



顾及空间与光谱差异的单幅遥感影像 自适应云雾去除方法

祁琼¹ 张弛² 袁全³ 李慧芳² 沈焕锋² 程青⁴

1 湖北省国土资源研究院,湖北 武汉,430071

2 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

3 OPPO广东移动通信有限公司,广东 深圳,518000

4 武汉大学城市设计学院,湖北 武汉,430072

摘要:光学遥感影像经常受到云雾的干扰而导致数据质量下降。在暗原色先验理论和云雾影像模型的基础上,提出了一种顾及空间和光谱差异的单幅遥感影像自适应云雾去除方法,较好地解决了传统暗原色先验在高亮地物校正过度和部分波段云雾校正不足的问题,有效地实现了影像云雾去除。首先通过高亮地物的光谱特征构建高亮地物判别指数,辅以密度分割对其进行提取分类,在此基础上引入自适应校正函数对该区域透射率进行修正;其次在对多幅云雾遥感影像实验分析的基础上,提出了符合大气散射机制的波段透射率校正系数,实现了波段间处理强度的自适应调整。实验结果表明,该方法能有效去除不同波段的云雾干扰,并避免高亮地物的过度校正,可取得较好的复原结果。

关键词:遥感影像;暗原色先验;云雾去除;空间自适应;光谱自适应

中图分类号:P237

文献标志码:A

随着航天技术的飞速发展,遥感影像的获取能力不断增强,其在各领域中扮演的角色也愈发重要,从民用领域的资源探测、地质勘查到军用领域的目标识别、情报监测,均有着重要作用^[1]。然而,由于大气等因素的影响和不同程度的云雾干扰,极大地降低了遥感影像数据的准确性和可用性^[2-3],因此,有效地对云雾进行校正不仅是遥感影像准确解译的基础,同时也是提升遥感影像利用率的重要途径,具有十分重要的现实意义。

一般来说,根据校正过程中是否需要辅助信息可将现有方法分为基于多幅影像和单幅影像的去雾方法。基于多幅影像的云雾校正方法主要是利用多源或多时相间的互补与相关关系对云雾区进行校正^[4]。如利用云雾影像与辅助影像在云雾区的互补性,通过小波变换分别提取目标与辅助影像中的低频信息并置换,从而在去雾的同时保留非云雾成分的低频信息(如大面积裸土等)^[5];又如,利用同一场景下不同极化角度影像

间的相关性,耦合成像模型对关键性参数进行估算,从而完成影像复原^[6]。和基于多幅影像的云雾去除方法不同,基于单幅影像的方法不需要提供辅助信息,仅利用影像自身的空间或波段统计特性便可对影像进行校正,因此受到了更多学者的关注。文献[7]利用云雾的空间平滑性,发展了一种基于同态滤波的高保真云雾去除方法,有效提高了复原结果的光谱保真度;文献[8-9]发现Landsat TM影像中红、蓝波段存在强相关性,基于此提出了云雾最优变换法(haze optimized transformation, HOT),并将其用于云雾的检测与去除;文献[10]利用短波红外波段的高透过性和其与可见光波段的相关性,通过变分融合框架将两者进行梯度融合,在校正的同时保持复原影像中的细节信息和光谱信息。

除此之外,自然影像去雾研究中也涌现出许多行之有效的方法,其中暗原色先验是较为具有代表性的方法之一^[11-14]。暗原色先验是基于对大

收稿日期:2018-08-22

项目资助:国家自然科学基金(41631180,41601357);湖北省土地调查及遥感监测类业务技术服务项目(HBT-17170111-170928);湖北省自然科学基金(2016CFB333)。

第一作者:祁琼,硕士,工程师,主要从事土地调查、地理信息系统及遥感应用研究。qiqiong815@163.com

通讯作者:程青,博士,讲师。qingcheng@whu.edu.cn

量户外无雾影像得出的数学统计规律,该理论最大的突破在于发现了无雾影像的全新本质特性^[15]。自文献[15]将暗原色先验用于自然影像处理后,部分学者对其进行改进和优化将其应用于遥感影像处理。文献[16]通过直接求取各像元的最小值来估算影像的暗原色分布,有效提高了影像的处理效率。但该方法未考虑暗原色先验在高亮区域校正过度的不足,导致复原影像中的高亮地物校正过度。此外,文献[17]利用大尺度高斯滤波器修正大气成分值,并以 Google Earth 影像为处理对象,也取得了较为理想的结果。然而,该方法在处理过程中没有考虑云雾对不同波段影响的差异性,而对所有波段均予以相同程度的处理,使得部分波段仍有云雾残留,极易造成光谱畸变。

综上所述,利用暗原色先验对遥感影像进行处理时,如何避免高亮地物校正过度并对各波段予以合理的差异化处理是亟待解决的问题。基于此,本文在暗原色先验的基础上发展了一种顾及空间和光谱差异的遥感影像自适应云雾去除方法,该方法主要包含以下两个改进策略:①对高亮地物光谱特征进行分析,构建判别条件对其进行提取分类,并引入校正函数自适应地校正高亮地物透射率;②提出符合大气散射规律的经验性调节系数,实现对各波段透射率的自适应校正。

1 暗原色先验去雾算法

1.1 云雾影像模型

根据辐射传输过程,云雾影像模型可表示为^[18]:

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

式中, x 表示像元位置; $I(x)$ 为云雾影像,即传感器在云雾条件下所接收的辐射; $J(x)$ 表示无云影像,即地表直接反射辐射; $t(x)$ 为透射率,是云雾对地表反射辐射的透过函数; A 是影像的大气光分布。

1.2 暗原色先验理论

暗原色先验是基于对大量户外无雾影像进行数学统计得到的经验性规律^[15]。统计结果表明,对于大部分户外无雾可见光影像的非天空区域,部分像元在某一个或几个通道上的像元值非常低,且趋近于0。对于任意一幅影像 J ,其暗原色值可通过下式进行计算:

$$J^{\text{dark}} = \min_{x \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x) \right] \quad (2)$$

式中, x 表示像元坐标; c 表示可见光波段集合; $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部窗口; J^{dark} 则表示影像 J 的暗原色值。

结合云雾影像模型与暗原色先验可知,若已知 A 和 t ,便可从 I 中还原出无云影像 J 。

2 顾及空间和光谱差异的自适应去雾方法

为避免暗原色先验处理遥感影像时在高亮地表校正过度以及部分波段校正不足的问题,本文在充分顾及空间和光谱差异的基础上提出了一种自适应的单幅遥感影像云雾去除方法。首先,根据高亮地物与非高亮地物在光谱特征上的差异,构建高亮地物判别指数,对影像进行密度分割,并引入透射率自适应校正函数,对高亮地物透射率进行修正,避免校正过度的现象,提升影像复原质量;其次,注意到云雾的影响程度在不同波段间的差异性,提出符合大气散射规律的波段自适应策略,针对性地去除不同波段间的云雾影响,避免影像整体的光谱畸变。

2.1 空间自适应策略

2.1.1 高亮地物提取

高亮地表在可见光通道内往往具有以下特征:①各通道均具有较高的像元值;②通道间的值趋于相同(如白色地物等);③由于波段所携带的能量与其波长成反比,因此通常红波段相较于其余波段具有较低的像元值^[9]。根据上述特征,构建如下高亮地物判别指数(bright object index, BOI):

$$\text{BOI}(x) = \frac{I_g(x) + I_b(x) - 2I_r(x)}{I_r(x) - 0.5I_b(x)} \quad (3)$$

式中, x 为影像中的像元位置; I_r 、 I_g 和 I_b 分别表示对应像元在可见光波段上的像元值;BOI即为对应像元的判别值。

对式(3)进行分析,由于非高亮地表往往呈现出鲜艳的色彩(如绿色的植被等),此时各通道内的像元值存在较大差异,因此,红波段与蓝、绿波段间的像元差值较大,即分子较大,分母较小,此时对应的BOI值较大;与之相反,对于高亮地表而言,红波段与蓝、绿波段的像元差值较小,即分子较小,加之由于红波段像元值亦较大,可知分母也相对较大,此时计算出的BOI值较小。为进一步验证分析的准确性,以图1(a)所示的影像

为例,对各项进行计算,结果如图 1(b)和图 1(c) 所示。

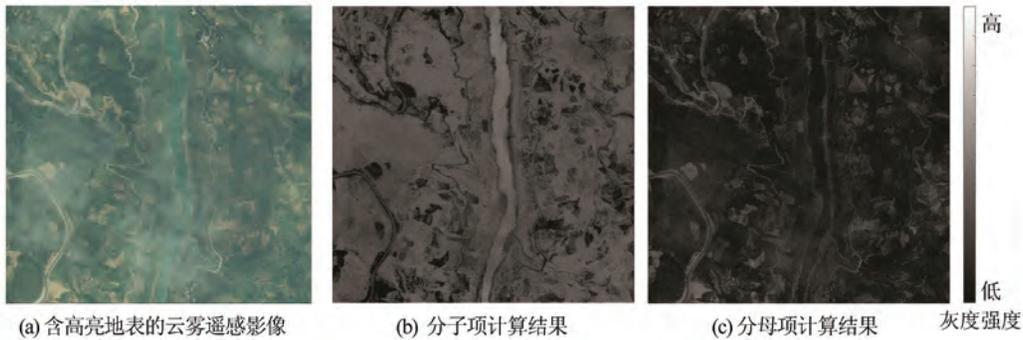


图 1 BOI各项分布示意图

Fig.1 Distribution of Numerator and Denominator of BOI

本文在对多幅影像进行实验的基础上,对阈值的确定方法进行了分析,得到如下阈值划分方法:若像元对应的BOI值小于1,则为高亮地物;若BOI值大于1.5,则为非高亮地物;若BOI值介于1~1.5之间,则为高亮地物到非高亮地物之间的过渡区域。如图2所示为利用该判别条件对图1(a)影像中高亮地物进行判别提取的结果,其中黑色区域为非高亮地物,白色区域为高亮地物,介于两者间的为过渡区域。从提取结果可以看出,影像中的高亮地物均能较为准确地提取出来。

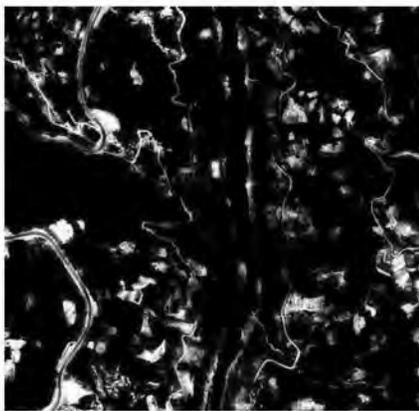


图 2 遥感影像中高亮地物提取结果

Fig.2 Extracting Result of Bright Objects in Remote Sensing Image

2.1.2 透射率自适应校正

为避免高亮地物校正过度的问题,在对高亮地物进行提取的基础上对透射率进行校正。具体地说,透射率的校正应满足以下条件:①在高亮地物处应适当减小其处理强度,即增大透射率值;②对于非高亮地物而言,应保持原有处理强度,即透射率值不变;③对于过渡区域,应满足透射率从高亮至非高亮区域的连续性。基于以上

分析,引入连续的透射率校正函数 ω 以自适应地调整高亮地物的透射率值。 ω 表示为:

$$\omega = \begin{cases} 0.5, & \text{BOI} \leq 1 \\ \text{BOI} - 0.5, & 1 < \text{BOI} \leq 1.5 \\ 1.0, & \text{BOI} > 1.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中,BOI为各像元的判别值; ω 为对应的校正参数。

通过引入校正函数 ω 后,透射率的分布为:

$$t'(x) = 1 - \omega \cdot \min_{x \in \Omega(x)} \left[\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(x)}{A} \right] \quad (5)$$

联合式(4)、式(5)进行分析可知,当 $\text{BOI} \leq 1$ (即为高亮地物)时,校正函数 $\omega = 0.5$,经过校正后,透射率值有所增大,也就是处理强度变小;当 $1 < \text{BOI} \leq 1.5$ (即为高亮地物与非高亮地物过渡区域)时,校正函数随着BOI值自适应的改变,以不同程度地减小处理强度,且可保持透射率空间分布的连续性;当 $\text{BOI} > 1.5$ (即为非高亮地物)时,校正函数 $\omega = 1.0$,保持了原始透射率值。因此,引入校正函数 ω 对高亮地物透射率进行修正,可自适应地调节影像中高亮地物的处理强度。

2.2 光谱自适应策略

不同波段在传输过程中的大气散射强度与其波长密切相关。一般来说,波长越长,散射强度越弱,反之则越强^[19]。因此,云雾干扰在可见光波段间存在不可忽视的差异。然而,现有大部分方法对遥感影像进行云雾校正时,通常进行无差异处理,使得部分波段上的云雾无法完全去除。基于此,本文在充分考虑波段间大气散射差异的基础上提出波段调节系数,以获取符合大气散射规律的透射率分布。具体地,透射率可定量表示为^[5]:

$$t = e^{-\frac{1}{\lambda^d}} \propto \lambda^\gamma \quad (6)$$

式中, λ 表示波段的中心波长; γ 为散射系数,表征

大气散射强度,其变化范围为[0, 4]; d 为景深,对于成像平台较高的遥感影像而言,可视为常数。因此,各波段的透射率应正比于 λ^γ 。可见光中各波段间透射率的相对关系如图3所示,即红波段透射率最大,绿波段次之,蓝波段最小。此外,随着散射强度 γ 值的变化,各波段间透射率的相对关系也相应改变。

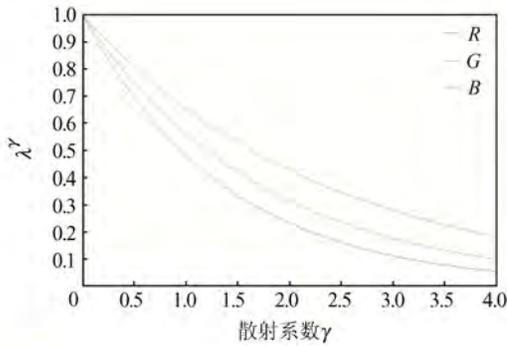


图3 γ 与各波段透射率关系示意图

Fig.3 Relationship Between γ and the Transmission of Each Band

在研究过程中发现,经过空间自适应校正后的透射率可较好地去除红波段的云雾干扰,而在绿、蓝波段则存在不同程度的云雾残留。鉴于此,本文以 t' 作为红波段的最优透射率,并引入调节系数,适当地对其余可见光波段进行调整。

理论上来说,波段调节系数应是和散射系数 γ 相关的函数。然而, γ 的值通常难以获取^[10],因此直接推导两者间的关系较为困难。由式(6)可知, t' 一定程度地反映了 γ 的变化情况,为此,本文以 t' 为基础,推导出调节系数的分布。为使得调整后可见光波段透射率满足上述分析的结果,通过大量实验与修正提出了如下的调节系数:

$$W_g=(0.9+0.1t')^2, W_b=(0.7+0.3t')^2 \quad (7)$$

式中, t' 为经过空间自适应策略校正后的透射率分布; W_g 、 W_b 分别为绿波段和蓝波段的透射率调节系数。由式(7)可得调节系数 W_g 、 W_b 与 t' 的变化关系(见图4)。由图4可知,本文提出的调节系数可较好地满足透射率在各波段间的关系,且随着散射强度的改变(即 t' 的变化),各波段间透射率的相对关系也随之改变。

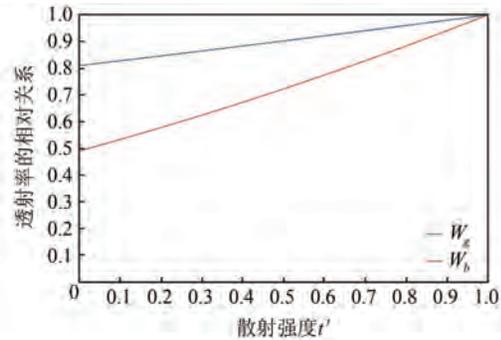


图4 t' 与 W_g 、 W_b 关系示意图

Fig.4 Relationship Between t' and W_g , W_b

由此,各波段的透射率分布可表示为:

$$t_r=t', t_g=W_g \cdot t', t_b=W_b \cdot t' \quad (8)$$

式中, t_r 、 t_g 、 t_b 即为各波段上符合大气散射规律的透射率分布。

图5为校正前后各波段透射率的对比结果,其中图5(a)为原始透射率,图5(b)至5(d)分别为校正后各可见光波段(红、绿、蓝)的透射率分布。对比可知,校正前各波段均予以相同程度的处理,且在高亮区域可以明显发现透射率的低估;经过空间和波段自适应校正后,高亮地物的透射率得到了较好的修正,各波段也得到了不同强度的处理。

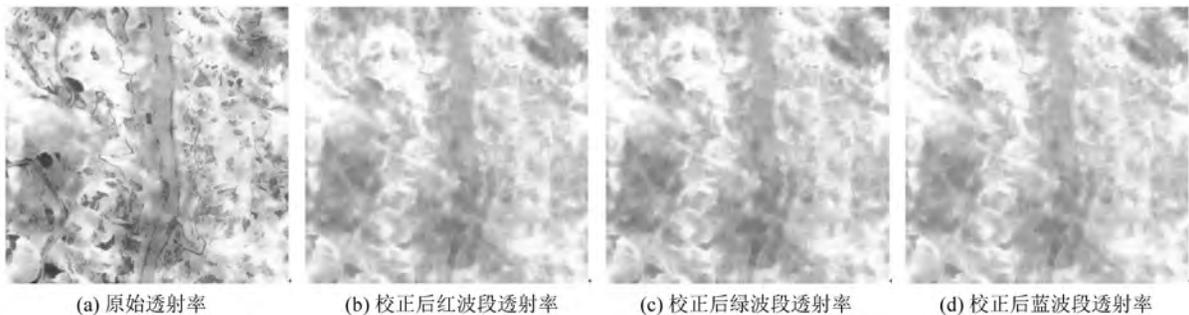


图5 校正前后各波段透射率对比

Fig.5 Comparison of the Transmission of Each Band Before and After Correction

3 实验结果分析

为验证本文提出方法的有效性和普适性,从

多种传感器选取实验影像,并以较为经典的HOT法、FVR (fast visibility restoration)法和原始暗原色先验法(traditional dark channel prior,

TDCP) 的处理结果进行目视分析和定量评价^[2,9,15]。

3.1 目视对比分析

图 6 为航空遥感影像校正结果对比图,其中,图 6(a)为一景航空遥感影像,包含裸土等高亮地物,且云雾整体呈非匀质分布,图 6(b)至 6(e)分别为 HOT 法、FVR 法、TDCP 法和本文方法的处理结果。从目视效果比较这 4 种方法对该幅影像的处理结果可以看出, HOT 法能在一定程度上去除影像的云雾影响,但在云雾较浓区域仍有一定残留,处理后影像与原始影像差异较大,光谱保真不足; FVR 法能较好地抑制影

像中的云雾污染,可明显提高影像的对比度,然而在高亮区域依然存在较为严重的光谱畸变; TDCP 法能有效地消除影像中的云雾影响,但在云雾浓厚区域依然不能起到较好的校正结果,如图 6(d)复原影像中的高亮地物出现了过度校正的现象;相较于上述方法而言,本文方法引入了针对高亮地物的透射率自适应校正策略和考虑大气散射在波段间存在差异的特点,其处理结果不仅能有效校正不同波段中的云雾,还较好地避免了高亮地物光谱畸变现象,即有效提高了影像的可视性,总体校正结果最好。

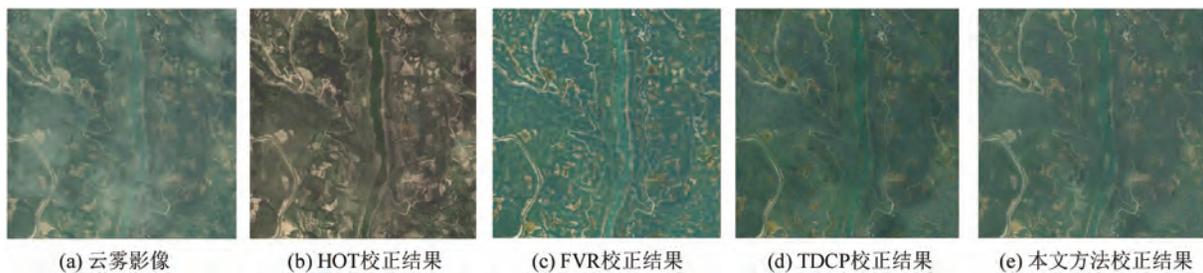


图 6 航空遥感影像校正结果对比

Fig.6 Comparison of Dehazing Results of Aerial Image

图 7 为快鸟卫星影像,涵盖范围为武汉大学信息学部及其周边区域,主要地物类别为城区,图 7(b)至 7(e)分别为不同方法校正结果。从实验结果来看, HOT 法能够在一定程度上抑制云雾影响,但相较于原始影像存在较大的光谱失真,如在图 7(a)中可大致看出操场等区域的色彩信息,但经过 HOT 法校正后,虽然提高了影像的对比度,但这些区域均出现了较为严重的色彩偏差; FVR 法的校正结果较为充分地抑制了匀质雾

霭的影响,然而由于该方法考虑了影像白平衡,导致校正后影像整体偏亮; TDCP 法也可从较大程度上去除雾霭影响,但由于没有考虑云雾影响在波段间的差异性,使得部分短波段云雾去除不彻底,引起校正后的影像整体产生光谱畸变;本文方法考虑了大气散射在波段间的差异性,针对性地对可见光波段进行差异化处理,可较好地去除可见光波段上的云雾影响,避免了 TDCP 法校正后影像偏蓝的问题。



图 7 快鸟卫星影像校正结果对比

Fig.7 Comparison of Dehazing Results of Quickbird Image

3.2 定量对比分析

为定量评价整景影像处理前后质量变化情况,本文引入 Q 指数和信息熵作为参考。为验证算法的光谱保真度,本文以处理前后影像中非云区的光谱剖面进行度量。上述指标中, Q 指数和信息熵越大,说明影像质量越好,而光谱剖面差

异越小,则光谱保真度越高^[20-22]。

分别计算云雾影像与不同方法校正影像的 Q 指数和信息熵。表 1 展示了图 6 与图 7 的定量指标统计结果。通过统计数据可以发现,与原始影像相比,利用不同方法校正后影像的定量指标均有提高。但比较不同方法计算出的 Q

指数和信息熵的数值大小可以发现,就Q指数而言,HOT法提升幅度较小,而FVR法、TDCP法和本文方法提升幅度均较大,这3种方法均有效地增强了影像的清晰程度。此外,由于本文方法能自适应地对不同波段进行校正,所以

Q指数高于TDCP法,即复原出了更清晰的影像;在信息熵的提升程度上,本文方法提升最高,FVR法和TDCP法次之,HOT法提升幅度最小。可见,本文方法对影像质量的改善程度最大。

表1 不同方法定量评价统计结果

Tab.1 Quantitative Assessment of Dehazing Results with Different Methods

项目	指标	云雾影像	HOT法	FVR法	TDCP法	本文方法
图6	Q指数	7.731 7	7.982 6	8.751 4	8.365 9	9.086 5
	信息熵	4.454 5	6.576 6	6.542 6	6.757 1	7.025 6
图7	Q指数	29.164 1	38.910 6	43.171 4	42.484 6	44.489 3
	信息熵	6.783 3	6.899 8	7.518 6	7.464 3	7.668 8

进一步地,为评价本文方法对非云区的光谱保真性,选取的影像非云区中涵盖植被、高亮地表等区域(见图8),对比原始光谱剖面与不同方法校正后的光谱剖面。

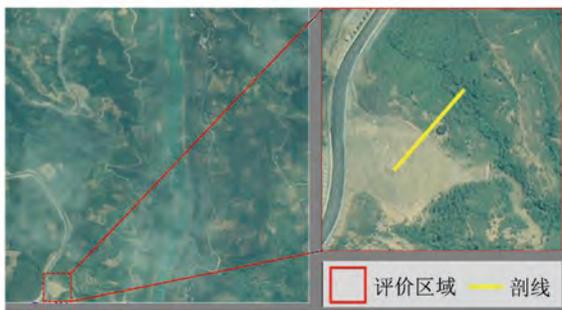


图8 选取影像剖面示意图

Fig.8 Schematic Diagram of the Selected Profile

逐波段地统计原始影像与各方法处理结果在剖线上的光谱分布情况,如图9所示。分析统计结果可知,在高亮地表内(剖面前半段),不同方法处理结果在3个波段上均存在一定程度的偏差,总的来说,HOT和FVR法偏离原始光谱较远,TDCP法次之,本文方法与原始光谱最为接近,且相差均较小。可见,本文引入的空间自适应处理策略在避免高亮地物校正过度的同时,还较好地保持了原有的光谱信息。对比在植被区域的统计结果(剖面后半段),4种方法在该区域与原始光谱的差异均有所减小,但相较于其余方法结果来说,本文方法的结果依然与原始光谱分布较为一致。

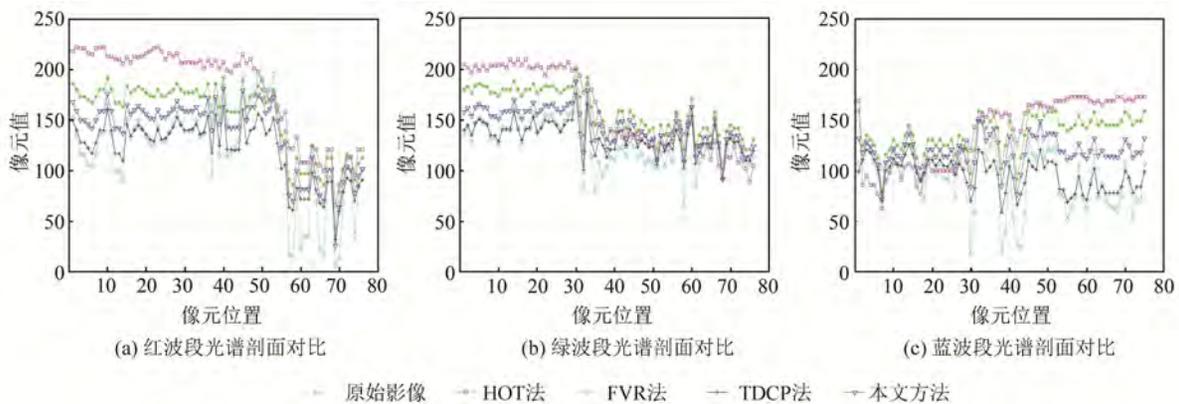


图9 光谱剖面对比

Fig.9 Comparison of Spectral Profiles

综上所述,本文方法能有效地消除影像中不同下垫面存在的云雾影响,可较为彻底地校正不同波段上的云雾,对于影像中存在的高亮地物也能予以合适的处理强度,避免了处理过度的情况。此外,对于地物种类复杂的区域,如城区等能保持良好的细节纹理信息,较大地增强了影像

的实用性,也充分证明了本文方法扩展了暗原色先验的普适性和增强了其有效性。

4 结 语

本文对文献[15]提出的暗原色先验进行了

研究,在结合云雾影像模型的基础上,充分顾及遥感影像成像规律和地物分布特征,提出了一种顾及空间和波段差异的单幅遥感影像云雾去除方法。在理论分析的基础上,提出了高亮地表指数BOI用于提取高亮地物,并构建自适应校正函数,较好地避免了传统暗原色先验对高亮地物透射率估算偏低的现象。基于实验分析与修正,引入波段透射率调节系数,自适应地获取满足大气散射规律的透射率分布,从而对不同波段的云雾进行有效校正。通过与HOT法、FVR法和TD-CP法进行比较,实验结果表明,本文方法较为有效地避免了高亮地物校正过度和部分波段云雾校正不足的现象,能有效提高影像的目视效果,较好地复原影像的光谱和细节信息。

虽然本文方法取得了较好的去雾效果,但也存在一定的不足,主要为波段自适应策略的提出虽然结合了理论分析与大量实验验证,但并不完全基于大气散射机制,而是部分依托于实验进行修正。在今后的研究中,将更加注重物理机制的耦合,以期得到更好的处理结果。

参 考 文 献

- [1] Yang Jingyu, Zhang Yongsheng, Zou Xiaoliang, et al. Using Dark Channel Prior to Quickly Remove Haze from a Single Image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11):1 292-1 295(杨靖宇,张永生,邹晓亮,等.利用暗原色先验知识实现航空影像快速去雾[J].武汉大学学报·信息科学版,2010,35(11):1 292-1 295)
- [2] Tarel J P, Hautiere N. Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image[C]. IEEE Conference on Computer Vision, Tokyo, Japan, 2009
- [3] Wu Wei, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, et al. Classified Linear Regression Based Landsat Image Cloud Removal Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 983-987(吴炜,骆剑承,沈占锋,等.分类线性回归的Landsat影像去云方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2013,38(8): 983-987)
- [4] Cao Shuang. Research on Cloud Removal Method of High Resolution Remote Sensing Images [D]. Nanjing: Hohai University,2006(曹爽.高分辨率遥感影像去云方法研究[D].南京:河海大学,2006)
- [5] Yong D, Guindon B, Cihlar J. Haze Detection and Removal in High Resolution Satellite Image with Wavelet Analysis[J]. *IEEE Transactions on Geo-science & Remote Sensing*, 2002, 40(1):210-217
- [6] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic Framework for Vision in Bad Weather[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, London, UK, 2002
- [7] Shen H, Li H, Qian Y, et al. An Effective Thin Cloud Removal Procedure for Visible Remote Sensing Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 96(11):224-235
- [8] He X, Hu J, Chen W, et al. Haze Removal Based on Advanced Haze-Optimized Transformation (AHOT) for Multispectral Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(20): 5 331-5 348
- [9] Zhang Y, Guindon B, Cihlar J. An Image Transform to Characterize and Compensate for Spatial Variations in Thin Cloud Contamination of Landsat Images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2):173-187
- [10] Li H, Zhang L, Shen H, et al. A Variational Gradient-Based Fusion Method for Visible and SWIR Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 78(9):947-958
- [11] Liang Tianquan, Zhao Qiang, Sun Xiaobin, et al. Research on Image Restoration by Polarized Remote Sensing Through Haze [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 244-247(梁天全,赵强,孙晓兵,等.雾霾天气条件下偏振遥感图像复原研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(2): 244-247)
- [12] Shen Xiaole, Shao Zhenfeng, Yan Beibei. A Novel Dodging Algorithm for Remote Sensing Images Affected by Thin Clouds [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 543-547(沈小乐,邵振峰,闫贝贝.一种薄云影响下的遥感影像匀光算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2013,38(5): 543-547)
- [13] Chen Fen, Yan Dongmei, Zhao Zhongming. Haze Detection and Removal in Remote Sensing Images Based on Undecimated Wavelet Transform [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1):71-74(陈奋,闫冬梅,赵忠明.基于无抽样小波的遥感影像薄云检测与去除[J].武汉大学学报·信息科学版,2007,32(1): 71-74)
- [14] Liu J, Wang X, Chen M, et al. Thin Cloud Removal from Single Satellite Images [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 618-632
- [15] He K, Sun J, Tang X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior[J]. *IEEE Transactions*

- on *Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(12):2 341-2 353
- [16] Dai Shubo, Xu Wei, Pu Yongjie, et al. Remote Sensing Image Defogging Based on Dark Channel Prior [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 341-347(代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 341-347)
- [17] Long J, Shi Z, Tang W, et al. Single Remote Sensing Image Dehazing [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2013, 11(1): 59-63
- [18] Fattal R. Single Image Dehazing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3):1-9
- [19] Makarau A, Richter R, Muller R, et al. Haze Detection and Removal in Remotely Sensed Multispectral Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 52(9):5 895-5 905
- [20] Zhu X, Milanfar P. Automatic Parameter Selection for Denoising Algorithms Using a No-Reference Measure of Image Content [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2010, 19(12): 3 116-3 132
- [21] Liu Peng, Wang Rongbin, Pang Wenting, et al. Comparative of Remote Sensing Image Clarity Evaluation [J]. *Geospatial Information*, 2012, 10(2):44-46(刘鹏, 王荣彬, 庞文婷, 等. 遥感影像清晰度评价方法的比较[J]. *地理空间信息*, 2012, 10(2):44-46)
- [22] Fang S, Rajasekera J, Tsao H. Entropy Optimization and Mathematical Programming [M]. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1997

An Adaptive Haze Removal Method for Single Remotely Sensed Image Considering the Spatial and Spectral Varieties

QI Qiong¹ ZHANG Chi² YUAN Quan³ LI Hui² SHEN Huanfeng² CHENG Qing⁴

¹ Hubei Institute of Land and Resources, Wuhan 430071, China

² School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Guangdong OPPO Mobile Telecommunications Co. Ltd, Shenzhen 518000, China

⁴ School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Remotely sensed images are often degraded due to the haze interference during the imaging process, which greatly reduces their utilization. In order to solve this problem, a spatial-spectral adaptive haze removal method for single remote sensing image is proposed in this paper. Based on the dark prior theory and haze image model, and taking into account the spatial and spectral varieties in the remotely sensed images, our proposed method effectively overcome the difficulties of over-correction on bright terrain and inadequate correction of haze in some wavebands. A bright object index (BOI) is constructed to extract the bright objects with the help of the density segmentation method, and an adaptive correction function is then introduced to refine the misestimated transmittance. Given the influences of atmospheric scattering are wavelength dependent among visible channels, two empirical accommodation coefficients are applied to derive the transmittance of the different channels, achieving the adaptive adjustment of processing intensity in different wavebands. Experimental results show that our proposed method can remove the haze completely and yield visually haze-free images, comparing with the other existing methods.

Key words: remote sensing image; dark channel prior; haze removal; spatial adaptive; spectral adaptive

First author: QI Qiong, master, engineer, specializes in land investigation, GIS and remote sensing applications. E-mail: qiqiong815@163.com

Corresponding author: CHENG Qing, PhD, lecturer. E-mail: qingcheng@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41631180, 41601357; Hubei Provincial Land Resources Research Project, No. HBT-17170111-170928; the Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2016CFB333.