$  的高频信息  $I_H^{\perp}(x,y)$ 、 $I_H^{\parallel}(x,y)$ 、 $D_H(x,y)$  和  $A_H(x,y)$ 。根据(7)式可得  $A_H$ 、 $D_H$  与  $I_H^{\perp}$ 、 $I_H^{\parallel}$  之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} A_H \\ D_H \end{bmatrix} = \mathcal{R} \begin{bmatrix} I_H^{\perp} \\ I_H^{\parallel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/p & -1/p \\ (p-1)/p & (p+1)/p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_H^{\perp} \\ I_H^{\parallel} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

利用互信息表示  $A_H$  和  $D_H$  之间的相关程度, 表达式为

$$\mathcal{M}(A_H, D_H) = \mathcal{H}_{A_H} + \mathcal{H}_{D_H} - \mathcal{H}_{A_H, D_H}, \quad (9)$$

式中  $\mathcal{H}_{A_H}$ 、 $\mathcal{H}_{D_H}$  分别为  $A_H$ 、 $D_H$  的信息熵,  $\mathcal{H}_{A_H, D_H}$  为  $A_H$ 、 $D_H$  的联合信息熵。由(8)式可知,  $A_H$ 、 $D_H$  存在相同因子  $1/p$ , 由于尺度因子对信息熵的计算没有影响, 因此,  $A_H$ 、 $D_H$  可表示为

$$\begin{cases} \hat{A}_H(x,y) = pA_H = I_H^{\perp}(x,y) - I_H^{\parallel}(x,y) \\ \hat{D}_H(x,y) = pD_H = \lambda_1 I_H^{\perp}(x,y) + \lambda_2 I_H^{\parallel}(x,y) \end{cases}, \quad (10)$$

式中

$$\lambda_1 = (p-1), \quad \lambda_2 = (p+1). \quad (11)$$

此时, (8)式中矩阵  $\mathbf{R}$  可表示

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由(8)~(12)式可得  $\hat{A}_H$ 、 $\hat{D}_H$  的信息熵表达式为

$$\mathcal{M}(\hat{A}_H, \hat{D}_H) = \mathcal{H}_{\hat{A}_H} + \mathcal{H}_{\hat{D}_H} - \log|\det(\mathbf{R})| - \mathcal{H}_{I_H^{\perp}, I_H^{\parallel}}. \quad (13)$$

由于  $I_H^{\perp}$ 、 $I_H^{\parallel}$  是源图像数据, 由(10)式可知,  $\hat{A}_H(x,y)$  与  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  无关, 因此可忽略  $\hat{A}_H$ 、 $I_H^{\perp}$  和  $I_H^{\parallel}$  项, 则最小化互信息估算项可表示为

$$\{\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2\} = \arg \min_{\lambda_1, \lambda_2} \left\{ \mathcal{H}_{\hat{D}_H} - \log|\lambda_2 + \lambda_1| \right\}, \quad (14)$$

$\hat{D}_H$  的信息熵  $\mathcal{H}_{\hat{D}_H}$  为

$$\mathcal{H}_{\hat{D}_H} = \varepsilon \left\{ -\log[\mathcal{F}(\hat{D}_H)] \right\}, \quad (15)$$

式中  $\varepsilon$  为期望,  $\mathcal{F}(\hat{D}_H)$  为  $\hat{D}_H$  的概率密度函数, 表达式为

$$\mathcal{F}(\hat{D}_H) = \mu(\gamma, \sigma) \exp \left[ -\left( \left| \hat{D}_H \right| / \sigma \right)^{\gamma} \right], \quad (16)$$

式中  $\gamma \in (0, 2)$  为分布参数,  $\mu(\gamma, \sigma)$  为标准化常量。尺度因子  $\sigma$  与标准差有关。考虑到独立成分分析对强度的尺度因子不敏感, 因此设置尺度因子  $\sigma = 1$ 。由(15)、(16)式得:

$$\mathcal{H}_{\hat{D}_H} = V(\gamma) + \frac{1}{N} \sum_{x,y} \left| \hat{D}_H(x,y) \right|^{\gamma}, \quad (17)$$

式中  $N$  为图像像元总数,  $V(\gamma) = \log[\mu(\gamma)]$ , 因为  $V(\gamma)$  与  $\hat{D}_H$  相互独立, 因此  $V(\gamma)$  可忽略。为使(14)式有唯一的  $(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2)$ , (17)式应为凸函数, 取  $\gamma = 1$ 。由(14)、(17)式可得:

$$\{\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2\} = \arg \min_{\lambda_1, \lambda_2} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{x,y} \left| \hat{D}_H(x,y) \right| - \log|\lambda_2 + \lambda_1| \right\}. \quad (18)$$

由(18)式可以估算出  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ , 根据(11)式计算出大气偏振度  $p$ ,

$$p = \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (19)$$

### 3.2 大气 $A_{\star}$ 的估算

基于两个相似特征场景估算  $A_{\star}$  参数, 在源图像场景中标记两个相似场景的点:  $(x_k, y_k)$ ,  $k = 1, 2$ 。当不存在大气散射时, 这两个场景点应具有相同的辐射强度, 设场景点辐射强度为  $L^{\text{scene}}$ , 根据大气散射物理模型

可得到:

$$I^{\text{total}}(x_k, y_k) = L^{\text{scene}} + S^{\text{scene}} A(x_k, y_k), \quad (20)$$

式中

$$S^{\text{scene}} \equiv (1 - L^{\text{scene}}/A_{\infty}). \quad (21)$$

由于大气散射的影响,相似的景物在不同的距离有不同的  $I^{\text{total}}$ 、 $A$ 。根据(20)式,  $I^{\text{total}}$  是关于  $A$  的直线方程,直线的斜率为  $S^{\text{scene}}$ ,截距为  $L^{\text{scene}}$ 。 $A_{\infty}$  可估算为

$$A_{\infty} = L^{\text{scene}} / (1 - S^{\text{scene}}). \quad (22)$$

为较准确估算  $A_{\infty}$ ,首先在场景中选择具有深度变化区域的相似特征场景,然后可以得到关于  $A$ 、 $I^{\text{total}}$  的散点图,通过对散点图直线拟合,得到  $S^{\text{scene}}$ 、 $L^{\text{scene}}$ ,由(22)式计算  $A_{\infty}$ 。

### 3.3 大气光信息 $A$ 的校正

由(3)式可知,大气信息  $A$  与线偏振度  $P_s$  有关,根据地物与大气散射的偏振特性的差异提出基于模糊函数修正  $P_s$ ,校正大气光信息  $A$ ,基于模糊函数校正线偏振度依据下列规则表达:

- 1) 像元线偏振度值为低,则使它更低;
- 2) 像元线偏振度值为中,则使它仍然为中;
- 3) 像元线偏振度值为高,则使它更高。

如果认为偏振度值的低、中和高是模糊的,根据自然条件下地物偏振度的特征,构造如图2(a)所示的输入隶属度曲线;对输出而言,构造如图2(b)所示的输出隶属度曲线。

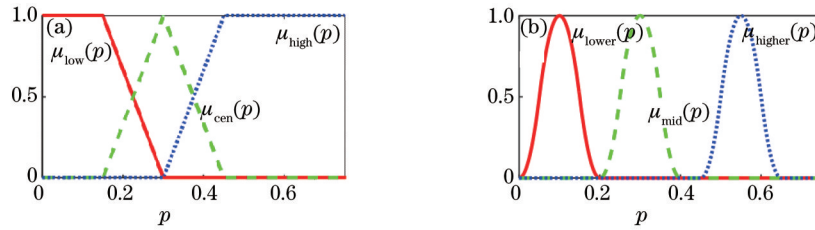


图2 基于模糊规则的校正线偏振度。(a)输入隶属度曲线;(b)输出隶属度曲线

Fig.2 Correction polarization based on fuzzy rule. (a) Input membership curve; (b) output membership curve

依据图2(a)构造输入隶属度函数,

$$\begin{cases} \mu_{\text{low}}(p) = \begin{cases} 1 & , p < 0.15 \\ 1 - (p - 0.15)/0.15, & 0.15 \leq p < 0.35 \\ 0 & , 0.35 \leq p \end{cases} \\ \mu_{\text{cen}}(p) = \begin{cases} 1 & , p < 0.15 \\ 1 - (p - 0.15)/0.15, & 0.15 \leq p < 0.35 \\ 0 & , 0.35 \leq p \end{cases} \\ \mu_{\text{high}}(p) = \begin{cases} 0 & , p < 0.3 \\ (p - 0.3)/0.15, & 0.3 \leq p < 0.45 \\ 1 & , 0.45 \leq p \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

为构造输出隶属度函数,首先构造  $S$  形隶属度函数表达式:

$$S(p, a, b) = \begin{cases} 0 & , p < a \\ 2[(p - a)/b - a]^2 & , a \leq p < c \\ 1 - 2[(p - a)/b - a]^2 & , c \leq p < b \\ 1 & , b \leq p \end{cases}, \quad (24)$$

式中  $c = (a + b)/2$ 。依据图2(b)输出隶属度函数:

$$\begin{cases} \mu_{\text{lower}}(p) = \begin{cases} S(p, 0, 0.1) & , p < 0.1 \\ S(0.2 - p, 0, 0.1), 0.1 \leq p \end{cases} \\ \mu_{\text{mid}}(p) = \begin{cases} S(p, 0.25, 0.35) & , p < 0.35 \\ S(0.7 - p, 0.25, 0.35), 0.35 \leq p \end{cases} \\ \mu_{\text{higher}}(p) = \begin{cases} S(p, 0.45, 0.55) & , p < 0.55 \\ S(1.1 - p, 0.45, 0.55), 0.55 \leq p \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

依据输入输出隶属度函数,构造模糊响应函数  $F$  修正  $P_s$ , 由(3)式得到校正后的  $A'$ 。

### 3.4 算法流程描述

综上所述,基于独立成分分析的偏振图像校正算法描述如下:

1) 计算 Stokes 参量  $I^{\text{total}}$ 、 $Q$  和  $U$ , 由(5)式计算场景线偏振度  $P_s$ ,

$$\begin{cases} I^{\text{total}} = \frac{2}{3}[I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3}[2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}[I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (26)$$

2) 求解  $I^\perp$  和  $I^\parallel$ , 利用3.1节算法估算大气偏振度  $p$ , 并由(3)式计算  $A(x, y)$ ,

$$\begin{cases} I^\parallel(x, y) = 0.5(I^{\text{total}} + Q) \\ I^\perp(x, y) = 0.5(I^{\text{total}} - Q) \end{cases} \quad (27)$$

3) 在场景中寻找两个不同景深的相似目标区域,拟合  $A(x, y)$ 、 $I^{\text{total}}(x, y)$  曲线,估算  $A_\infty$ 。

4) 根据3.3节修正线偏振度  $P_s$ ,校正大气光信息  $A$ ,由(6)式得场景的辐射强度  $L^{\text{object}}$ 。

## 4 实验与结果分析

为验证本文算法的合理性和可行性,利用由中国科学院安徽光学精密机械研究所研发的地面偏振相机获取的中心波段为 443 nm,偏振器旋转角度(0°、60°、120°)的遥感偏振图像,如图3所示。

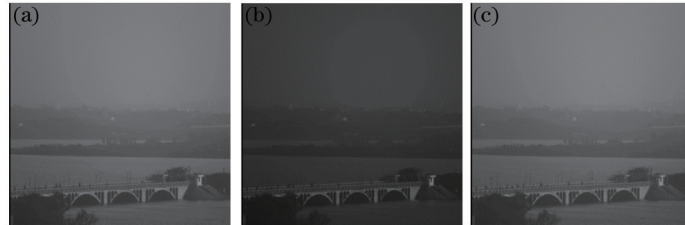


图3 第1组不同偏振方向的图像。(a) 0°; (b) 60°; (c) 120°

Fig.3 Images of the first group with different polarization directions. (a) 0°; (b) 60°; (c) 120°

场景1强度图如图4所示,本文算法得到的大气信息记为  $\hat{\rho}$ 、 $\hat{A}_\infty$ ,图4中选取的场景1和2的  $A$  和  $I^{\text{total}}$  拟合曲线如图5所示,  $L^{\text{scene}} = 161.950$ ,  $S^{\text{scene}} = 0.256$ ,由(22)式计算  $\hat{A}_\infty = 217.675$ ,同理根据场景3和4拟合曲线,得到另一个  $\hat{A}_\infty = 233.396$ 。

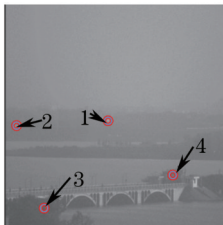


图4 场景1强度图

Fig.4 Intensity image of scene 1

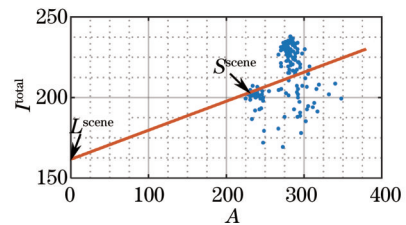


图5 图4中选取的1和2区域  $A$  和  $I^{\text{total}}$  散点图

Fig.5 Scatter diagram of  $A$  and  $I^{\text{total}}$  selected from 1 and 2 area in Fig.4

由天空区域估算的大气信息理论值记为  $p^{\text{sky}}$ 、 $A_{\infty}^{\text{sky}}$ , 结果对比如表 1 所示, 表 1 中  $\hat{A}_{\infty}$  为两组相似场景估算的  $\hat{A}_{\infty}$  平均值, 可以看出, 本文算法估算的大气信息与根据天空区域获取的大气信息理论值相匹配, 验证了本文估算大气信息算法的合理性。

表 1 本文算法估算的  $\hat{p}$ 、 $\hat{A}_{\infty}$  和  $p^{\text{sky}}$ 、 $A_{\infty}^{\text{sky}}$  对比

Table 1 Contrast  $\hat{p}$ 、 $\hat{A}_{\infty}$  with  $p^{\text{sky}}$ 、 $A_{\infty}^{\text{sky}}$  estimated by the proposed algorithm

$p$		$A_{\infty}$	
$\hat{p}$	$p^{\text{sky}}$	$\hat{A}_{\infty}$	$A_{\infty}^{\text{sky}}$
0.217	0.220	225.536	222.677

校正前后的  $A$  对比如图 6 所示。校正后的大气光  $A'$  分布随距离呈递减趋势, 近处景物的大气光强得到了明显抑制。图 7 为校正后结果, 很好地恢复了场景, 图像细节更丰富。

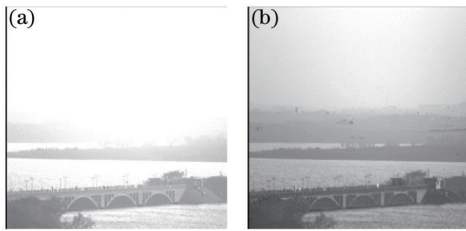


图 6 校正前后大气光信息对比。(a) 校正前; (b) 校正后  
Fig.6 Contrast of airlight information before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

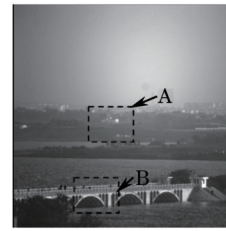


图 7 场景 1 校正后图像  
Fig.7 Images after correction of scene 1

校正前后直方图对比如图 8 所示, 校正后扩展了灰度级范围, 提高了图像对比度。校正前后图像指标对比如表 2 所示, 表 2 数据表明本文算法校正后, 图像质量有较大改善。

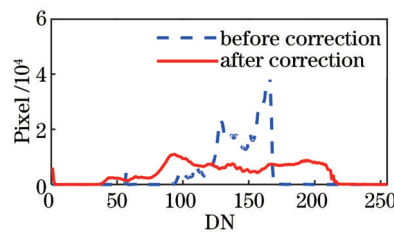


图 8 校正前后直方图比较

Fig.8 Contrast of histograms before and after correction

表 2 第 1 组图像校正前后评价指标

Table 2 Contrast of evaluation index of first group before and after correction

	Smoothness	Average gradient	Entropy
Before correction	0.022	1.849	6.768
After correction	0.047	4.498	7.569

为分析对远处场景和近处场景的复原能力, 选取图 7 中 A、B 场景对比, A 处场景校正前后图像如图 9 所示和质量评价指标对比如表 3 所示。B 处场景校正前后图像如图 10 所示和图像质量评价指标对比如表 4 所示。

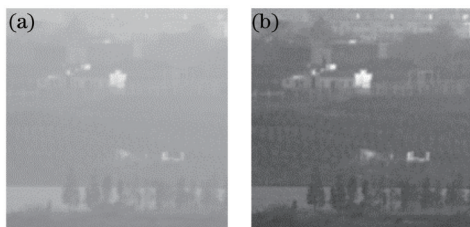


图 9 A 处场景校正前后对比。(a) 校正前图像; (b) 校正后图像

Fig.9 Scene A comparison before and after correction.  
(a) Image before correction; (b) image after correction

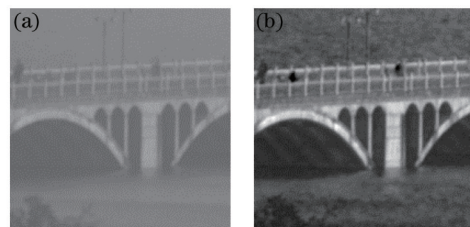


图 10 B 处场景校正前后对比。(a) 校正前图像; (b) 校正后图像

Fig.10 Scene B comparison before and after correction.  
(a) Image before correction; (b) image after correction

表3 A处场景校正前后质量评价指标

Table 3 Quality education index before and after correction of scene A

	Smoothness	Average gradient	Entropy
Before correction	0.003	1.583	5.461
After correction	0.010	3.879	6.497

表4 B处场景校正前后质量评价指标

Table 4 Quality education index before and after correction of scene B

	Smoothness	Average gradient	Entropy
Before correction	0.012	3.684	6.153
After correction	0.019	5.536	6.882

由图9、表3可以看出本文算法在远处场景A有较好的复原能力,复原质量较其强度图有较大提高,场景的对比度及细节均得到了显著增强。图10和表4为近处场景的复原能力对比结果,本文算法复原后的图像边缘等细节信息得到了有效改善,说明了该区域内的细节更加丰富。

为验证对无天空区域场景的复原能力,选择图11中对地遥感偏振图像,由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的机载多波段偏振CCD相机拍摄的中心波段为443 nm,3个偏振方向的遥感偏振图像。

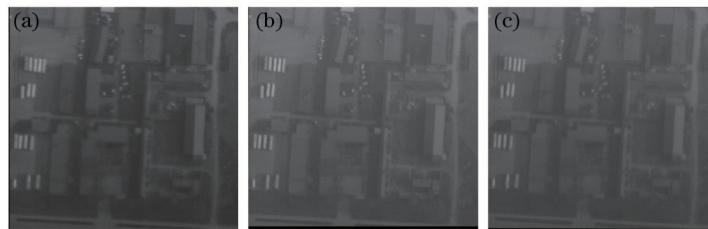


图11 第2组不同偏振方向的图像。(a) 0°; (b) 60°; (c) 120°

Fig.11 Images of the second group with different polarization directions. (a) 0°; (b) 60°; (c) 120°

场景2强度图如图12所示,通过3.1节估算  $p = 0.298$ ,根据图12中选取的相似场景点1、2、A和  $I^{\text{total}}$  拟合曲线如图13所示,  $L^{\text{scene}} = 85.870$ ,  $S^{\text{scene}} = 0.778$ ,由(22)式  $\hat{A}_z = 386.802$ ,根据图12中相似场景点3、4可得  $\hat{A}_z = 397.105$ ,则估算的  $\hat{A}_z = 391.953$ 。

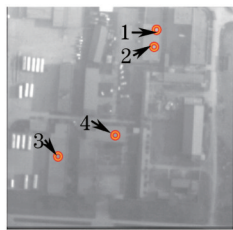
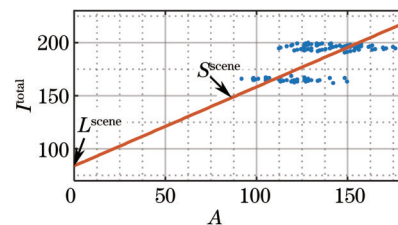


图12 场景2强度图

Fig.12 Intensity image of scene 2

图13 图12中选取的1和2区域A和  $I^{\text{total}}$  散点图Fig.13 Scatter diagram of  $A$  and  $I^{\text{total}}$  selected from 1 and 2 area in Fig.12

校正前后的大气光信息A对比如图14所示,校正后的大气光信息更好地反映了场景的景深变化,校正后的图像如图15所示,校正后图像具有更好的清晰度和更多的细节。

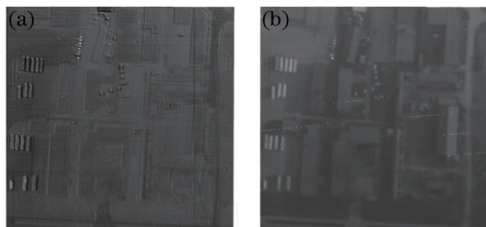


图14 校正前后大气光信息对比。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig.14 Contrast of air light before and after correction.

(a) Before correction; (b) after correction

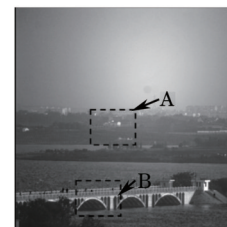


图15 第2组实验校正后的图像

Fig.15 Image after correction of the second scene experiment

校正前后直方图对比如图 16 所示,校正后扩展了图像灰度级范围,提高了图像对比度,校正后图像质量定量评价指标对比如表 5 所示。

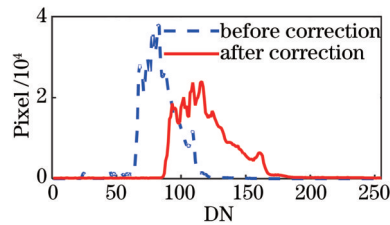


图 16 校正前后直方图比较

Fig.16 Contrast of histograms before and after correction

表 5 第 2 组图像校正后质量评价指标

Table 5 Contrast of evaluation index of the second group before and after correction

	Smoothness	Average gradient	Entropy
Before correction	0.012	1.823	5.723
After correction	0.030	4.439	6.643

表 5 中的 3 个评价指标显示了校正前后图像质量对比,表明本文算法校正后的图像质量得到了显著提高,进一步验证了本文校正算法对偏振遥感图像目标的复原能力。

通过上述实验分析,本文校正算法得到了较好的图像,抑制了大气退化造成的图像质量下降,提高了偏振遥感对目标的识别能力,验证了偏振遥感图像校正算法的可行性和合理性。

## 5 结 论

针对获取的偏振遥感图像中可能不存在天空区域的情况,改进了估算大气偏振度和无穷远处大气光强的估算算法。估算大气偏振度时采用了独立成分分析,通过场景中不同景深的两个相似物体估算无穷远处大气光强,此算法并不要求图像一定要存在天空区域,改进了以往依靠天空区域估算大气信息算法的局限。经过实验分析,本文算法与依据天空区域算法对大气信息的理论值相匹配。同时,为抑制大气环境造成的图像退化影响,提出基于模糊规则的算法修正线偏振度,校正大气光信息。经过实验分析比较,本文算法有效改善了遥感偏振图像的质量,实现了较好的校正效果。校正后更准确的反映了地物目标特征,提高了遥感精度和偏振遥感图像的目标探测能力。

## 参 考 文 献

- 1 Long J, Shi Z, Tang W, *et al.*. Single remote sensing image dephazing[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2014, 11(1): 59-63.
- 2 I Enesi, R Miho. A fast algorithm for contrast restoration of weather degraded images[C]. *Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, IEEE Computer Society*, 2012: 636-641.
- 3 R Kaftory, Y Y Schechner. Variational distance-dependent image restoration[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society*, 2007: 1-8.
- 4 T Treibitz, Y Y Schechner. Recovery limits in point wise degradation[C]. *Computational Photography, IEEE Computer Society*, 2009: 1-8.
- 5 Zhang Su, Fu Qiang, Duan Jin, *et al.*. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211002.  
张 肃, 付 强, 段 锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211002.
- 6 Li Yi, Zhang Yunfeng, Zhang Qiang, *et al.*. Infrared image contrast enhancement based on haze remove method[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0113004.  
李 毅, 张云峰, 张 强, 等. 基于去雾模型的红外图像对比度增强[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113004.
- 7 C Yeh, L Kang, M Lee, *et al.*. Haze effect removal from image via haze density estimation on optical model[J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 27127-27141.
- 8 S Fang, X Xia, X Huo, *et al.*. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight[J]. *Opt Express*, 2014, 22(16):



19523-19537.

- 9 J Liang, L Ren, E Qu, *et al.*. Method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging[J]. *Photonics Research*, 2014, 02(01): 38-44.
- 10 J Liang, L Ren, H Ju. Visibility enhancement of hazy images based on a universal polarimetric imaging method[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(17): 173107.
- 11 T Treibitz, Y Y Schechner. Active polarization descattering[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2009, 31(3): 385-399.
- 12 Y Y Schechner, Y Averbuch. Regularized image recovery in scattering media[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, 29(09): 1655-1660.
- 13 S Shwartz, Y Y Schechner, M Zibulevsky. Blind separation of convolutive image mixtures[J]. *Neurocomputing*, 2008, 71(10): 2164-2179.

栏目编辑: 苏 岑