

偏振滤波抑制大气背景光的性能计算模型

冯 斌^{1,2,3,4} 史泽林^{1,3,4} 艾 锐^{1,2,3,4} 周全赞^{1,2,3,4}

¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016
⁴ 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

摘要 如何定量计算和预测在不同条件下偏振滤波抑制大气背景光的效果, 目前缺乏合适的性能表征量及其计算模型, 为此提出了偏振滤波抑制大气背景光的性能计算模型。定义了大气背景光抑制比(ARR), 综合天空光相对光谱辐射功率模型和地面太阳直接辐射光谱模型、地物反射特性等, 给出了以太阳方位、相机光轴方向、大气能见度和地物光谱反射率等为输入参数的 ARR 计算公式。该模型的仿真实验结果表明, 在晴天与轻霾天气条件下, 太阳夹角、大气能见度和地物类型三因素的变化对 ARR 的影响依次减弱; 太阳夹角的变化强烈影响 ARR; 偏振滤波对多数地物取得相似的大气背景光抑制效果; ARR 指标值越大, 图像对比度提高越明显。

关键词 大气光学; 性能计算模型; 偏振滤波; 大气背景光

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0401003

A New Computational Model for Performance of Airlight Rejection Utilizing Polarization Filtering

Feng Bin^{1,2,3,4} Shi Zelin^{1,3,4} Ai Rui^{1,2,3,4} Zhou Quanyun^{1,2,3,4}

¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Science, Shenyang, Liaoning 110016, China

⁴ Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract There are no appropriate performance characteristic parameters and computational models to quantitatively compute and predict the performance of airlight rejection utilizing polarization filtering under different conditions. Therefore, a computational model for performance of airlight rejection utilizing polarization filtering is presented. This model defines the airlight rejection ratio (ARR), integrates a model for skylight relative spectral radiant power, a solar spectral model for direct irradiance on horizontal planes, an object reflection characteristic, and other factors, and gives the ARR calculation formula whose inputs contain a sun position, an optical axis direction of a camera, atmospheric visibility, object spectral reflectance, and other parameters. Simulation and experiment of this model indicate that in sunny weather and slight haze weather, the influence respectively resulting from changes of the angular distance between the observation direction and the direction of sunlight, atmospheric visibility, and object types on the ARR gradually weakens; the change of angular distance between the observation direction and the direction of sunlight intensively affects the ARR; polarization filtering achieves similar effect of airlight rejection for most objects; the larger the ARR index is, the more effectively the image contrast is improved.

Key words atmospheric optics; computational model for performance; polarization filtering; airlight

OCIS codes 010.1290; 260.5430; 330.4060; 330.4595

收稿日期: 2010-08-16; 收到修改稿日期: 2010-09-30

基金项目: 国家 973 计划资助课题。

作者简介: 冯 斌(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事偏振光学、大气光学及图像处理等方面的研究。

E-mail: fbsy@sia.cn

导师简介: 史泽林(1965—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事光电成像、图像处理、目标识别与跟踪及精确制导等方面的研究。E-mail: zlshi@sia.cn

1 引 言

偏振滤波抑制大气背景光是提高成像质量的一个重要技术途径。通常利用了大气背景光是部分偏振光的特点,通过在相机前增加可旋转的偏振片,并置偏振片的透振方向垂直于大气背景光的最大光强方向来实现^[1,2]。利用偏振滤波进行户外观察发现:相同的户外条件下,利用不同的偏振片进行偏振滤波时,大气背景光的抑制效果存在差异;同一偏振片在不同户外条件下(包括太阳方位、观察方向、大气能见度和地物类型等)进行偏振滤波时,大气背景的抑制效果亦存在差异。以上观察表明偏振滤波对大气背景光的抑制效果不但与偏振片本身的特性有关,而且与太阳方位、观察方向、天气条件和地物类型等多个因素有关,抑制效果的建模过程复杂。

大气物理领域的最新成果为深入研究偏振滤波抑制大气背景光提供了理论依据。1976年,McCartney^[3]给出了用于描述大气能见度与大气浑浊度关系的原始数据。1986年,美国太阳能研究所的Bird^[4]给出以太阳的天顶角和Angstrom浑浊度系数为输入参数的,用于计算地面太阳直接光谱辐照度的SPCTRAL2模型;1999年,犹他大学的Preetham^[5]使用大气浑浊度替换了Angstrom浑浊度系数。1999年和2003年,Preetham^[5,6]提出用于计算天空光相对辐射功率的PSS99模型。2004年,奥地利维也纳技术大学的Wilkie^[7]在欧洲计算机绘制技术大会上提出了目前最新的天空光偏振模型。2008年,美国喷气推进实验室(JPL)公布了包含2004多种地物反射率或辐射率的数据库^[8]。

本文介绍了偏振滤波抑制大气背景光的基本原

理,提出了偏振滤波抑制大气背景光的性能计算模型。在该模型中,定义了大气背景光抑制比(ARR),用于描述偏振滤波引起靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度两者衰减倍数之比;综合天空光相对光谱辐射功率模型、地面太阳直接辐射光谱模型、地物反射特性等,给出了以太阳方位、相机光轴方向和大气能见度等为输入参数的ARR计算公式。最后,分析了晴天和轻霾天气条件下,太阳夹角、地物类型和大气能见度三因素的变化对ARR的影响程度,并对本文模型的有效性进行了验证。

2 偏振滤波抑制大气背景光的基本原理

如图1所示,对于户外远景成像,地物辐亮度 L^{object} 在传输过程中受到大气散射的影响,最终进入偏振片的总辐亮度 I 包括地物直射光成分 D 和大气背景光成分 A ^[1,2,9,10]:

$$I = D + A, \quad (1)$$

式中地物直射光成分指地物辐亮度 L^{object} 经大气衰减后的成分,且随着场景深度的增大而不断衰减。大气背景光成分 A 指由大气散射而引起的,且随着场景深度的增加而增强。在场景深度较大情况下,通常合理假定地物直射光成分 D 的偏振度为零,大气背景光成分 A 是部分偏振光^[1,2]。在图1中,由太阳光入射方向、相机光轴方向和散射粒子中心组成的平面称为入射面,太阳光入射方向和相机光轴方向之间的夹角称为散射角,入射面的法线方向平行于大气背景光的最大光强方向。

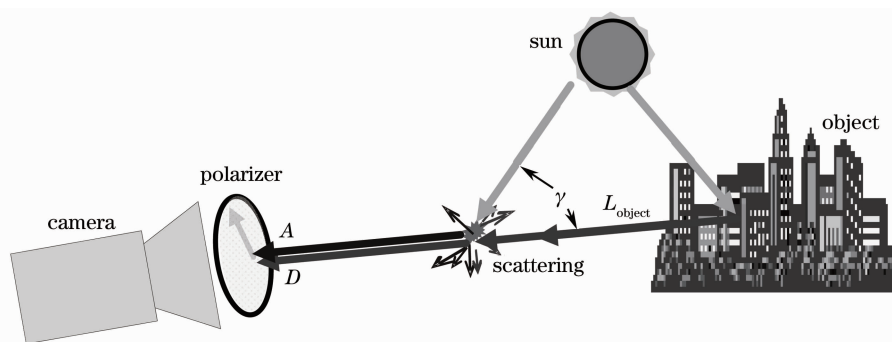


图1 偏振滤波抑制大气背景光的基本模型

Fig. 1 Basic model for airlight rejection utilizing polarization filtering

图2中,中心点 O 表示相机的光心位置,太阳光入射方向 OS 和相机的光轴方向 OV 夹角 γ (即太阳夹角)的计算公式^[11]为

$$\cos \gamma = \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v) + \cos \theta_s \cos \theta_v, \quad (2)$$

式中 θ_s 表示太阳的天顶角, ϕ_s 表示太阳的方位角, θ_v 表示相机光轴方向的天顶角, ϕ_v 表示相机光轴方向的方位角,并规定正南方向的方位角为 0° ,正东方向的方位角为 $+90^\circ$ 。

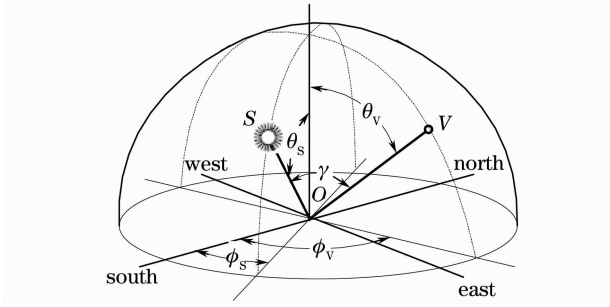
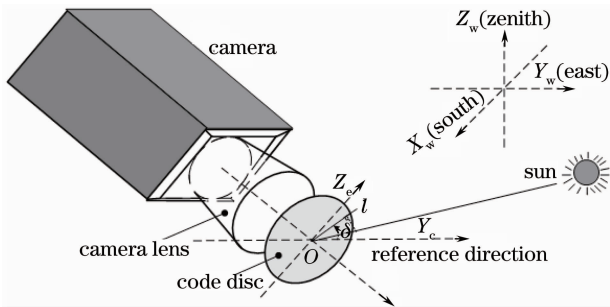


图 2 地平坐标系下的方向和角度

Fig. 2 Directions and angles on a horizontal coordinate

图 3 中,在相机前安装用于读取偏振片旋转角度的码盘,其中码盘面轴线与相机光轴共轴。相机在水平放置时,该码盘的基准方向(0° 旋转方向)与水平方向平行。记前述入射面与该码盘面所属平面的交线为 l ,下面将推导出交线 l 与该码盘基准方向之间角度 δ 的计算公式。

图 3 码盘及 δ 角度的示意图Fig. 3 Diagram for code disc and δ angle

如图 3 所示,以该码盘面中心 O 为坐标中心分别建立世界坐标系和相机坐标系。世界坐标系记为 $O-X_wY_wZ_w$,其中 X_w 为正南方向, Y_w 为正东方向, Z_w 为天顶方向。相机坐标系记为 $O-X_cY_cZ_c$,其中 X_c 沿着相机光轴方向, Y_c 沿着该码盘基准方向, Z_c 沿着码盘 90° 方向。从 $O-X_wY_wZ_w$ 到 $O-X_cY_cZ_c$ 的坐标变换矩阵为

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \phi_V & \sin \phi_V & 0 \\ -\sin \phi_V & \cos \phi_V & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \sin \theta_V & 0 & \cos \theta_V \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \theta_V & 0 & \sin \theta_V \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta & \sin \eta \\ 0 & -\sin \eta & \cos \eta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 η 为相机的横滚角。

在太阳入射光方向上取单位向量 \mathbf{OT} ,则在世界坐标系下 T 的坐标 (x_w, y_w, z_w) 为

$$\begin{cases} x_w = \sin \theta_s \cos \phi_s \\ y_w = \sin \theta_s \sin \phi_s \\ z_w = \cos \theta_s \end{cases} \quad (6)$$

根据两直角坐标系之间的映射关系, T 点在相机坐标系下的坐标 (x_c, y_c, z_c) 为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则交线 l 与该码盘基准方向的角度 δ 为

$$\delta = -\arctan(z_c/y_c), \quad (8)$$

式中 δ 以 Y_c 为基准,顺时针旋转为正,逆时针旋转为负。

若置偏振片的透振方向与该码盘基准方向的夹角为 δ ,则能最大限度地抑制大气背景光成分。

3 偏振滤波抑制大气背景光的性能计算模型

图 4 描述了偏振滤波抑制大气背景光的过程中,大气上界的太阳辐射到达相机靶面的过程。大气上界的太阳辐射经大气吸收和散射形成偏振片前

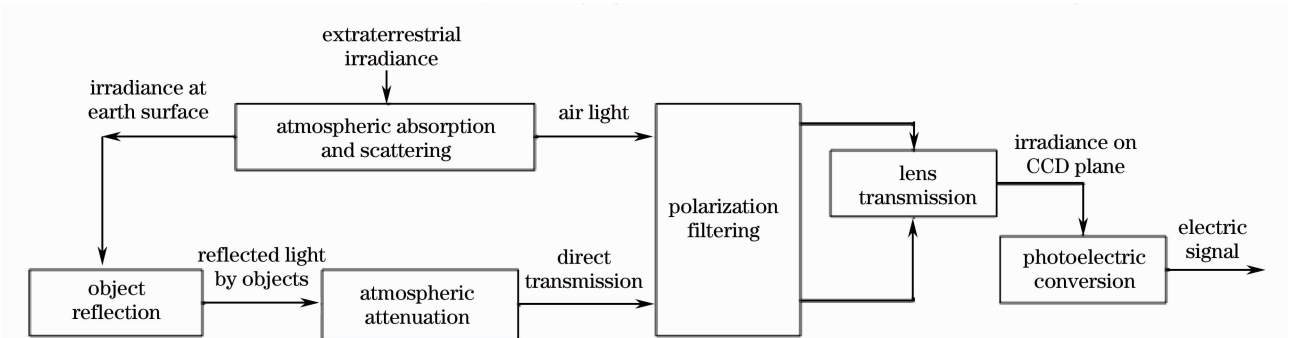


图 4 偏振滤波抑制大气背景光的光路图

Fig. 4 Optical path diagram of airtight rejection utilizing polarization filtering

的大气背景光,描述该过程的典型模型有 PSS99 模型^[5,6]。大气上界的太阳辐射经过大气吸收与散射后形成地面太阳直接光谱辐照度,描述该过程的典型模型有 SPCTRAL2 模型^[4]。地物表面反射地面太阳直接辐射形成地物辐亮度,能够利用与反射场景几何因素相关的参数和 NASA 光谱数据库^[8]提供的地物光谱反射率给予描述。大气背景光和地物直射光透过偏振片的过程,利用平行于和垂直于偏振片透振方向上的光谱透射率给予描述。通过偏振片的透射光在相机靶面上产生辐照度的过程,利用相机响应给予描述。

3.1 大气背景光抑制比的定义

偏振滤波的目的在于降低相机靶面上大气背景光辐照度相对于地物直射光辐照度的比重,因此在相机靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度的比重变化可用于衡量大气背景光抑制效果。本文定义 ARR 为

$$r_{ARR} = \Gamma_A / \Gamma_D, \quad (9)$$

式中 $\Gamma_A = E_A^0 / E_A^1$ 表示在相机靶面上大气背景光辐照度的衰减倍数, $\Gamma_D = E_D^0 / E_D^1$ 表示在相机靶面上地物直射光辐照度的衰减倍数。 E_A^0 和 E_A^1 分别表示滤波前后在相机靶面上大气背景光的辐照度, E_D^0 和 E_D^1 分别表示滤波前后相机靶面上地物直射光的辐照度。ARR 描述了滤波引起相机靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度两者衰减倍数之比。

ARR 是一个可用于描述在不同条件下定量计算偏振滤波抑制大气背景光性能的表征量(3.5 节)。

3.2 天空光相对光谱辐射功率模型

1999 年 Preetham^[5] 提出计算天空光相对光谱辐射功率 A_λ^* 的 PSS99 模型。该模型以太阳的天顶角、太阳的方位角、观测方向的天顶角、观测方向的方位角和大气浑浊度为输入参数,其中大气浑浊度 T 用来描述晴天到全阴天的变化过程。McCartney^[3] 给出了用于描述大气能见度 V 与大气浑浊度 T 关系的原始数据。图 5 是利用这些数据拟合的大气能见度至大气浑浊度的转换曲线。

鉴于大气能见度比大气浑浊度应用广泛,且使用能见度仪可方便测量,因此本文利用大气能见度与大气浑浊度之间的关系,将 PSS99 模型改为以太阳的天顶角、太阳的方位角、观测方向的天顶角、观测方向的方位角和大气能见度为输入参数。图 6 是修改后 PSS99 模型的仿真结果举例,其中大气能见度为 20 km,太阳的天顶角为 +45°,太阳的方位角为 0°,观察方向的天顶角为 +80°,观察方向的方位角为 +135°。

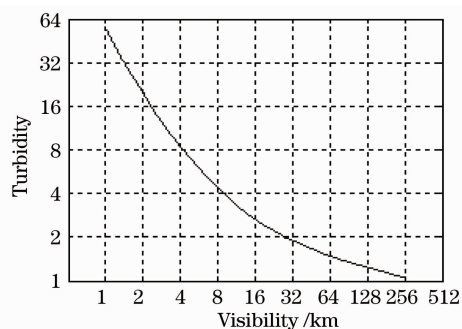


图 5 大气能见度至大气浑浊度的转换曲线
Fig. 5 Curve for conversion of atmospheric visibility to atmospheric turbidity

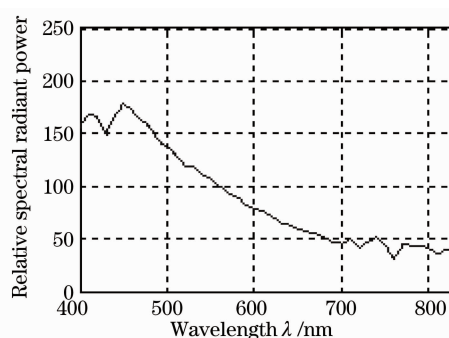


图 6 天空光相对光谱辐射功率模型的仿真结果举例
Fig. 6 Example of simulation result by model for skylight relative spectral radiant power

3.3 地面太阳直接辐射光谱模型

1986 年, Bird^[4] 给出了以太阳的天顶角和 Angstrom 浑浊度系数为输入参数的,用于计算地面太阳直接光谱辐照度 S_λ 的 SPCTRAL2 模型。1999 年, Preetham^[5] 使用大气浑浊度 T 替换了 Angstrom 浑浊度系数 β 作为输入参数,即

$$\beta = 0.04608365822050T - 0.04586025928522. \quad (10)$$

本文利用大气能见度 V 替换了大气浑浊度 T ,修改 SPCTRAL2 模型为以大气能见度和太阳的天

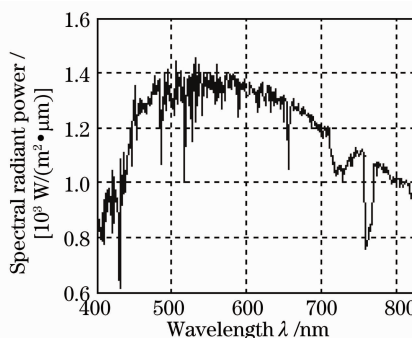


图 7 地面太阳直接辐射光谱模型的仿真结果举例
Fig. 7 Example of simulation result by solar spectral model for direct radiation on horizontal planes

顶角为输入参数。图 7 是修改后 SPCTRAL2 模型的仿真结果举例,其中大气能见度为 30 km,太阳的天顶角为 +45°。

3.4 地物的光谱反射率

2008 年,美国喷气推进实验室(JPL),利用地物

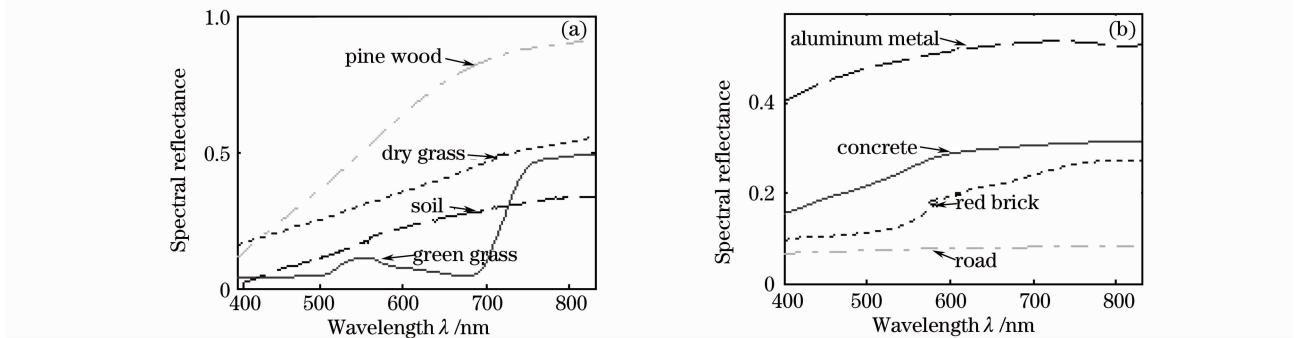


图 8 ASTER 光谱数据库提供的典型地物光谱反射率。(a)典型自然物,(b)典型人造物

Fig. 8 Typical object spectral reflectance from ASTER spectral library. (a) typical natural objects, (b) typical man-made objects

3.5 面向偏振滤波的大气背景光抑制比计算公式

本节将推导出 ARR 的计算公式,使用的主要符号及其物理含义为: L_{object} 为地物辐亮度; D 为地物直射光的辐亮度(地物辐亮度经大气衰减后的成分); A 为大气背景光的辐亮度; L_{sky} 为无穷远处天空光的辐亮度; τ 为大气透射率; S 为地面太阳直接辐照度; R 为地物反射率; E_A^0 为偏振滤波前靶面上大气背景光的辐照度; E_D^0 为偏振滤波前靶面上地物直射光的辐照度; E_A^1 为偏振滤波后靶面上大气背景光的辐照度; E_D^1 为偏振滤波后靶面上地物直射光的辐照度; τ_c 为相机镜头的透射率; Q_λ 为相机的光谱响应曲线; A_λ^{\parallel} 为大气背景光辐亮度中平行于其最大光强方向的分量; A_λ^{\perp} 为大气背景光辐亮度中垂直于其最大光强方向的分量; P_A 为大气背景光的偏振度; $g_x(\lambda)$ 为偏振片在平行于其透振方向的光谱透射率; $g_y(\lambda)$ 为偏振片在垂直于其透振方向的光谱透射率;在符号上加有下标 λ , 表示该符号对应物理量的光谱形式。

ARR 计算公式的推导分为四个步骤:

1) 光学系统前大气背景光的光谱辐亮度 A_λ 和地物直射光的光谱辐亮度 D_λ 。

PSS99 模型^[5,6] 计算了天空光相对光谱辐射功率 A_λ^* 。记 $K_1 A_\lambda^*$ 表示天空光光谱辐射功率,其中 K_1 与波长 λ 无关。由朗伯体的辐射出射度与辐亮度的关系,得无穷远处天空光的光谱辐亮度为

$$L_{\lambda\text{sky}} = \frac{1}{\pi} K_1 A_\lambda^* \quad (11)$$

光谱的高级星载热辐射和反射辐射计 ASTER 对地物进行测量,并公布了包含 2004 多种地物反射率或辐射率的数据库^[8]。图 8 是由该数据库提供的典型地物光谱反射率所绘制的光谱曲线。

考虑大气光谱透射率 τ_λ 的影响,在光学系统前大气背景光的光谱辐亮度 A_λ 为^[1]

$$A_\lambda = L_{\lambda\text{sky}} (1 - \tau_\lambda) = \frac{1}{\pi} K_1 A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) \quad (12)$$

SPCTRAL2 模型^[4] 计算了地面太阳直接光谱辐照度 S_λ 。在晴天和轻霾天气条件下,考虑到太阳入射光是照射地物的主要光源,忽略地物周围环境漫射光的影响;由朗伯体辐射出射度与辐亮度的关系,得物体反射太阳光后形成地物的光谱辐亮度 $L_{\lambda\text{object}}$ 为

$$L_{\lambda\text{object}} = \frac{1}{\pi} K_2 R_\lambda S_\lambda \quad (13)$$

式中 R_λ 表示地物光谱反射率; K_2 表示与反射场景几何因素相关,但与波长无关的参数。

地物辐亮度经大气衰减后,在光学系统前地物直射光的光谱辐亮度为^[1]

$$D_\lambda = \tau_\lambda L_{\lambda\text{object}} = \frac{1}{\pi} \tau_\lambda K_2 R_\lambda S_\lambda \quad (14)$$

2) 没有偏振滤波条件下,靶面上大气背景光的辐照度 E_A^0 和地物直射光的辐照度 E_D^0 。

考虑相机镜头的透射率 τ_c 和相机光谱响应曲线 Q_λ 的影响。假定相机镜头的透射率 τ_c 在波长 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 范围内为小于 1 的常数。在没有偏振滤波条件下,由物空间亮度与像平面的辐照度的关系,得到靶面上大气背景光的辐照度 E_A^0 和地物直射光的辐照度 E_D^0 分别为

$$E_A^0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_3 \tau_c Q_\lambda A_\lambda d\lambda = \frac{1}{\pi} K_1 K_3 \tau_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) d\lambda \quad (15)$$

$$E_D^0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_3 \tau_0 Q_\lambda D_\lambda d\lambda = \frac{1}{\pi} K_2 K_3 \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda, \quad (16)$$

式中 K_3 是一个与相机的相对孔径有关的, 且与波长 λ 无关的参数。

3) 在偏振滤波条件下, 靶面上大气背景光的辐照度 E_A^1 和地物直射光的辐照度 E_D^1 。

若 $P_{A,\lambda}$ 表示大气背景光的偏振度(光谱形式), 则

$$P_{A,\lambda} = (A_\lambda^{\parallel} - A_\lambda^{\perp}) / A_\lambda = (A_\lambda - 2A_\lambda^{\perp}) / A_\lambda = (2A_\lambda^{\parallel} - A_\lambda) / A_\lambda, \quad (17)$$

于是

$$A_\lambda^{\perp} = 0.5(1 - P_{A,\lambda})A_\lambda, \quad (18)$$

$$A_\lambda^{\parallel} = 0.5(1 + P_{A,\lambda})A_\lambda. \quad (19)$$

偏振滤波为了最大限度地抑制大气背景光, 置偏振片的透振方向与大气背景光最大光强方向垂直。此时, A_λ^{\parallel} 受到 $g^y(\lambda)$ 的光谱滤波作用, A_λ^{\perp} 受到 $g^x(\lambda)$ 的光谱滤波作用, 因此靶面上大气背景光的辐照度 E_A^1 为

$$E_A^1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_3 \tau_0 Q_\lambda [g^x(\lambda) A_\lambda^{\perp} + g^y(\lambda) A_\lambda^{\parallel}] d\lambda. \quad (20)$$

根据(18),(19)式, 改写 $g^x(\lambda) A_\lambda^{\perp} + g^y(\lambda) A_\lambda^{\parallel}$ 为 $g^x(\lambda) A_\lambda^{\perp} + g^y(\lambda) A_\lambda^{\parallel} = g^+(\lambda) A_\lambda - P_{A,\lambda} g^-(\lambda) A_\lambda$,

$$(21)$$

式中 $g^+(\lambda) = 0.5[g^x(\lambda) + g^y(\lambda)]$, $g^-(\lambda) = 0.5[g^x(\lambda) - g^y(\lambda)]$, 则

$$E_A^1 = \frac{1}{\pi} K_1 K_3 \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) \times [g^+(\lambda) - P_{A,\lambda} g^-(\lambda)] d\lambda. \quad (22)$$

若在 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 在范围内, 则将 $P_{A,\lambda}$ 近似为 P_A , 则

$$E_A^1 = \frac{1}{\pi} K_1 K_3 \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) \times [g^+(\lambda) - P_A g^-(\lambda)] d\lambda. \quad (23)$$

文献[1]假定在对户外远景成像过程中地物直射光成分的偏振度为零, 即 $D_\lambda^{\parallel} = D_\lambda^{\perp} = 0.5D_\lambda$, 则靶面上地物直射光的辐照度 E_D^1 为

$$E_D^1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_3 \tau_0 Q_\lambda [g^x(\lambda) D_\lambda^{\perp} + g^y(\lambda) D_\lambda^{\parallel}] d\lambda. \quad (24)$$

由 $g^+(\lambda) = 0.5[g^x(\lambda) + g^y(\lambda)]$, 可得

$$E_D^1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_3 \tau_0 Q_\lambda g^+(\lambda) D_\lambda d\lambda = \frac{1}{\pi} K_2 K_3 \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda g^+(\lambda) \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda. \quad (25)$$

4) 将 E_A^0, E_A^1, E_D^0 和 E_D^1 , 代入 ARR 的定义式, 得 ARR 的定量计算公式为

$$r_{ARR} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) d\lambda \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda g^+(\lambda) \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) [g^+(\lambda) - P_A g^-(\lambda)] d\lambda \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda}. \quad (26)$$

显然, 采用(9)式作为大气背景光抑制比的定义式, 能够在计算过程中消去参数 K_1, K_2 和 K_3 , 便于定量计算。

4 仿真实验

4.1 仿真结果及分析

本文利用该性能计算模型分析了在大气能见度为 5~20 km 条件下, 太阳夹角、地物类型和大气能见度三因素的变化对 ARR 的影响程度。图 9 是本文仿真中选用 CCD 相机所对应的光谱响应曲线, 其光谱响应范围为 400~830 nm。通常偏振片的光学特性参数用主透射率和消光比表示。鉴于 ARR 计

算公式以平行和垂直于偏振片透振方向上的光谱透射率为输入参数, 图 10 描述测量平行于和垂直于偏

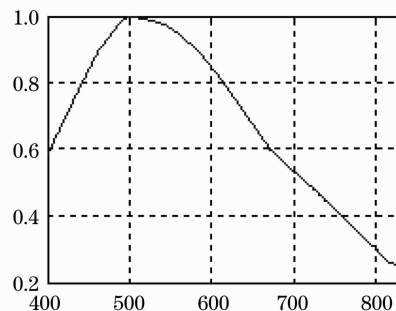


图 9 典型 CCD 相机的光谱响应曲线

Fig. 9 Spectral response curve of typical CCD camera

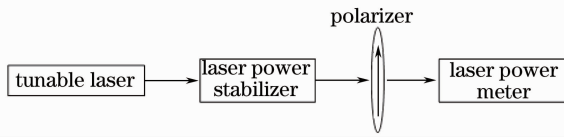


图 10 测量偏振片光谱透射率参数的实验装置

Fig. 10 Equipment for measuring spectral transmittance of a polarizer

振片透射方向上的光谱透射率的过程为

1) 以可调谐激光器作为偏振光源,通过激光功率稳定器产生功率稳定的偏振光源;

2) 置偏振片的透振方向平行于偏振光源的偏振方向,利用激光功率计测量透过偏振片的功率并计算出偏振片在平行于其透振方向上的透射率;

3) 置偏振片的透振方向垂直于偏振光源的偏振方向,利用激光功率计测量透过偏振片的功率并计算出偏振片在垂直于其透振方向上的透射率;

4) 改变可调谐激光器的输出波长,重复以上步骤。

图 11(a),(b)分别是偏振片 1~4 平行于和垂直于其透振方向上的光谱透射率,其中 P1~P4 分别代表偏振片 1~4。

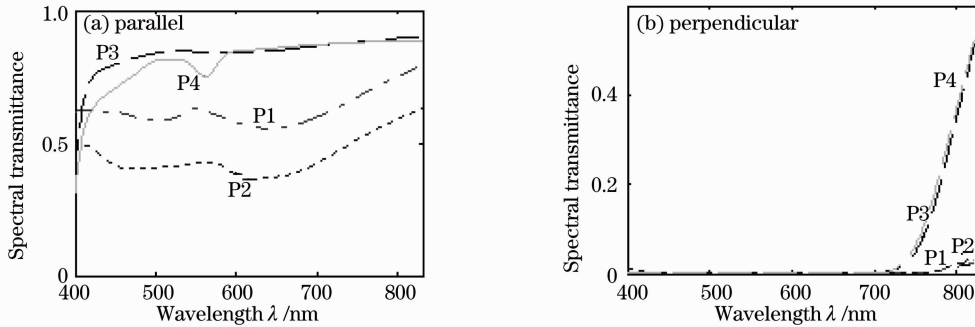


图 11 偏振片 P1~P4 在平行于和垂直于透振方向上的光谱透射率

Fig. 11 Polarizer P1~P4 spectral transmittance in directions respectively parallel and perpendicular to polarizer's transmission axis

表 1~3 均为场景深度均为 5 km,不同地物类型,两种夹角情况下利用本文模型仿真得到的 ARR 值,其大气能见度分别为 20,10 和 5 km。夹角 1 的情况:太阳的天顶角和方位角分别为 $+45^\circ$ 和 0° ,观察方向的天顶角和方位角分别 $+88^\circ$ 和 $+30^\circ$,此时太阳入射光方向与相机光轴方向的夹角为 50.46° 。夹角 2 的情况:太阳的天顶角和方位角分别为 $+45^\circ$ 和 0° ;相机光轴方向的天顶角和方位角分别 $+88^\circ$ 和 $+78^\circ$,此时太阳入射光方向与相机光轴方向的夹角为 80.12° 。

本文利用表 1~3 中的数据,研究了在气象状态^[12]为晴天(大气能见度为 10~20 km)和轻霾(大

气能见度为 4~10 km)条件下,大气能见度、太阳夹角和地物类型三种环境因素的变化对 ARR 的影响程度,其中太阳夹角的变化程度大约为 30° 。记 $r_{ARR}(V, P_{ol}, A_{ng}, B)$ 表示在 V, P_{ol}, A_{ng} 和 B 条件下得到的大气背景光抑制比。 V 可取 $V_i (i = 1, 2, 3)$,其中 V_1, V_2 和 V_3 分别表示大气能见度为 20,10 和 5 km 三种情况; P_{ol} 可取 $P_{ol}^j (j = 1, 2, 3, 4)$,其中 P_{ol}^j 表示采用第 j 个偏振片的情况; A_{ng} 可取 $A_{ng}^k (k = 1, 2)$,其中 A_{ng}^1 和 A_{ng}^2 分别表示夹角 1 和夹角 2 的情况; B 可取 $B_l (l = 1, 2, \dots, 8)$,其中 B_l 表示地物中第 l 种地物的情况。

表 1 大气背景光抑制比的计算结果($V=20$ km)

Table1 Calculation results of ARR under condition of visibility equal to 20 km

Objects	P1		P2		P3		P4	
	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2
Green grass	1.306	1.705	1.392	1.810	1.417	1.851	1.497	1.962
Dry grass	1.217	1.587	1.239	1.611	1.303	1.702	1.369	1.792
Soil	1.217	1.588	1.240	1.613	1.308	1.709	1.378	1.801
Pine wood	1.214	1.583	1.233	1.605	1.302	1.700	1.370	1.795
Concrete	1.206	1.573	1.217	1.583	1.284	1.677	1.345	1.762
Red brick	1.215	1.585	1.236	1.608	1.303	1.701	1.370	1.796
Road	1.204	1.571	1.213	1.578	1.278	1.670	1.335	1.749
Metal aluminum	1.203	1.569	1.212	1.576	1.277	1.668	1.334	1.747

表 2 大气背景光抑制比的计算结果($V=10$ km)

Table2 Calculation results of ARR under condition of visibility equal to 10 km

Objects	P1		P2		P3		P4	
	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2
Green grass	1.269	1.529	1.370	1.649	1.365	1.646	1.433	1.733
Dry grass	1.179	1.419	1.216	1.463	1.252	1.509	1.307	1.580
Soil	1.179	1.420	1.217	1.465	1.254	1.512	1.312	1.586
Pine wood	1.175	1.415	1.210	1.456	1.248	1.504	1.304	1.578
Concrete	1.166	1.404	1.192	1.435	1.232	1.485	1.286	1.552
Red brick	1.176	1.417	1.213	1.460	1.251	1.507	1.307	1.580
Road	1.163	1.402	1.189	1.430	1.228	1.480	1.276	1.543
Metal aluminum	1.162	1.400	1.186	1.427	1.226	1.477	1.275	1.541

表 3 大气背景光抑制比的计算结果($V=5$ km)

Table3 Calculation results of ARR under condition of visibility equal to 5 km

Objects	P1		P2		P3		P4	
	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2	Angle 1	Angle 2
Green grass	1.201	1.301	1.306	1.418	1.284	1.393	1.335	1.453
Dry grass	1.116	1.210	1.164	1.263	1.176	1.277	1.218	1.326
Soil	1.116	1.210	1.164	1.263	1.178	1.279	1.217	1.330
Pine wood	1.112	1.205	1.157	1.255	1.172	1.272	1.214	1.322
Concrete	1.103	1.195	1.139	1.236	1.156	1.255	1.195	1.301
Red brick	1.114	1.208	1.161	1.259	1.174	1.275	1.217	1.325
Road	1.101	1.193	1.135	1.232	1.152	1.250	1.188	1.294
Metal aluminum	1.099	1.192	1.132	1.229	1.150	1.248	1.186	1.292

利用统计原理, E_1, E_2 和 E_3 分别用于评价, 大气能见度、太阳夹角和地物类型的变化对 ARR 的影响程度, 其计算公式为

$$E_1 = \frac{1}{64} \sum_{i=1}^8 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^4 \frac{s[r_{ARR}(V, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B = B_l)]}{\bar{r}_{ARR}(V, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B = B_l)}, \quad (27)$$

$$E_2 = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^3 \frac{s[r_{ARR}(V = V_i, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B = B_l)]}{\bar{r}_{ARR}(V = V_i, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B = B_l)}, \quad (28)$$

$$E_3 = \frac{1}{24} \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^3 \frac{s[r_{ARR}(V = V_i, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B)]}{\bar{r}_{ARR}(V = V_i, P_{ol} = P_{ol}^j, A_{ng} = A_{ng}^k, B)}, \quad (29)$$

式中 s 表示求标准差运算, \bar{r} 表示对 r 求均值运算。

将表 1~3 中的数据代入 (27)~(29) 式得, $E_1=7.53\%$, $E_2=8.89\%$ 和 $E_3=3.55\%$, 由此归纳出下面结论:

1) 在晴天和轻霾天气条件下, 太阳夹角、大气能见度、地物类型三因素的变化对 ARR 的影响依次减弱; 2) 太阳夹角对偏振滤波抑制大气背景光的影响强烈; 3) 偏振滤波对于大多数地物取得相似的大气背景光抑制效果。

4.2 实验结果及分析

4.2.1 实验原理

根据(9)式, ARR 描述为滤波引起相机靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度两者衰减倍

数之比。由(9)式容易推出下面的公式:

$$r_{ARR} = \frac{E_A^0/E_D^0}{E_A^1/E_D^1}, \quad (30)$$

式中 E_A^0/E_D^0 和 E_A^1/E_D^1 分别描述了偏振滤波前与偏振滤波后靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度的比重。(30) 式表明, r_{ARR} 越大, 偏振滤波后两者辐照度的比重 E_A^1/E_D^1 , 较偏振滤波前两者辐照度的比重 E_A^0/E_D^0 下降越严重, 相应地偏振滤波后的图像对比度较偏振滤波前的图像对比度提高越明显。由于 ARR 定义为两比重之比, 因此实验中将两图像对比度指标值^[13]之比 C_1/C_0 作为客观评价指标, 其中 C_0 表示偏振滤波前的图像对比度指标值, C_1 表示偏振滤波后的图像对比度指标值。以下部分将

在不同偏振片和不同环境参数条件下,通过比较分析偏振滤波前后 ARR 及图像对比度指标值^[13]的变化程度来验证本文模型的有效性。

4.2.2 实验 1——不同偏振片的 ARR 验证

本课题组于 2010 年 6 月 5 日 15:50 在沈阳市区,高为 30 m 的楼顶进行了偏振滤波实验。实验中的 CCD 相机光谱响应曲线如图 9 所示,偏振片参数如图 11 所示。大气能见度为 15 km,太阳天顶角和

方位角分别为 $+54.10^\circ$ 和 -89.28° ,相机的光轴方向的天顶角和方位角分别为 $+87.00^\circ$ 和 -10.00° 。此时,相机光轴与太阳的夹角为 79.56° ,偏振片的旋转角度 δ 为 35.97° 。图 12 是偏振滤波前和采用不同偏振片进行偏振滤波后的图像。图 12(a)是偏振滤波前相机的输出图像,图 12(b)~(e)分别是利用偏振片 P1~P4 进行偏振滤波后相机的输出图像,图中高楼距相机约为 3050 m。

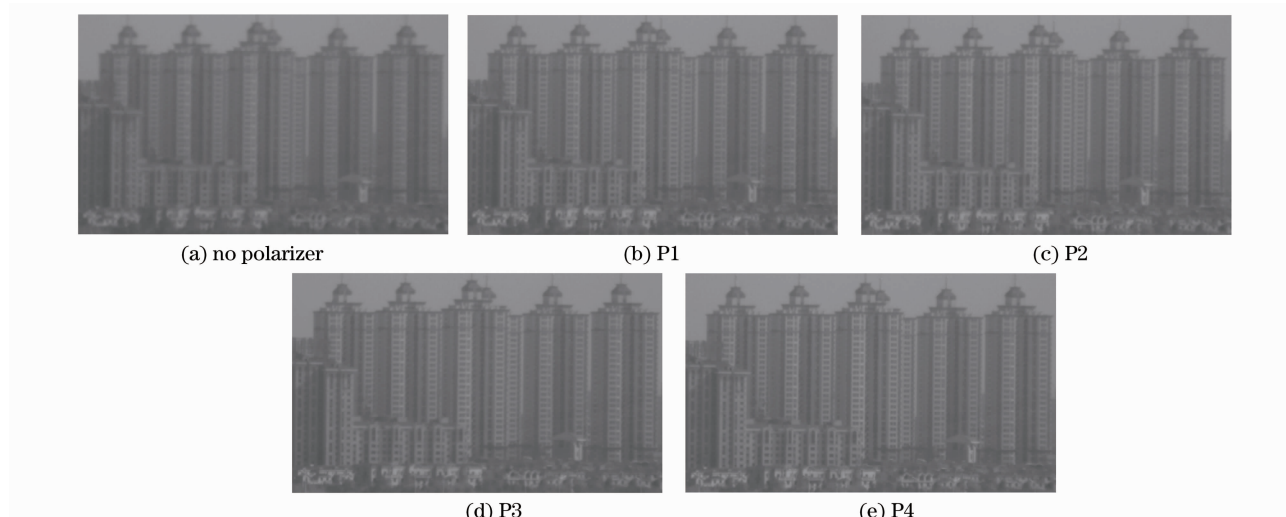


图 12 不同偏振片条件下偏振滤波的图像对比度视觉效果

Fig. 12 Visual effect of image contrast of polarization-filtering adopting different polarizers

由图 12 可知,4 种偏振片的偏振滤波均使得输出图像的对比度较偏振滤波前得到提高,其中偏振片 P3 与 P4 的图像对比度提高明显。为了客观分析 ARR 与图像对比度的关系,在与图 12 对应的表

4 中计算了 ARR 指标值和图像对比度指标值,图 12 和表 4 的实验结果均表明,ARR 取值越大,图像对比度提高越明显 (C_1/C_0 指标值越大)的结论成立,从而验证了本文模型的有效性。

表 4 不同偏振片条件下 ARR 指标值与图像对比度指标值的客观评价

Table4 Objective evaluation of ARR indices and image contrast under different-polarizer conditions

Polarizer choice	Index of ARR	$100XC_0$	$100XC_1$	C_1/C_0
No polarizer	—	0.9388	—	—
P1	1.527	0.9388	1.1749	1.252
P2	1.558	0.9388	1.1813	1.258
P3	1.630	0.9388	1.3147	1.400
P4	1.711	0.9388	1.4013	1.493

4.2.3 实验 2——不同环境参数的 ARR 验证

本课题组于 2010 年 11 月 4 日在沈阳市区,在高为 30 m 的楼顶,对同一场景在不同环境参数条件下进行了三组偏振滤波观测实验。表 5 给出了各

组的具体环境参数,其中各角度单位为 $(^\circ)$,物理含义如图 2 所示。实验中 CCD 相机光谱响应曲线如图 9 所示,偏振片为图 11 中的 P1。

表 5 三组偏振滤波观测实验的环境参数

Table 5 Environmental parameters of three groups of polarization filtering experiments

	Time	θ_s	ϕ_s	θ_v	ϕ_v	γ	δ	V /km
Group 1	9:05	66.16	38.59	89.00	153.00	111.77	26.25	11.00
Group 2	12:00	57.54	- 8.57	89.00	153.00	142.28	64.15	18.00
Group 3	15:50	82.69	- 61.76	89.00	153.00	144.34	- 14.04	16.00

图 13 是在不同环境参数条件下偏振滤波前和偏振滤波后图像。图 13(a),(b)分别是第 1 组观测在偏振滤波前后相机的输出图像,图 13(c),(d)分别是第 2 组观测在偏振滤波前后相机的输出图像,图 13(e),(f)分别是第 3 组观测在偏振滤波前后相机的输出图像,场景距离如图 13(c)所示。从图 13 的视觉效果看出:第 1 组中,偏振滤波后的图像对比

度较偏振滤波前的图像对比度得到明显提高;其它两组提高不明显。为了客观分析 ARR 与图像对比度的关系,在与图 13 对应的表 6 中计算了 ARR 指标值和图像对比度指标值。图 13 和表 6 的实验结果均表明,在不同环境参数条件下,ARR 取值越大,图像对比度提高越明显(C_1/C_0 指标值越大)的结论仍成立,从而验证了本文模型的有效性。

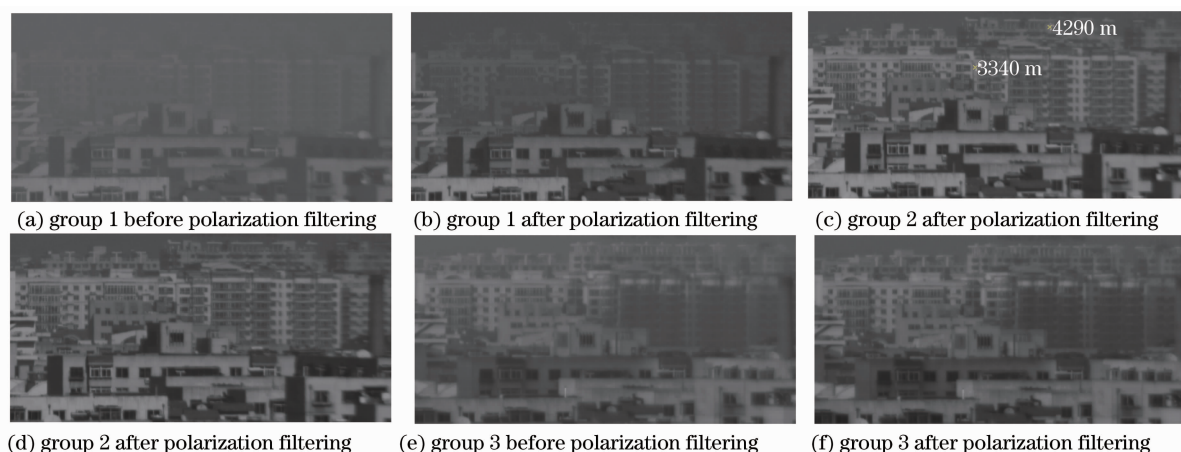


图 13 不同环境参数条件下偏振滤波的图像对比度视觉效果

Fig. 13 Visual effect of image contrast of polarization filtering under condition of different environmental parameters

表 6 不同环境参数条件下 ARR 指标值与图像对比度指标值的客观评价

Table 6 Objective evaluation of ARR indices and image contrast under condition of different environmental parameters

	Index of ARR	$100XC_0$	$100XC_1$	C_1/C_0
Group 1	1.347	0.761	0.839	1.103
Group 2	1.120	1.960	1.993	1.017
Group 3	1.136	1.228	1.286	1.044

5 结 论

本文给出了在不同条件下偏振滤波抑制大气背景光效果的表征量及性能计算模型。仿真实验结果表明在晴天和轻霾天气条件下,太阳夹角、大气能见度和地物类型对 ARR 的影响依次减弱;太阳夹角对偏振滤波抑制大气背景光的影响强烈;偏振滤波对多数地物取得相似的大气背景光抑制效果;ARR 指标值越大,图像对比度提高越明显。基于本文模型,提出偏振滤波成像的性能预测模型值得继续研究。

参 考 文 献

- 1 E. Namer, S. Shwartz, Y. Y. Schechner. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 472~493
- 2 Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan, S. K. Nayar.

- Polarization-based vision through haze [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(3): 511~525
- 3 E. J. McCartney. Optics of the Atmosphere [M]. New York: Wiley publication, 1976
- 4 R. E. Bird, C. Riordan. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres [J]. *J. Appl. Met.*, 1986, **25**(1): 87~97
- 5 A. J. Preetham, P. Shirley, B. Smits. A practical analytic model for daylight [C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1999, 91~100
- 6 A. J. Preetham. Modeling skylight and aerial perspective [C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2003
- 7 A. Wilkie. An analytical model for skylight polarization [C]. Proceedings of the EUROGRAPHICS Symposium on Rendering (EGSR), 2004
- 8 NASA. Aster spectral library. [Http://Speclib.jpl.nasa.gov](http://speclib.jpl.nasa.gov), 2008
- 9 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003
- 叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 999~1003
- 10 Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067~1072
- 张晶晶, 方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1067~1072
- 11 R. M. Matchko, G. R. Gerhart. Polarization azimuth angle in daylight scenes [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(2): 1~9
- 12 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003. 448~449
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2003. 448~449
- 13 W. S. Jagger, W. R. Muntz. Aquatic vision and the modulation transfer properties of unlighted and diffusely lighted natural waters [J]. *Vision Research*, 1993, **33**(13): 1755~1763