

文章编号: 1007-4619(2006)02-0151-09

遥感影像阴影多波段检测与去除理论模型研究

魏建宏¹, 田庆久¹, 吴昫昭²

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘 要: 阴影是遥感影像的基本特征之一, 它使地物目标反映的信息量有所损失或受到干扰, 而去除阴影一直是遥感影像处理的难题。从研究遥感影像阴影产生机理出发, 提出了一种多波段检测阴影的方法和基于能量信息补偿去除阴影的理论模型。通过 KONOS 影像进行方法与模型验证, 真实再现阴影区地物特征, 增加影像信息量, 提高数据质量。

关键词: 遥感; 阴影检测; 阴影去除; 模型; KONOS

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Study on Multispectral Detecting Shadow Areas and A Theoretical Model of Removing Shadows from Remote Sensing Images

GUO Jian-hong¹, TIAN Qing-jiu¹, WU Yun-zhao²

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China;

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

Abstract Generally there are two contents of detecting shadow areas and eliminating shadows in removing shadows of remote sensing images. In this study, the conclusion was drawn from the forming mechanism of remote sensing images and the reflection spectral characteristic of surface objects, which are the datum of green band having very high correlation with that of blue band, and the shadows of green band being obviously stronger than that of blue band. The reduced (divided) image derived from green band subtracted from (divided by) blue band can be used to detect shadows with threshold value due to the more differences between shadow areas and non-shadow areas in it. This method of detecting shadows is related to variational reflectance of the same object. In addition, the precision of detecting shadows with Histogram threshold value in near-infrared band is higher than the other's. This method of detecting shadows is related to the reflectance of surface objects. Multispectral detecting shadow is the combination of the two methods. Shadow is sheltered by the objects higher than the ground from direct irradiance, the lost information is direct irradiance mainly, which is compensated, then the shadows could be removed. In this paper, a theoretical model which was based on the radiation transfer theory to calculate the proportions of direct irradiance, diffuse irradiance and environment irradiance, was put forward to remove shadows through compensating direct irradiance. Finally, the method and the model were validated using the KONOS images, and the results were turned up triumphs.

Key words remote sensing; shadow detection; shadow removal; model; KONOS

收稿日期: 2004-08-24; 修订日期: 2004-12-29

基金项目: 江苏省高技术研究项目“水稻冠层养分高光谱遥感数字信息采集关键技术研究(BG2004321)”。

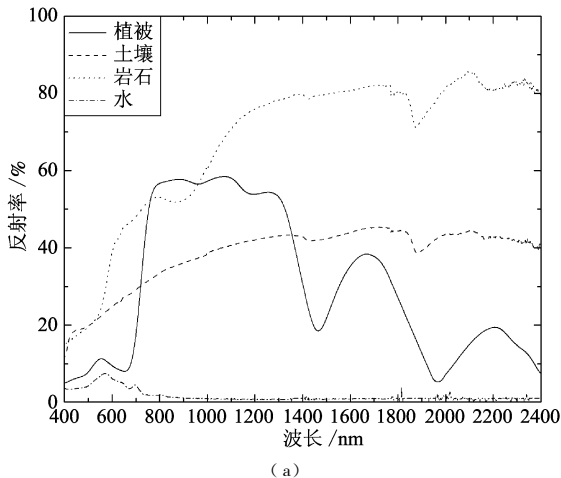
作者简介: 魏建宏(1971—), 男, 南京大学地图学与地理信息系统在读硕士。现从事高空间分辨率遥感与高光谱分辨率遥感研究。

1 引 言

阴影由高出地面的物体遮挡太阳光而形成,在遥感影像数据上表现为 DN 值偏低,信息量相对较少,难以判读,在影像处理和工程应用中,影响操作进程,甚至产生错误结果。去除阴影一般包括两方面的内容:检测阴影区域和消除阴影。现有的检测阴影的算法可以根据是否需要环境条件的先验知识进行分类^[1],一类是根据影像中地物几何形状或 DSM 数据与太阳、遥感器有关参数计算阴影区域^[2-4];另一类是根据影像阴影区域的共性及其与非阴影区域的差别提取阴影区域^[5-9]。多波段检测阴影属于第二类,它是基于遥感影像阴影成像机理和地物反射波谱特征检测阴影,分别用到蓝光波段、绿光波段和近红外波段。消除阴影一般采用图像处理或补偿阴影区域信息的方法。图像处理的方法,如比值法、直方图变换^[10]、同态系统滤波^[11]等,在消除阴影的同时也改变了非阴影区域的信息。而补偿阴影区域信息^[12-15],可以只对阴影区域进行处理,有利于保持和提高影像整体质量,但是由于遥感影像阴影的复杂性,其影响因素数不胜数,从理论上讲,完全去除阴影几乎是不可能的。本文按照补偿阴影区域信息的基本思想,根据辐射传输理论,提出一种去除阴影的理论模型,并利用 KONOS 影像进行了方法与模型验证,取得了较好的效果。

2 多波段阴影检测

根据影像阴影区域的共性及其与非阴影区域的



差别提取阴影区域,难点在于区分阴影区域的亮目标和非阴影区域的暗目标。而影响遥感影像中亮目标或暗目标形成的因素主要有两种:一是辐射到目标上太阳光的多少;二是目标反射率的高低。在这两种因素的综合作用下,导致不同目标向遥感器辐射的能量不同。

首先,遥感影像阴影由较高物体遮挡太阳直射光而形成。在直射光被完全遮挡的情况下,阴影区域目标物只有天空散射光和环境反射光照射,而非阴影区域不仅有天空散射光和环境反射光,还有直射光照射。遥感影像阴影主要集中于可见光至近红外波段。在此波段范围内,环境反射光所占比例很小,区分阴影与非阴影主要由直射光、散射光能量比所决定;在可见光至近红外波段,不考虑云雾等影响时,瑞利散射和米氏散射远远大于无选择性散射,瑞利散射强度与波长的四次方成反比,米氏散射强度与波长的二次方成反比^[16],散射光强度随波长增大急剧减小。因此,照射到遥感影像阴影区域的太阳光随波长增加急剧减小。

其次,在可见光至近红外光谱范围内,地物波谱反射率是有规律可循的。图 1 为使用 ASD 地物光谱仪在室内测得的水(纯净水)、植被(针叶树)、土壤(黏土)和岩石(粉砂岩)的光谱反射率曲线。从图 1(a)可知,水、植被、土壤、岩石等四种典型地物反射率随波长而变化,反射率最高约为 90%,最低接近“0”,反射峰、吸收峰也分布在不同谱段。四种典型地物反射率变化有一个共同的特征(图 1(b)):从蓝光波段到绿光波段(430—560nm),它们的反射率都逐渐增大。即 4 种典型地物在蓝光波段的反射率略低于绿光波段的反射率,遥感影像的蓝

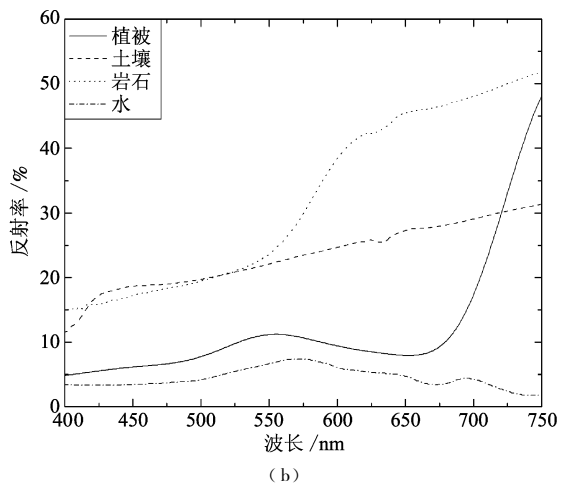


图 1 4 种典型地物反射率变化特征

Fig 1 The reflectivity varieties of four representative objects

光波段与绿光波段数据具有很高的相关性。

由以上分析可知:散射光强度随波长增大急剧减小,对影像阴影区域影响的结果是绿光波段相对于蓝光波段急剧减小。另外,地物反射率在蓝光波段与绿光波段有很高的相关性。两种因素作用的结果是:在非阴影区域,蓝光波段和绿光波段有很高的相关性;在阴影区域,绿光波段相对于蓝光波段急剧减小。将绿光波段影像减去(或除以)蓝光波段影像,对所得影像进行基于直方图阈值法提取阴影。这种方法提取阴影主要与地物光谱反射变化特性有关,不受地物反射率大小决定。在实际遥感影像中,地物类型千差万别,虽然四种典型地物光谱反射特性能代表大多数地物,但是也有地物在蓝光波段有反射峰,或者在绿光波段有吸收峰,因此也有可能蓝光波段至绿光波段反射率随波长增大而明显减小,这样将造成检测阴影的误差。

此外,遥感影像阴影的一个根本特征就是信息弱,表现在影像数据上为 DN 值低。近红外波段在产生阴影的波段范围内波长最长,散射光最小,阴影区域与非阴影区域目标辐射能量差值最大,因此用近红外波段进行基于直方图阈值法提取阴影,比利用其他单波段的精度都高^[1]。这种方法提取阴影主要与地物反射率大小有关,不受地物光谱反射变化特性决定。

多波段检测阴影就是利用遥感影像多波段的特点,将绿光波段与蓝光波段差(比)值法提取阴影和近红外波段基于直方图阈值法提取阴影相结合,其技术流程如图 2。

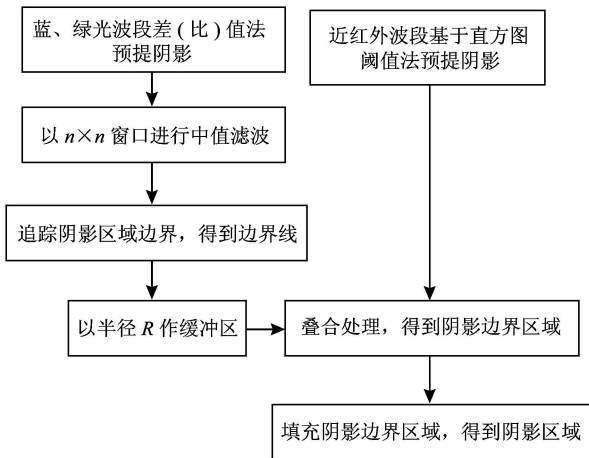


图 2 多波段检测与提取阴影

(n 为奇数,且 n ≥ 3; R > n × k k 为像元宽度)

Fig 2 The system architecture for multispectral detecting shadow

(n is odd and n ≥ 3; R > n × k k is pixel width)

3 阴影去除理论模型

3.1 基本原理

一幅纯净的遥感影像 $F(x, y)$, 由于通过大气及地面系统 $S(x, y)$, 并加入了外来噪声 $V(x, y)$, 而变成影像 $G(x, y)$ (图 3)。假设阴影对遥感影像的影响为外来噪声 $V(x, y)$ 。

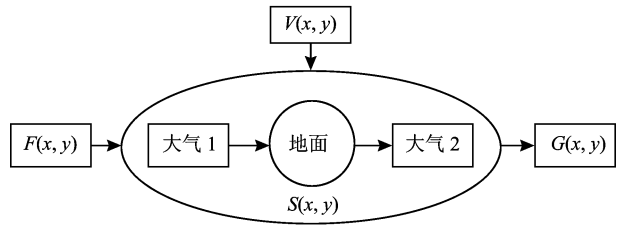


图 3 遥感影像数据误差影响分析

Fig 3 The analysis for errors of remote sensing datum

将上述过程用公式表示:

$$G(x, y) = F(x, y) \times S(x, y) \times V(x, y) \quad (1)$$

设 $T(x, y) = F(x, y) \times S(x, y)$, 则:

$$T(x, y) = G(x, y) \times V^{-1}(x, y) \quad (2)$$

要得到无阴影影响的遥感影像数据 $T(x, y)$, 就是要求解 $V^{-1}(x, y)$ 和确定卷积形式。

3.2 阴影去除模型

遥感影像数据信息是遥感器从空中获取的地物反射、辐射能量信息的转化。除了一部分太阳光能量由大气空间反射、散射(程辐射)直接进入遥感器外,地物对遥感器信息的总贡献为以下几部分^[17]:

(1) 光线直接入射到地面并经地面直接反射到传感器的部分:

$$e^{-\tau/\mu_s} \rho_s e^{-\tau/\mu_s} \quad (3)$$

(2) 光线经大气散射到达地面并经地面直接反射到传感器的部分:

$$t_h(\mu_s) \rho_s e^{-\tau/\mu_s} \quad (4)$$

(3) 光线直接入射到达地面并经地面反射和大气散射到传感器的部分:

$$e^{-\tau/\mu_s} \rho_s' t_h(\mu_s) \quad (5)$$

(4) 光线经大气散射到地面, 并经地面反射和大气散射到传感器的部分以及地面与大气多次相互散射到达传感器的部分:

$$t_h(\mu_s) \rho_s t_h(\mu_s) + (e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s)) S(\rho) \quad (6)$$

式中, ρ_s 为地面反射率; S 为大气层向下的半球反射率; μ_s 为太阳天顶角的余弦值; μ_v 为传感器天顶角的余弦值; $e^{-\tau/\mu_s}$ 和 $t_h(\mu_s)$ 分别为到达地面的太阳直射光和经大气散射光到达地面的大气透过率; $e^{-\tau/\mu_v}$ 和 $t_h(\mu_v)$ 分别为观测方向地面反射直达传感器和经大气散射光到达传感器的大气透过率; τ 为大气衰减系数; $\rho, \rho', \bar{\rho}$ 分别为大气散射到地面的半球反射率、经地面散射到大气的地面半球反射率和经大气与地面两次散射后的地面半球反射率。

遥感影像上的阴影区域是较高物体遮挡太阳直射光而形成, 在阴影区域目标上无太阳直射光照射,

$$|V^{-1}(x, y)| = \frac{e^{-\tau/\mu_v} \rho_s e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s) \rho e^{-\tau/\mu_v} + e^{-\tau/\mu_s} \rho' t_h(\mu_v) + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v) \bar{\rho} + \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S(\bar{\rho})^2}{1-S\bar{\rho}}}{t_h(\mu_s) \rho e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v) \bar{\rho} + \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S(\bar{\rho})^2}{1-S\bar{\rho}}} \quad (7)$$

(7) 式中涉及地面参数, 还有大气上行、下行辐射等参数, 因此, 不能直接得到 (7) 式的计算结果, 必须简化 (7) 式。在可见光至近红外波段, 地面与大气多次相互散射的光能远小于太阳直射光和天空散射

$$|V^{-1}(x, y)| \approx \frac{e^{-\tau/\mu_v} \rho_s e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s) \rho e^{-\tau/\mu_v} + e^{-\tau/\mu_s} \rho' t_h(\mu_v) + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v) \bar{\rho}}{t_h(\mu_s) \rho e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v) \bar{\rho}} \quad (8)$$

假设地面为均一朗伯体时, $\rho_s = \rho = \rho' = \bar{\rho}$,

$$|V^{-1}(x, y)| = \frac{e^{-\tau/\mu_v} e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s) e^{-\tau/\mu_v} + e^{-\tau/\mu_s} t_h(\mu_v) + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v) - t_h(\mu_s) + e^{-\tau/\mu_s}}{t_h(\mu_s) e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_s) t_h(\mu_v)} = \frac{t_h(\mu_s) + e^{-\tau/\mu_s}}{t_h(\mu_s)} \quad (9)$$

为减少省略

$$\frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S(\bar{\rho})^2}{1-S\bar{\rho}}$$

所产生的误差, 对 $|V^{-1}(x, y)|$ 进行处理:

$$|V^{-1}(x, y)| \approx \frac{t_h(\mu_s) + e^{-\tau/\mu_s} + \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S\bar{\rho}}{1-S\bar{\rho}}}{t_h(\mu_s) + \frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S\bar{\rho}}{1-S\bar{\rho}}} \quad (10)$$

(10) 式结果比较理想, 直射光、散射光的大气透过率以及地面与大气多次相互散射部分, 能通过“6S”、“MODTRAN”等大气辐射传输模型求得, 也就是说 $|V^{-1}(x, y)|$ 可通过计算求得。

$|V^{-1}(x, y)|$ 反映的是“量的比例”关系, 故可将

(2) 式卷积运算理想化为乘法运算。

对于非阴影区域:

$$T(x, y) = G(x, y) \quad (11)$$

在数据信息特征上表现为: (3) 式和 (5) 式为零, (4) 式和 (6) 式不变; 程辐射信息量不变。

由周围物体遮蔽而影响天空散射光, 以及地面与大气多次相互散射能量的变化, 不是区分阴影与非阴影的特征, 相反能够反映地物立体感。在去除阴影时不考虑因遮蔽而引起的天空散射和地面与大气多次相互散射能量的变化, 可认为散射光、地面与大气多次相互散射能量不因较高物体遮蔽而改变。

$|V^{-1}(x, y)|$ 反映“量”的关系, 可表示为 (7) 式, 分子为目标无阴影影响时受辐射的能量, 分母为有阴影影响时受辐射的能量。

光, 因此可将

$$\frac{(e^{-\tau/\mu_s} + t_h(\mu_s))(e^{-\tau/\mu_v} + t_h(\mu_v))S(\bar{\rho})^2}{1-S\bar{\rho}}$$

省略, 得:

省略, 得:

$$T(x, y) = [G(x, y) - C(x, y)] \times V^{-1}(x, y) + C(x, y) \quad (12)$$

对于阴影区域:

式中, $C(x, y)$ 为程辐射值。将 (11)、(12) 式合并:

$$T(x, y) = [V^{-1}(x, y) - 1] \times W(x, y) \times [G(x, y) - C(x, y)] + G(x, y) \quad (13)$$

式中, $W(x, y)$ 为阴影区域二值图, 阴影为“1”, 非阴影为“0”。

上式中 $T(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 为能量值, 设其影像数据的 DN 值分别为 $T_{DN}(x, y)$ 、 $G_{DN}(x, y)$ 、 $C_{DN}(x, y)$, a 、 b 为增益量 (Gain) 和漂移量 (Offset), 则有:

$$a \times T_{DN}(x, y) - b = [V^{-1}(x, y) - 1] \times W(x, y) \times [a \times G_{DN}(x, y) - b - (a \times C_{DN}(x, y) - b)] + [a \times G_{DN}(x, y) - b] \quad (14)$$

简化得:

$$T_{DN}(x, y) = [V^{-1}(x, y) - 1] \times W(x, y) \times [G_{DN}(x, y) - C_{DN}(x, y)] + G_{DN}(x, y) \quad (15)$$

从 (15) 式推导结果可知, 阴影去除公式 (13) 中的影像数据, 可以直接使用图像数据 DN 值。

遥感影像的一个像元具有一定的实际地面面积, 处于阴影区域边界的像元和处于非阴影区域边界的像元, 既有阴影部分, 又有非阴影部分, 而且由于环境反射光的差异, 阴影去除后, 形成阴影边界的亮边缘和非阴影边界的暗边缘。为消除这种边缘效应, 可分别追踪阴影区域和非阴影区域的边界线, 对边界线上的像元进行平滑化处理^[18]。

$$R(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} T(m, n) & \left| T(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} T(m, n) \right| > K \\ T(x, y) & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $T(x, y)$ 为原影像灰度值; $R(x, y)$ 为处理后的影像灰度值; S 为两条边界线邻域中点的集合; M 为集合内点像元的总数; K 为规定的非负阈值。

4 阴影检测与去除模型实例验证

本文以城市 KONOS 影像为例, 进行多波段阴影检测与阴影去除理论模型验证。

4.1 研究区选取

选取 2000 年 9 月 15 日南京市 4m 分辨率多光谱影像, 整幅图像为 2407 列 \times 2810 行。本研究选取南京市市区 400 列 \times 400 行子区作为研究区 (图 4), 该子区有云、建筑物等形成的阴影。

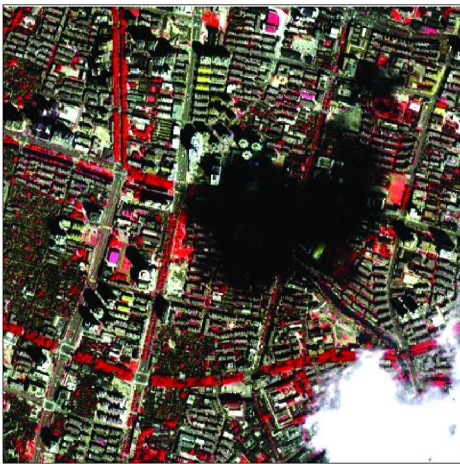


图 4 原始影像
Fig 4 Original image

4.2 阴影检测

KONOS 4m 分辨率多光谱影像的绿光波段

(图 5) 减去蓝光波段 (图 6), 形成蓝绿光波段差值影像 (图 7)。对近红外波段 (图 8) 和蓝绿光波段差值影像进行基于直方图阈值法提取阴影区域, 如图 9、图 10。以窗口 9×9 对差值法提取阴影的结果进行中值滤波 (图 11)。根据图 4 多波段检测阴影流程进行阴影检测, 结果如图 12 所示。



图 5 绿光波段影像
Fig 5 Original image for the green band

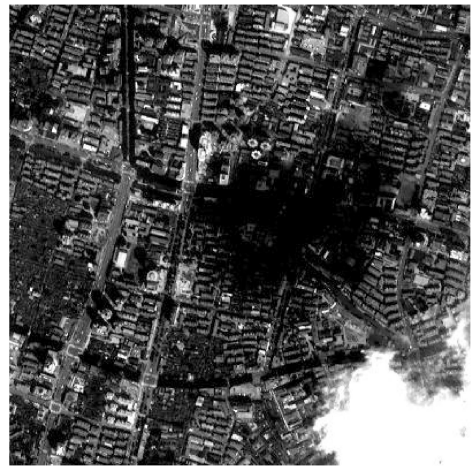


图 6 蓝光波段影像
Fig 6 Original image for the blue band

4.3 阴影去除

根据 6S 大气辐射传输模型及 (10) 式计算可得:

$$\text{Band1, } V^{-1}(x, y) = 1.98;$$

$$\text{Band2, } V^{-1}(x, y) = 2.39;$$

$$\text{Band3, } V^{-1}(x, y) = 2.86;$$

$$\text{Band4, } V^{-1}(x, y) = 3.74.$$

根据暗目标法求得各波段的程辐射值分别为:

$$\text{Band1, } C(x, y) = 228;$$

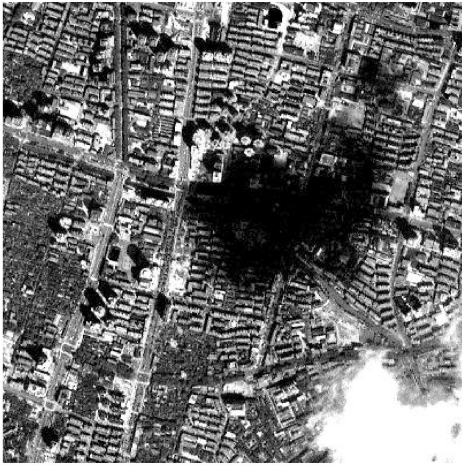


图 7 蓝、绿光波段差值影像

Fig 7 The image of the subtraction between green and blue band



图 10 差值影像提取阴影结果

Fig 10 Detecting shadows using the subtraction image

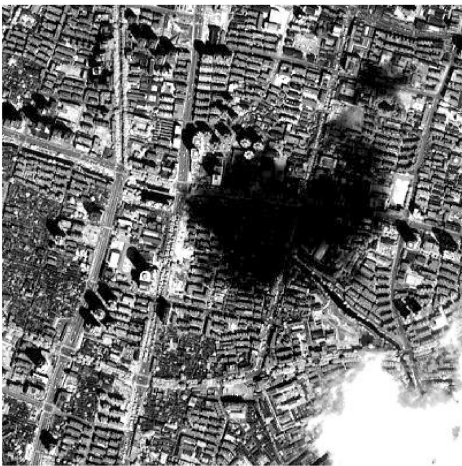


图 8 近红外波段影像

Fig 8 Original image for the infrared band

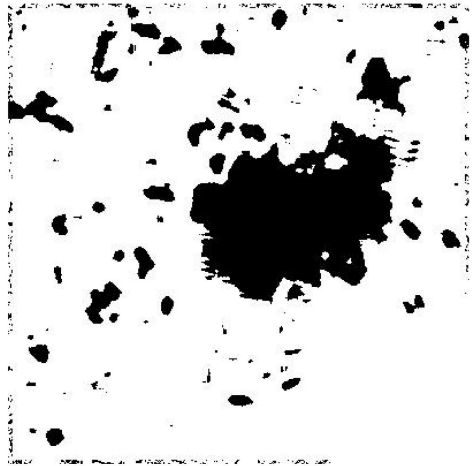


图 11 对差值法提取阴影进行中值滤波

Fig 11 Median filter image for Fig 10

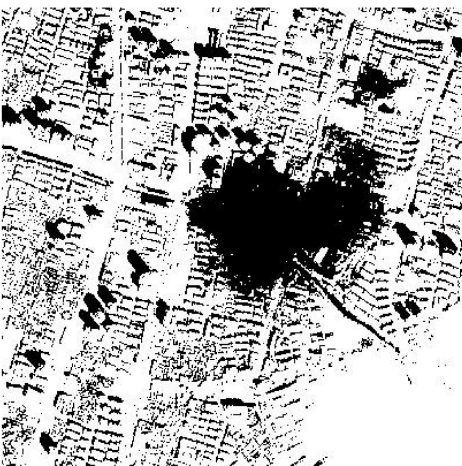


图 9 近红外波段影像提取阴影

Fig 9 Detecting shadows from near-infrared band

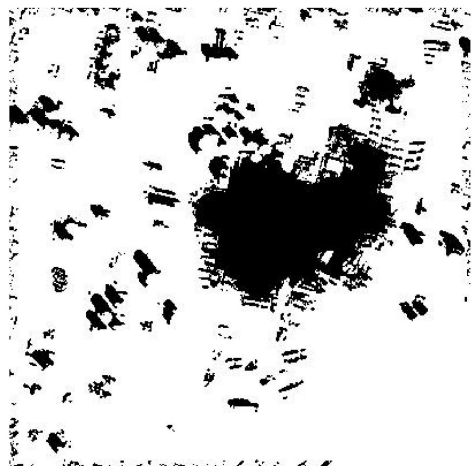


图 12 多波段检测阴影结果

Fig 12 The result of multispectral detecting shadow

Band2, $C(x, y) = 170$;

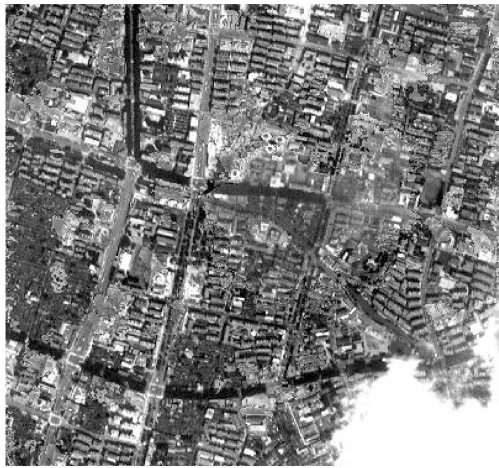
Band3, $C(x, y) = 88$;

Band4, $C(x, y) = 71$ 。

根据 (15) 式对 4 个波段数据分别进行运算, 可

得出阴影去除后的各波段结果图像如图 13。

根据 (15) 式进行边缘效应处理, 得到相应各波段的结果图像如图 14。图 15 为阴影及边缘效应去除后的标准假彩色合成影像。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 13 各波段阴影去除后的结果图像

(a) 蓝光波段; (b) 绿光波段; (c) 红光波段; (d) 近红外波段

Fig 13 Images with the shadows removed

(a) blue band; (b) green band; (c) red band; (d) near-infrared band

5 结 论

(1) 从地物光谱反射特性和遥感影像阴影产生机理出发, 发展的遥感影像多波段阴影检测方法简便、可行。

(2) 从遥感影像阴影成像机理出发, 发展了遥感影像阴影去除理论模型, 该模型可通过补偿遥感影像阴影区域能量信息达到去除阴影之目的, 而且

影像数据无信息丢失, 阴影区域增强信息完全真实于原数据。该模型通过 IKONOS 城市影像进行验证, 得到的效果很好。

(3) 在理想化的模型条件下模拟地面及大气等复杂系统, 还有一些不确定因素。如果要完全真实地消除影像阴影, 再现阴影区域地物的特征, 必须对复杂多变的大气和地面情况进行更详细的模拟, 这将是一个非常复杂的过程。本研究提出的方法随着大气传输模型的改进以及适时准确地获取传感器参数和



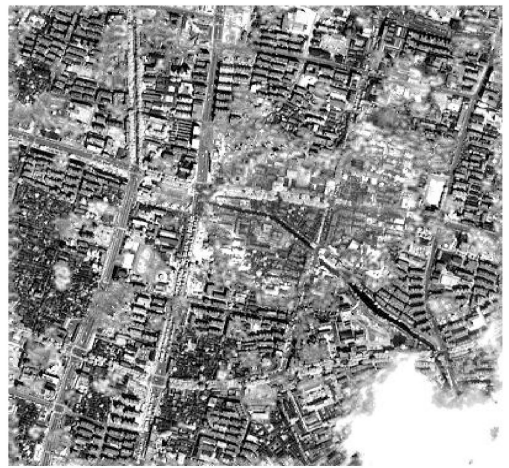
(a)



(b)



(c)



(d)

图 14 各波段消除边缘效应后的影像

(a) 蓝光波段; (b) 绿光波段; (c) 红光波段; (d) 近红外波段

Fig 14 Images with the four line removed

(a) blue band; (b) green band; (c) red band; (d) infrared band



Fig 15 Images with both the shadows and foul line removed

大气、地面数据参数,阴影去除效果将会更好。

参 考 文 献 (References)

- [1] Yoon J J, Koch C, Ellis T J. ShadowFlash: An Approach for Shadow Removal in an Active Illumination Environment [C]. British Machine Vision Conference, 2002.
- [2] Bruceirvin B, Mckeown D M. Methods for Exploring the Relationship between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery [J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, 1989, 19(16): 1564—1575.
- [3] Gils P. Remote Sensing and Cast Shadows in Mountainous Terrain [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(7): 833—839.
- [4] Gong P, Mei X, Bing G, et al. Improvement of an Oak Canopy Model Extracted from Digital Photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 68:

919—924

- [5] Gwinner K, Schaale M. A Case Study on the Influence of Shadows and Shading on Multispectral Airborne Imaging Data [A]. Presented at the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition [C]. Copenhagen, Denmark, 1997.
- [6] Wang J L, Wang S G. A Shadow Detection Method of Color Image Based on RGB Color Space [J]. Information Technology, 2002, 26(12): 7—8 [王军利, 王树根. 一种基于 RGB 彩色空间的影像阴影检测方法 [J]. 信息技术, 2002, 26(12): 7—8]
- [7] Yang Y J, Zhao R C, Wang W B. Detecting Shadow Areas in Aerial Images [J]. Signal Processing, 2002, 18(3): 228—232 [杨益军, 赵荣椿, 汪文秉. 航空图像中阴影区域的检测 [J]. 信号处理, 2002, 18(3): 228—232]
- [8] Xu M Z, Yu Z H. Automated Extraction of Shadows in Very High Resolution Spatial Satellite Images [J]. Journal of Geomatics, 2003, 28(1): 20—22 [许妙忠, 余志惠. 高分辨率卫星影像中阴影的自动提取与处理 [J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(1): 20—22]
- [9] Wang S G, Wang J L, Guo L Y. Shadow Detection of Color Aerial Images Based on K-L Transformation [J]. Journal of Geomatics, 2004, 29(2): 21—23 [王树根, 王军利, 郭丽艳. 基于 K-L 变换的航空影像阴影检测 [J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(2): 21—23]
- [10] Ralph Highnam, Michael Brady. Model-Based Image Enhancement of Far Infrared Images [A]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence [C], Volume 19 Issue 4, April 1997, 410—415.
- [11] Voicu L I, Myler H R, Weeks A R. Practical Considerations on Color Image Enhancement Using Homomorphic Filtering [J]. Journal of Electronic Imaging, 1997, 6(1): 108—113.
- [12] Akira S, Akio S, Hiroyuki A, et al. Dynamic Shadow Compensation of Aerial Images Based on Color and Spatial Analysis [A]. The International Conference on Pattern Recognition [C]. Barcelona, Spain, 2000.
- [13] Finlayson G D, Hordley S D, Drew M S. Removing Shadows from Images [A]. Proceedings European Conference on Computer Vision [C]. 2002.
- [14] Finlayson G D, Hordley S D, Drew M S. Recovery of Chromaticity Image Free from Shadows Via Illumination Invariance [A]. Proceedings International Conference on Computer Vision, Workshop on Color and Photometric Methods in Vision [C]. 2003.
- [15] Wang S G, Guo Z J, Li D R. Shadow Compensation of Color Aerial Images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(5): 514—516 [王树根, 郭泽金, 李德仁. 彩色航空影像上阴影区域信息补偿的方法 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2003, 28(5): 514—516]
- [16] Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. An Introduction to Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. [梅安新, 彭望球, 秦其明等. 遥感导论. 北京: 高等教育出版社, 2001.]
- [17] Vemote E. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum [M]. 6S User Guide Version 2, July 1997.
- [18] Ruan Q Q. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. [阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.]