

doi: 10.3788/gzxb20174607.0701003

从多波段图像中获取大气透过率的测量方法

郑鑫^{1,2}, 武鹏飞², 苗锡奎³, 饶瑞中^{1,2}

(1 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230022)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

(3 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要:提出了一种基于单帧多波段图像测量非气体吸收波段和弱气体吸收波段大气透过率的方法,可应用于相关光电工程中评估和修正大气衰减影响.首先,利用经过绝对辐射定标的图像采集设备获得辐射图像;其次,基于大气中图像退化光学模型与暗通道先验统计理论得到辐射图像暗通道对应的宽波段平均大气透过率;最后,结合特定波段消光系数和宽波段平均消光系数间的关系得到特定波段的大气透过率.实验对比分析表明:本文方法与能见度仪、激光雷达测量结果相关性较高,其中与能见度仪相比,相关系数在 0.89 和 0.95 之间,与激光雷达相比,相关系数在 0.95 和 0.97 之间;在 1 km 近距离条件下与能见度仪、激光雷达测量结果平均相对偏差最高分别为 9% 和 6%,在远距离条件下,与能见度仪测量结果相比,4 km 和 6 km 平均相对偏差最高分别为 15% 和 30%,与激光雷达测量结果相比,4 km 和 6 km 平均相对偏差最高分别为 9% 和 18%.

关键词:大气光学;大气透过率;大气辐射;多波段图像;暗通道

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)07-0701003-9

Measurement of Atmospheric Transmittance From Multi-Spectral Image

ZHENG Xin^{1,2}, WU Peng-fei², MIAO Xi-kui³, RAO Rui-zhong^{1,2}

(1 Department of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, 230022, China)

(2 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China)

(3 Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: A method of measuring atmospheric transmittance from a single frame of multi-spectral image for non and weak absorption waveband was proposed, which can be applied to evaluate and correct atmospheric attenuation effect in optoelectronics engineering field. Firstly, a radiometric image can be acquired using the camera with absolute radiometric calibration; secondly, according to the optical model of image degradation in atmosphere and the dark channel prior statistical theory, average atmospheric transmittance of dark channel can be calculated from radiometric image; finally, the atmospheric transmittance of specific wavelength is calculated using the average extinction coefficient relation database of the specific wavelength and the dark channel waveband. The experimental comparison indicates that the correlations between the transmittances measured by the new method, visibility meter and lidar are good. For the new method and visibility meter, the correlation coefficients are between 0.89 and 0.95,

基金项目:国家自然科学基金(No. 41505023)和光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(No. GKCP2016002)资助

第一作者:郑鑫(1992-),男,博士研究生,主要研究方向为图像大气传输. Email:zhengxp@mail.ustc.edu.cn

导 师:饶瑞中(1963-),男,研究员,博士,主要研究方向为大气湍流和辐射大气传输等. Email:rao@aiofm.ac.cn

通讯作者:武鹏飞(1987-),男,副研究员,博士,主要研究方向为辐射大气传输等. Email:wupengfei@aiofm.ac.cn

收稿日期:2017-01-16;录用日期:2017-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

and the average relative deviations are no more than 9%, 15%, 30% for 1km, 4 km and 6 km, respectively; while for the new method and lidar, the correlation coefficients are between 0.95 and 0.97, and the average relative deviations are no more than 6%, 9%, 18% for 1 km, 4 km and 6 km, respectively.

Key words: Atmospheric optics; Atmospheric transmittance; Atmospheric radiation; Multi-spectral image; Dark channel

OCIS Codes: 010.1290; 010.1300; 010.7295

0 引言

大气透过率是影响辐射大气传输的重要因素,是气象和相关光电工程领域中评估大气状况的重要参量之一^[1].目前,光电成像系统的广泛使用,尤其是多波段和高光谱成像系统的应用,为从图像中提取大气透过率信息,进而对大气状况进行评估以及对大气影响进行修正提供了一个重要的发展契机.

目前获得大气透过率的方法包括模式计算和直接测量.模式计算是根据辐射大气传输数值计算模型方法,输入影响透过率的大气参量,仿真模拟得到特定观测几何条件下的大气透过率,如MODTRAN (Moderate Resolution Transmission)、CART (Combined Atmospheric Radiative Transfer)等仿真计算程序^[2].直接测量方法中常见的有采用能见度仪和激光雷达.能见度仪测量得到的大气能见度在观测路径中大气光学特性均匀的条件下可直接转换为透过率.从测量原理区分,能见度仪分为透射式能见度仪、散射式能见度仪^[3]和基于图像的能见度测量仪^[4].透射式和散射式能见度仪为局部区域测量,在长距离目标观测条件下得到的大气透过率无法反映整条路径的大气状况;基于图像的能见度测量仪经历了从单目标-背景亮度对比法至双目标-背景亮度差法的演变,研究者从方法原理、误差来源和分析、硬件结构等方面做了系统的研究^[5-6],该方法采用单通道灰度图像,从图像中选取黑色目标(如树林、山体等在相机光谱响应范围内反射率较低的自然目标,或在一定距离外放置的1个或2个人工实用黑体)和对应天空背景,依据亮度对比反演大气能见度,显然该方法得到的是成像系统宽波段范围内的能见度表征,而非对应单波段,且其准确度受限于在图像宽波段范围内是否能够提取到黑色目标,如果采用人工实用黑体目标,虽然可以满足特定路径下的测量,然而在某些场景下会面临无法在感兴趣目标处放置黑体的困难,并且有时需要得到多个兴趣目标至观测处的透过率,同时人工实用黑体需要定期进行维护.此外,激光雷达也是测量大气透过率的重要仪器之一^[7-9],主要是依据激光经过大气时的透射或后向散射来测量透过率,但该方法受到激光传播距离的限制,在远距离观测条件下测量准确度随传播距离的增加而减小,这主要受限于激光发散和激光能量有限以及大气湍流的影响,并且激光雷达成本相对较高.因此,有必要面向多目标长距离任务场景,探究一种基于多波段和高光谱图像的便捷、低成本的单波段透过率探测方法.

随着图像分析和处理技术的发展,许多新方法和技术逐渐涌现,如暗通道先验统计理论^[10]等,其中基于暗通道理论的图像复原方法得到了快速发展,并取得了很好的复原效果,也有研究者提出了基于图像反演大气参量信息的方法,但存在没有将灰度信息转化为辐射信息即对图像进行绝对辐射定标,以及宽波段等缺点^[11].本文在暗通道先验统计理论、大气辐射传输理论以及已建立的消光系数关系数据库的基础上提出了一种利用单帧多波段辐射图像获得二维场景多目标非气体吸收波段和弱气体吸收波段大气透过率的测量方法.

1 大气透过率测量原理

大气中图像传输过程如图1,目标场景图像经过大气传输后,图像中每一像元的亮度值为目标固有亮度经过大气衰减后的直接透过分量与观察视线光路上大气散射光分量的叠加^[12],即有

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

此为大气中图像退化光学模型.式中右边第一项表示目标固有亮度经过大气衰减后的直接透过分量,第二项表示目标与成像传感器之间大气介质的散射光进入传感器视场的分量; $I(x)$ 表示目标被感知而形成图像的视在亮度, $J(x)$ 表示目标本身的固有亮度, $A(x)$ 表示以 x 位置为中心的某一局部区域对应的大气背景亮度, $t(x)$ 表示大气路径透过率.

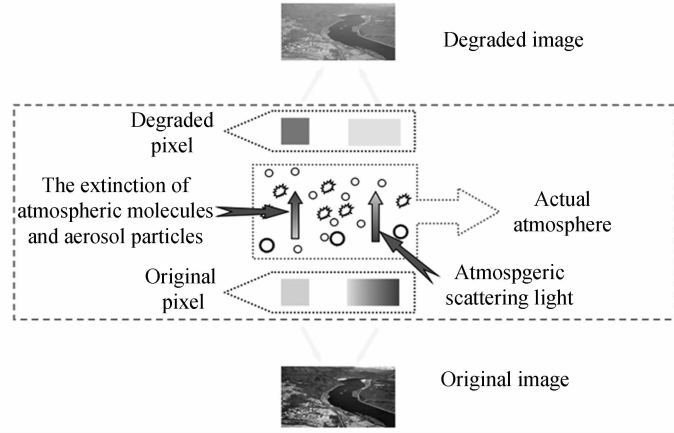


图1 大气中图像传输过程示意图

Fig. 1 Sketch map of image transmission in atmosphere

根据暗通道先验统计理论^[10],在非天空区的局部区域中,对于多波段成像通道,至少有一个通道的强度非常低,称为暗通道.暗通道内成像亮度表示为

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{\Delta\lambda \in \{\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^{\Delta\lambda}(y)] \} \quad (2)$$

式中, $I^{\Delta\lambda}$ 表示图像 I 的某一通道, $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的某一局部区域, I^{dark} 表示图像 I 的暗通道.

根据大气中图像退化光学模型和暗通道先验统计理论,暗通道宽波段平均大气透过率表示为

$$\bar{t}_{\Delta\lambda}(x) = 1 - \frac{I^{\text{dark}}(x)}{A(x)} \quad (3)$$

此时所获得的宽波段平均大气透过率二维分布呈现较明显的块效应,即在某一个局部区域内透过率保持不变,为消除块效应,需要进一步对二维大气透过率图进行优化,本文采用引导滤波技术^[13]执行精细化处理.引导滤波是基于局部线性模型提出的,输入图像包括引导图像 I 和待滤波图像 p ,经过滤波后得到输出图像 q .

引导滤波过程表示为

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I) p_j \quad (4)$$

式中, q_i 和 p_i 分别表示输出图像和待滤波图像的像素值, W_{ij} 为滤波核函数,其表达式为

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k: (i,j) \in \omega_k} \left[1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \epsilon} \right] \quad (5)$$

式中, I_i 表示引导图像的像素值, i, j, k 表示像素索引, μ_k 和 σ_k^2 分别表示 I 在局部窗口 ω_k 中的平均值和方差, $|\omega|$ 表示窗口 ω_k 中像素的个数, ϵ 表示平滑因子.

根据辐射传输理论,大气路径透过率表示为

$$t = \exp\left(-\int \beta dl\right) = \exp(-\bar{\beta}L) \quad (6)$$

式中, $\bar{\beta}$ 定义为路径平均消光系数, L 表示目标至观测处距离.

依据式(6),对某特定波段和宽波段分别有

$$\begin{cases} t_\lambda = \exp(-\bar{\beta}_\lambda L) \\ \bar{t}_{\Delta\lambda} = \exp(-\bar{\beta}_{\Delta\lambda} L) \end{cases} \quad (7)$$

依据式(7)则可以得到特定波段的大气透过率

$$\ln t_\lambda = \ln \bar{t}_{\Delta\lambda} \cdot \frac{\bar{\beta}_\lambda}{\bar{\beta}_{\Delta\lambda}} \quad (8)$$

依据辐射大气传输计算模式,可建立不同气溶胶类型下,单波段消光系数 $\bar{\beta}_\lambda$ 和图像采集设备暗通道宽波段平均消光系数 $\bar{\beta}_{\Delta\lambda}$ 之间的关系,具体过程为:首先,利用辐射大气传输模式计算某气溶胶类型下不同波段的消光系数 β_λ ;其次,采用相机光谱响应曲线 Q_λ^c 与消光系数 β_λ 计算得到相机宽波段平均消光系数 $\bar{\beta}_{\Delta\lambda}^c$.

$$\bar{\beta}_{\Delta\lambda}^c = \int Q_\lambda^c \beta_\lambda d\lambda / \int Q_\lambda^c d\lambda \quad c \in \{R, G, B\} \quad (9)$$

最后,得到特定波段与相机宽波段平均消光系数的关系. 利用式(8)、(9),通过宽波段平均大气透过率 $\bar{t}_{\Delta\lambda}$ 可得到特定波段对应的大气透过率 t_{λ} .

综上所述,大气透过率测量方法总体流程如图 2 所示.

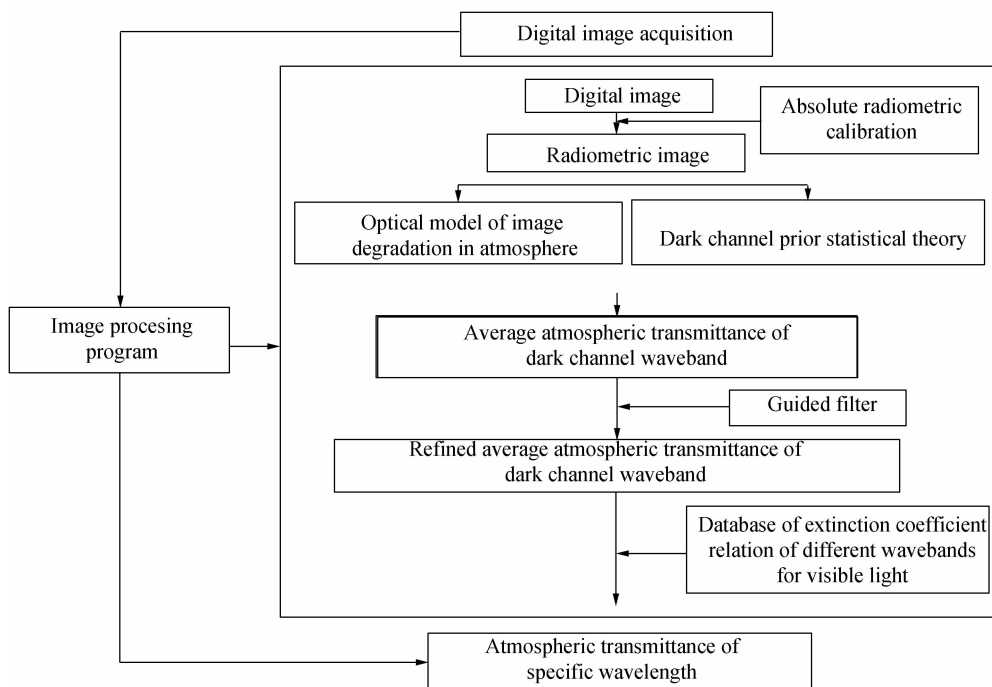


图 2 大气透过率测量方法总体流程

Fig. 2 The process of atmospheric transmittance measurement method

2 实验测量与对比分析

2.1 测量装置和辐射定标

大气透过率测量系统如图 3 所示,其中图像采集设备为 RGB 三波段彩色相机,相机的光谱响应曲线如图 3(b)所示.

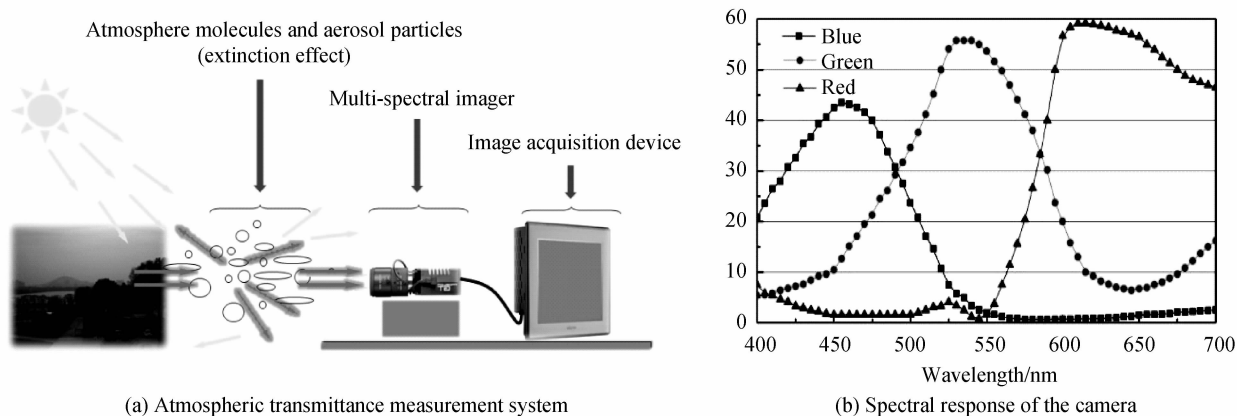


图 3 大气透过率测量系统和相机光谱响应

Fig. 3 Atmospheric transmittance measurement system and spectral response of the camera

使用积分球对相机进行绝对辐射定标,如图 4 所示. 相机与光谱仪同时分别获得不同条件下积分球内光源产生的不同波段灰度信息与辐亮度信息. 相机的灰度信息是在不同光圈和曝光时间下测得的,最终获得了实验相机在不同光圈和曝光时间下的定标数据库,图 5 给出相机光圈为 16-8、曝光时间 $2500\mu\text{s}$ 条件下不同波段图像灰度值与辐亮度的关系曲线,可看到图像的灰度值与辐亮度值近似呈线性关系.

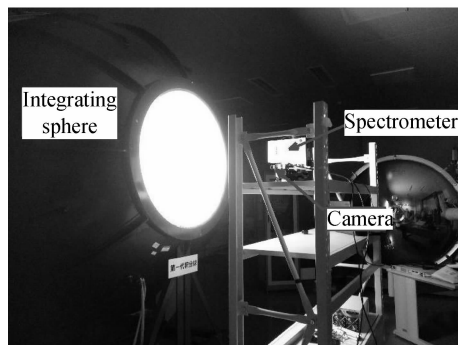


图 4 实验相机绝对辐射定标

Fig. 4 Absolute radiometric calibration of the camera

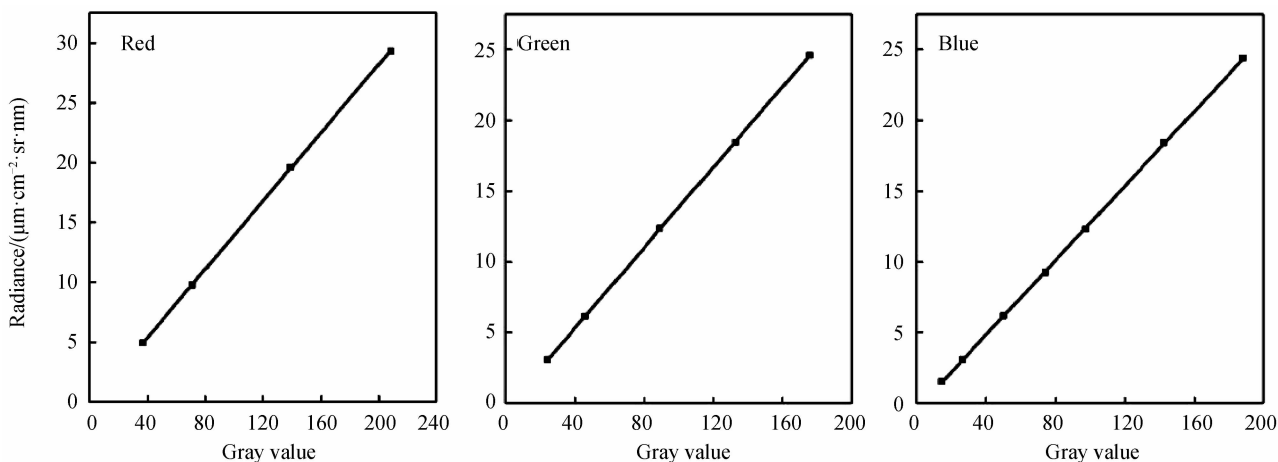
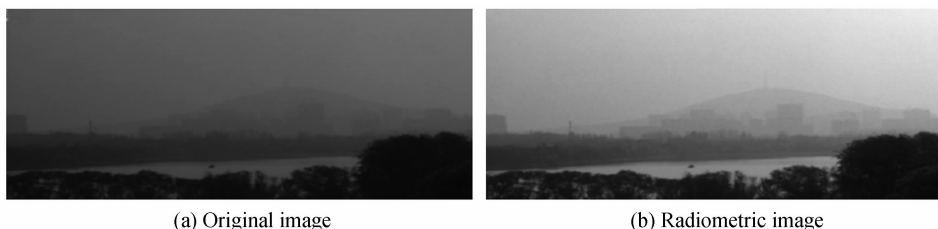


图 5 实验相机定标结果(光圈 16-8 和曝光时间 2 500 μs)

Fig. 5 Calibration results of the camera (aperture 16-8 and exposure time 2 500 μs)

通过辐射定标数据,可将采集得到的图像转换为辐射图像,如图 6 所示.



(a) Original image

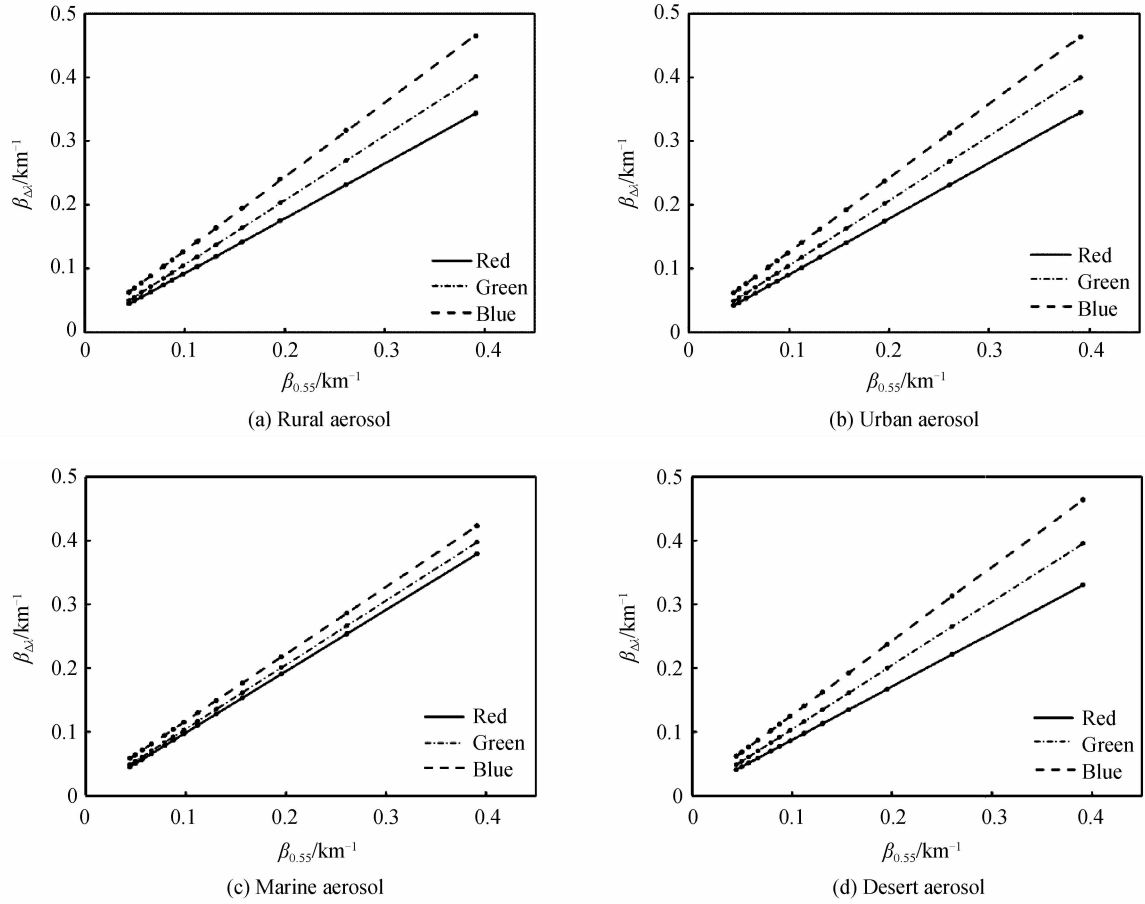
(b) Radiometric image

图 6 利用定标数据将源图像转换为辐射图像

Fig. 6 Converting original image into radiometric image through calibration data

2.2 特定波段和相机宽波段平均消光系数的关系

在北半球中纬度夏季、典型气溶胶条件下,结合相机的光谱响应曲线建立的 $0.55 \mu\text{m}$ 波段与相机宽波段平均消光系数的关系如图 7 所示, $0.55 \mu\text{m}$ 消光系数与 RGB 三个通道的平均消光系数之间呈现线性相关.基于此关系,利用得到的宽波段平均大气透过率可获得 $0.55 \mu\text{m}$ 波段的大气透过率.同样,可以建立不同非气体吸收波段和弱气体吸收波段消光系数关系数据库,进而得到对应波段的大气透过率.

图7 典型气溶胶类型下 $0.55 \mu\text{m}$ 和宽波段平均消光系数之间的关系Fig. 7 Relation of extinction coefficients between $0.55 \mu\text{m}$ and broadband under typical aerosol models

2.3 实验测量对比验证

为了验证本文建立的透过率测量方法的正确性和有效性,开展了一系列同时同地的对比验证实验,包括与前向散射式能见度仪和激光雷达测量的对比,其中不同方法测量结果之间的平均相对偏差和相关系数分别采用式(10)和式(11)表征.

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - Y_i}{X_i} \times 100\% \right| \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

式中, X_i 和 Y_i 分别表示两种不同方法测得的透过率值, N 表示样本个数.

2.3.1 与能见度仪测量对比

依据上述图像采集设备获得多波段图像,同时采用前向散射式能见度仪测量大气能见度,在大气均匀的前提下依据能见度 V 获得不同距离 L 上的大气透过率,即 $T_{\text{vis}} = \exp[-(3.912/V) \times L]$. 图8给出2016年6月13日一天内不同时刻利用本文方法获得的大气透过率与能见度仪结果的对比,图像采集时间与相应时刻的能见度如表1所列,其中选取成像场景中1 km、4 km和6 km处三个典型目标区域,如图8(a)所示,图8(b)~(d)中线性拟合曲线根据最小二乘法获得.

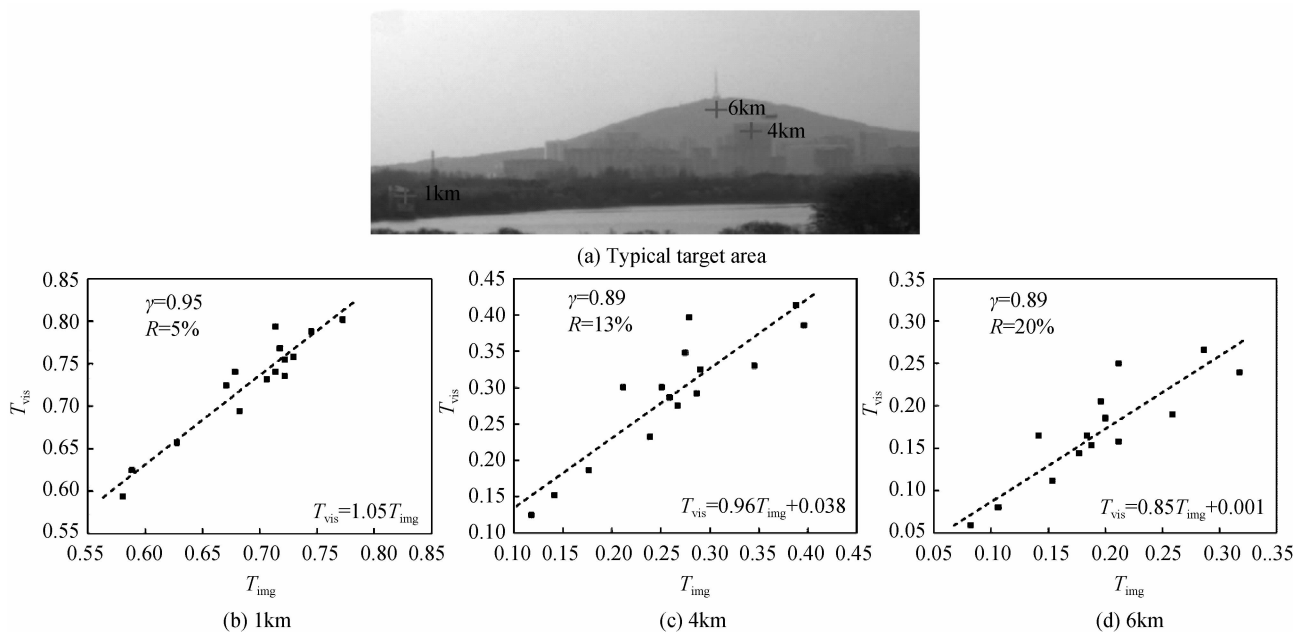


图 8 本文方法的大气透过率测量结果与能见度仪对比
 Fig. 8 Atmospheric transmittance obtained by the proposed method compared with visibility meter

表 1 2016 年 6 月 13 日图像采集时间及相应时刻的能见度

Table 1 Images time and visibilities at corresponding time on 13th June in 2016

Date	06-13														
Time	9 : 40	10 : 20	10 : 40	11 : 14	11 : 33	12 : 12	12 : 45	13 : 10	13 : 41	14 : 10	14 : 40	15 : 13	15 : 40	16 : 16	16 : 46
V/km	11.2	12.5	13.9	16.0	18.2	21.2	24.6	26.5	25.4	19.5	22.2	20.8	18.7	19.0	19.5

从对比结果可以看到,本文方法测得的一天内不同时刻大气透过率与能见度仪结果的相关系数在 1 km、4 km 和 6 km 处分别为 0.95、0.89 和 0.89,平均相对偏差分别为 5%、13% 和 20%。由于前向散射式能见度仪为局部单点测量,获得整条路径大气透过率时假定大气介质均匀,即将局部单点测量得到的大气消光系数对观测路径积分得到不同距离上的大气透过率,该方法在短距离时可认为是合理的,而在远距离条件下,大气介质存在不均匀性,这会造成单点的大气状况不能代表整个长距离大气条件,从而产生较大偏差,本文方法考虑的是传输路径上总的大气状况,即直接获得大气透过率,可在一定程度上反映不同目标在不同观测距离上的大气状况。

图 9 给出 2016 年 3 月~4 月不同日期利用本文方法获得的大气透过率与能见度仪结果的对比,图像采集时间与相应时刻的能见度如表 2 所列,同样选取成像场景中 1 km、4 km 和 6 km 处三个典型目标区域。从对比结果可以看到,本文方法测得的不同日期大气透过率与能见度仪结果的相关系数在 1 km、4 km 和 6 km 处分别为 0.89、0.93 和 0.89,平均相对偏差分别为 9%、15% 和 30%。

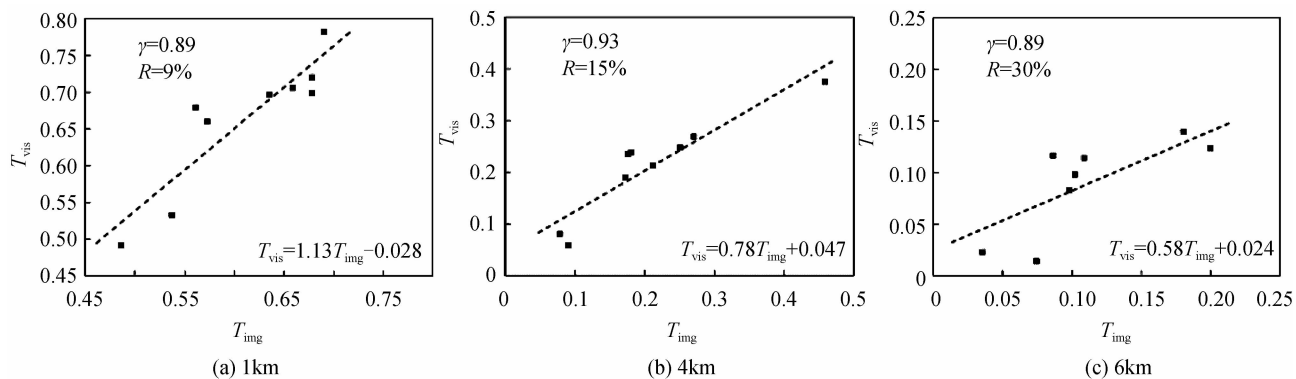


图 9 本文方法的大气透过率测量结果与能见度仪对比
 Fig. 9 Atmospheric transmittance obtained by the new method compared with Visibility Meter

表 2 2016 年 3 月-4 月图像采集时间及相应时刻的能见度

Date	03-25	03-28	03-29	03-30	03-31	04-01	04-08	04-21
Time	09:35	09:58	09:42	10:21	12:21	09:28	13:46	14:05
V/km	23.8	15.2	16.8	14.1	9.3	8.4	16.2	16.3

2.3.2 与激光雷达测量对比

将本文方法测量得到的大气透过率与激光雷达测量结果进行对比. 图 10 为 2016 年 8 月 29 日一天内不同时刻利用本文方法获得的大气透过率与激光雷达结果的对比, 图像采集时间与相应时刻的能见度如表 3 所列, 同样选取成像场景中 1 km、4 km 和 6 km 处三个典型目标区域.

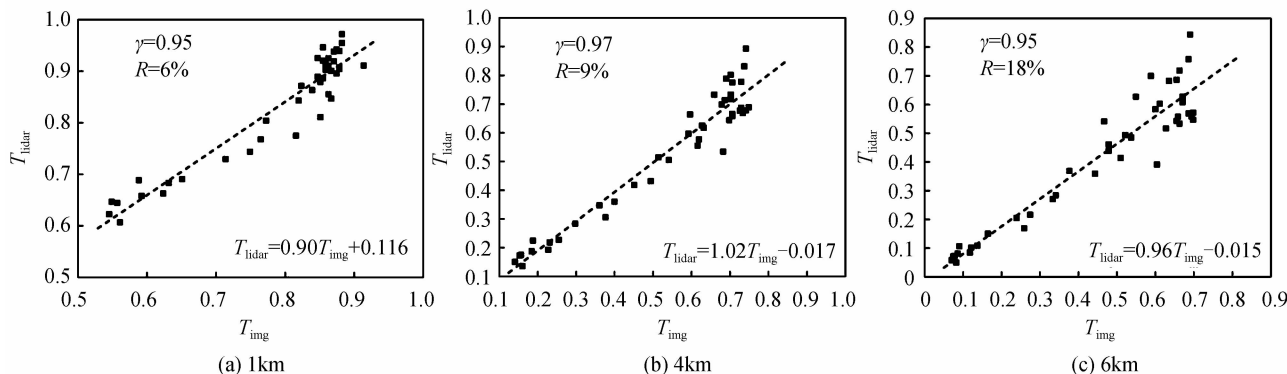


图 10 本文方法的大气透过率测量结果与激光雷达仪对比

Fig. 10 Atmospheric transmittance obtained by the new method compared with Lidar

表 3 2016 年 8 月 29 日图像采集时间及相应时刻的能见度

Table 3 Images time and visibilities at corresponding time on 29th April in 2016

Time	08:58	09:11	09:22	09:42	10:03	10:18	10:37	10:40	10:50	10:59	11:11	11:20	11:32	11:40	11:50
VIS/km	8.3	8.2	8.6	8.7	8.4	9.7	9.3	9.8	14.1	15.3	16.0	17.0	17.6	19.0	19.3
Time	11:59	12:22	12:30	12:43	12:49	13:01	13:10	13:20	13:34	13:41	14:02	14:10	14:29	14:41	14:52
VIS/km	19.7	22.7	22.2	22.9	22.7	20.8	21.2	24.1	26.7	27.6	26.6	26.6	26.2	30.3	27.1
Time	14:59	15:14	15:19	15:29	15:39	15:50	16:01	16:10	16:19	16:32	16:40	16:48			
VIS/km	29.7	28.6	30.2	29.3	28.2	30.0	29.4	29.2	28.5	28.3	26.3	28.3			

从对比结果可以看到, 本文方法测得的一天内不同时刻大气透过率与激光雷达测量结果的相关系数在 1 km、4 km 和 6 km 处分别为 0.95、0.97 和 0.95, 均接近于 1, 平均相对偏差分别为 6%、9% 和 18%. 激光传输到远距离处由于大气衰减导致光强减弱, 回波信号信噪比降低, 这会造成激光雷达在远距离处的测量结果存在一定偏差^[14]. 图 11 为 2016 年 8 月 29 日利用本文方法、激光雷达与能见度仪测得的大气透过率随时间变化对比, 可以看到, 本文方法与激光雷达测量结果更具有有一致性. 从图中可以看出中午 12 时之后, 激光雷达测量结果在 4 km 与 6 km 处出现波动, 尤其在 6 km 处波动较强, 这可能是由于激光在远距离大气传输过程中受到大气湍流的扰动, 产生光强起伏和光束抖动等^[15], 以及激光雷达信号信噪比低, 共同作用导致测量结果出现波动.

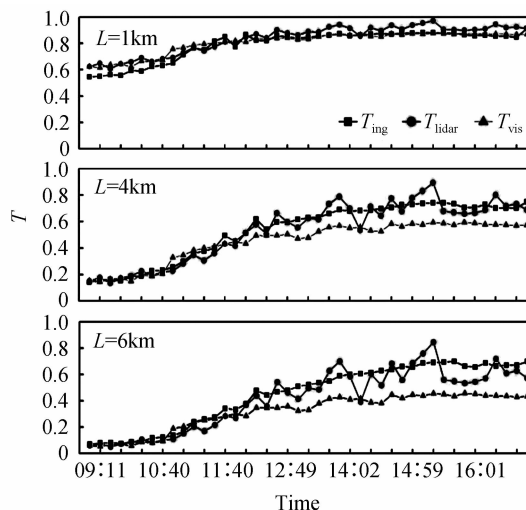


图 11 本文方法、激光雷达和能见度仪测得的大气透过率随时间的变化

Fig. 11 Atmospheric transmittance obtained by the proposed method compared with lidar and visibility meter

3 结论

本文提出了一种基于单帧多波段图像的非气体吸收波段和弱气体吸收波段大气透过率测量方法,可以直接获得二维场景多目标的大气透过率,不仅仅局限于单一目标的某条传播路径;不受目标距离限制,其适用于已成像的所有目标,反映了目标至观测处路径上的总大气状况;可实时测量,测量成本低,且测量装置简便,可应用于多种平台.与能见度仪的对比结果表明,相关系数在 0.85 以上,与激光雷达的对比结果表明,相关系数在 0.95 以上.此外,在近距离条件下平均相对偏差在 10% 以内,在远距离条件下与能见度仪平均相对偏差在 30% 以内,而与激光雷达平均相对偏差在 20% 以内.测量实验的对比结果验证了本文测量方法的有效性.

参考文献

- [1] RAO Rui-zhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012, 313-326.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 323-326.
- [2] WANG Ying-jian, FAN Cheng-yu, WEI He-li. Laser beam propagation and applications through the atmosphere and sea water[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015, 84-97.
王英俭,范承玉,魏合理. 激光在大气和海水中传输及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015, 84-97.
- [3] XING Xiang-nan, CUI Yan-mei, ZHANG Fu-gen, *et al.* Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2010, **30**(5): 15-20.
邢向楠,崔岩梅,张富根,等. 能见度测量技术现状及发展趋势综述[J]. 计测技术, 2010, **30**(5): 15-20.
- [4] 谢兴生,陶善昌,周秀骥. 数字摄像法测量气象能见度[J]. 科学通报, 1999, **44**(1): 97-100.
- [5] LV Wei-tao, TAO Shan-chang, LIU Yi-feng, *et al.* Measuring meteorological visibility based on digital photography - dual differential luminance method and experimental study[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, **28**(4): 559-570.
吕伟涛,陶善昌,刘亦风,等. 基于数字摄像技术测量气象能见度—双亮度差方法和试验研究[J]. 大气科学, 2004, **28**(4): 559-570.
- [6] WANG Jing-li, LIU Xu-lin, GAO Wu-feng, *et al.* Control circuit design of digital photography visiometer system[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, **34**(5): 633-637.
王京丽,刘旭林,高五峰,等. 数字摄像能见度仪器系统控制电路设计[J]. 气象科技, 2006, **34**(5): 633-637.
- [7] XIONG Xing-long. The research of visibility retrieved based on lidar[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008: 9-50.
熊兴隆. 基于激光雷达的能见度反演方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008: 9-50.
- [8] HORMAN M H. Measurement of atmospheric transmissivity using backscattered light from a pulsed light beam[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, **51**(6): 681-691.
- [9] KARIN W W, WOLFGANG J, ANTON K, *et al.* Atmospheric transmittance measurements of Nd: YAG, IODINE and CO₂ laser radiation over 8.6km, and statistical analysis of extinction coefficients[J]. *Infrared Phy & Technol*, 1995, **36**(1): 513-528.
- [10] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]. IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1956-1963.
- [11] ZHAO Rui, HU Liao-lin, ZHAO Jiang-tao. Atmospheric visibility measurement based on dark channel prior[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**: 060103.
赵瑞,胡辽林,赵江涛. 基于暗原色先验理论的大气能见度测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53**: 060103.
- [12] WU Peng-fei. Mechanism of atmospheric effect on image quality and image restoration method[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 83-90.
武鹏飞. 大气光学特性对成像质量影响机理和图像校正方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 83-90.
- [13] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397-1409.
- [14] YANG Zhao, LI Qiang. Influence of atmospheric transmission on lidar system[J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2005, **14**(3): 4-7.
杨昭,李强. 大气传输特性对激光雷达探测系统的影响[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2005, **14**(3): 4-7.
- [15] JING Xu, WU Yi, HOU Zai-hong, *et al.* Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3110-3116.
靖旭,吴毅,侯再红,等. 湍流大气中激光传输光强起伏特征研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3110-3116.