

大气中目标背景对比度及其影响因素的数值分析*

王 毅, 范 伟, 饶瑞中

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学研究室,安徽 合肥 230031)

摘 要: 从辐射传输理论出发,利用离散纵标法软件包(DISORT),计算了典型大气条件下 0.55 μm 波长的目标背景对比度,分析了观察者的天顶角和方位角、水平能见度、垂直高度、太阳的天顶角和方位角以及气溶胶单次散射反照率对目标背景对比度的影响。结果表明:目标背景对比度随着观察者天顶角余弦的增加而增加;随着太阳天顶角余弦的增加而减小;随着观察者和太阳方位角差的增加而增加;随着高度的增加而减小;随着水平能见度的增加而增加;随着单次散射反照率的增加而减小。

关键词: 目标背景对比度; 辐射传输; 离散纵标法; 目标识别

中图分类号: O432 **文献标识码:** A

观察一定距离以外的目标物是否清晰,是否能够把目标物从大气背景中分辨出来,是研究目标背景对比度的目的。目标背景对比度是目标可识别的判定标准之一,可根据大气辐射传输方程求解。此前我们根据 μ -Eddington 近似对目标背景对比度和斜程能见度进行了较详细的解析分析,得出了一些初步的定性结论^[1]。但是由于 μ -Eddington 近似中亮度分布的简化性,不能完全真实地描述实际情况。要获得较准确的结果,必须利用较准确的方法求解辐射传输方程。本文根据现在国内外广泛应用的准确度较高的离散纵标法(discrete ordinate method,DOM)软件包(DISORT),计算了 0.55 μm 波长上的目标背景对比度,分析了多种因素对目标背景对比度的影响。

1 目标背景对比度和辐射传输算法

人们总是依据视野各部分之间的亮度或颜色的差异,从环境中识别目标物。根据 Purkinje 效应可知,对视觉来说,在观察物体时,起决定作用的是物体和背景的亮度差异,所以目标识别与探测的理论一般都是基于目标与背景的亮度对比展开的。目标背景对比度与目标物的形态、发光或反射特性、大气传输特性和人眼或仪器的接收特性等因素密切相关。

目标背景对比度定义为^[2]

$$C_{ob} = \frac{I_o - I_b}{I_b} \quad (1)$$

式中: I_o 是被观测的目标物的亮度; I_b 是目标物背景亮度; C_{ob} 为目标背景对比度。如果 I_o 为被观测的目标物的固有亮度, I_b 为目标物所在处的背景亮度,则 C_{ob} 为目标背景的固有对比度,用 C_0 表示。

目标物所发出的光和背景光(反射天空散射光、太阳光,人工光源发出的光或自身发光)传输到观察者的过程中经历了大气的消光作用(包括散射和吸收),以及受到太阳光、地面反射光、多次散射形成的天空散射光的影响,观察者实际接收到的目标物和背景的亮度均为视亮度,要由辐射传输方程求解得到。

假定观察者向上观察,如图 1 所示, $-\mu$ ($\mu = \cos \theta$) 方向为向上传输, $+\mu$ 方向为向下传输。大气层顶处的光学厚度 $\tau = 0$,目标所在处 $\tau = \tau_t$,地面处 $\tau = \tau_0$ 。观察者的天顶角为 θ ,太阳天顶角为 θ_0 。观察者的方位角为 ϕ ,太

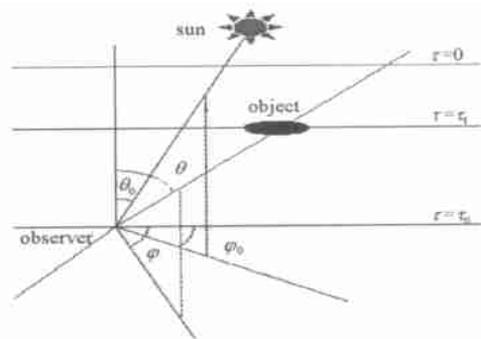


Fig. 1 Geometry of radiative transfer

图 1 辐射传输几何关系

* 收稿日期:2003-12-18; 修订日期:2004-03-09

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:王 毅(1975—),女,博士研究生,从事大气光学研究;合肥市 1125 信箱;E-mail: ywang@aiofm.ac.cn.

阳方位角为 θ_0 。

辐射传输方程的一般形式为^[2,3]

$$\mu \frac{dI}{d} = I - J \tag{2}$$

式中： I 是辐射亮度； J 是源函数。实际接收到的目标视亮度 I_0^* 和背景视亮度 I_b^* 由(2)式可得^[3]

$$I_0^* = I_0 e^{-\mu} + J e^{-(\cdot)/\mu} d \tag{3}$$

$$I_b^* = I_b(\cdot) e^{-\mu} + J e^{-(\cdot)/\mu} d = I_b(\theta_0) \tag{4}$$

式中： $\cdot = \theta_0 - \theta$ ； I_0 为目标固有亮度； $I_b(\cdot)$ 为目标处向下的背景亮度； $I_0 e^{-\mu}$ 和 $I_b(\theta_0) e^{-\mu}$ 代表固有亮度透过大气时的衰减； $J e^{-(\cdot)/\mu} d$ 代表观察路径上气柱本身的发光,包括大气对太阳光的多次散射。将(3),(4)式代入(1)式可得

$$C_{ob} = \left| \frac{I_0^* - I_b^*}{I_b^*} \right| = \left| \frac{I_0 - I_b(\cdot)}{I_b(\theta_0)} \right| e^{-\mu} = \left| \frac{I_0 - I_b(\cdot)}{I_b(\cdot)} \right| \left| \frac{I_b(\cdot)}{I_b(\theta_0)} \right| e^{-\mu} \tag{5}$$

根据(1)式,则 $\left| \frac{I_0 - I_b(\cdot)}{I_b(\cdot)} \right|$ 为目标背景固有对比度,用 C_0 表示,则(5)式简化为

$$C_{ob} = C_0 \left| \frac{I_b(\cdot)}{I_b(\theta_0)} \right| e^{-\mu} \tag{6}$$

如果目标亮度为 0($I_0 = 0$),则 $C_0 = 1$, (6)式简化为

$$C_{ob} = \left| \frac{I_b(\cdot)}{I_b(\theta_0)} \right| e^{-\mu} \tag{7}$$

由(7)式可以看出,目标背景对比度只与目标处测得的背景辐射亮度和观察者所看到的背景亮度以及观察路径的透过率有关。

我们在计算目标及背景辐射亮度时采用了 DOM 法。DOM 最早是由 Chandrasekhar 提出的^[4],经过 Stamnes 等人发展^[5,6],目前已成为求解辐射传输方程稳定、精确的数值算法。本文用 DOM 计算了多种情况下的目标背景对比度,并与采用 Edington 近似所得的计算结果进行比较,修正了以前得到的结论。

2 目标背景对比度的 DOM 法计算及分析

在本文的计算分析中,选取 LOWTRAN 标准大气模式中的模型,整层光学厚度及消光系数取 $0.55\mu\text{m}$ 波长(包括瑞利散射和气溶胶消光系数等在内)下的取值^[7],气溶胶散射相函数采用 Haze-L 分布式,分别讨论了影响目标背景对比度的因素。

2.1 高度的影响

C_{ob} 随高度 h 变化而变化,如图 2 所示。图形的横坐标为观察者的天顶角余弦,纵坐标为观察者方位角与太阳方位角的差值。具体计算情况为:水平能见度 $V = 2\text{km}$,太阳的天顶角余弦 $\mu_0 = 0.5$,单次散射反照率 $\omega = 0.9$,相函数的不对称因子 $g = 0.85$ 。在计算中考虑地面的影响,地面反照率 $R_{albedo} = 0.08$ ($0.55\mu\text{m}$ 波长的草地背景),不考虑地面和视线路径的热发射,也排除太阳以外任何发射源的影响,以观察者和太阳的方位角相同处作为方位坐标的 0 值,以观察者位置为坐标原点。

当高度 $h = 1\text{km}$ 时,由图 2(a) 分析可知,当观察者与太阳方位角差 $|\theta - \theta_0|$ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时, C_{ob} 值随着 $|\theta - \theta_0|$ 的增加而增加,即随着观察者和太阳的方位角差的增加,目标越易辨别。当 $|\theta - \theta_0| = 90^\circ$ 时, C_{ob} 值达到最大。说明在光学厚度较小的薄雾天气下, C_{ob} 强烈地依赖于观察者和太阳的方位角差,并且当观察方向与太阳的方位角相差 90° 时, C_{ob} 受太阳的影响最小。在实际情况下,当太阳与观察者的方位越接近时,进入观察方向的太阳光增加,观察方向的背景辐射亮度增强,也即识别目标的干扰增强,因而 C_{ob} 降低。

随着观察者天顶角余弦 μ 的增加, C_{ob} 值增加。当 $\mu = 1.0$ (或 $\theta = 0^\circ$) 时, C_{ob} 值达到最大,说明在垂直方向比水平方向易于分辨目标。而当 $\mu = 0.0$ (或 $\theta = 90^\circ$) 时, C_{ob} 值最小,说明观察方向越接近水平方向越不容易分辨目标。

由图 2 可知,随着高度的增加, C_{ob} 值减小,不可识别的 $|\theta - \theta_0|$ 和 μ 的范围越大。并且在每张图中可以看

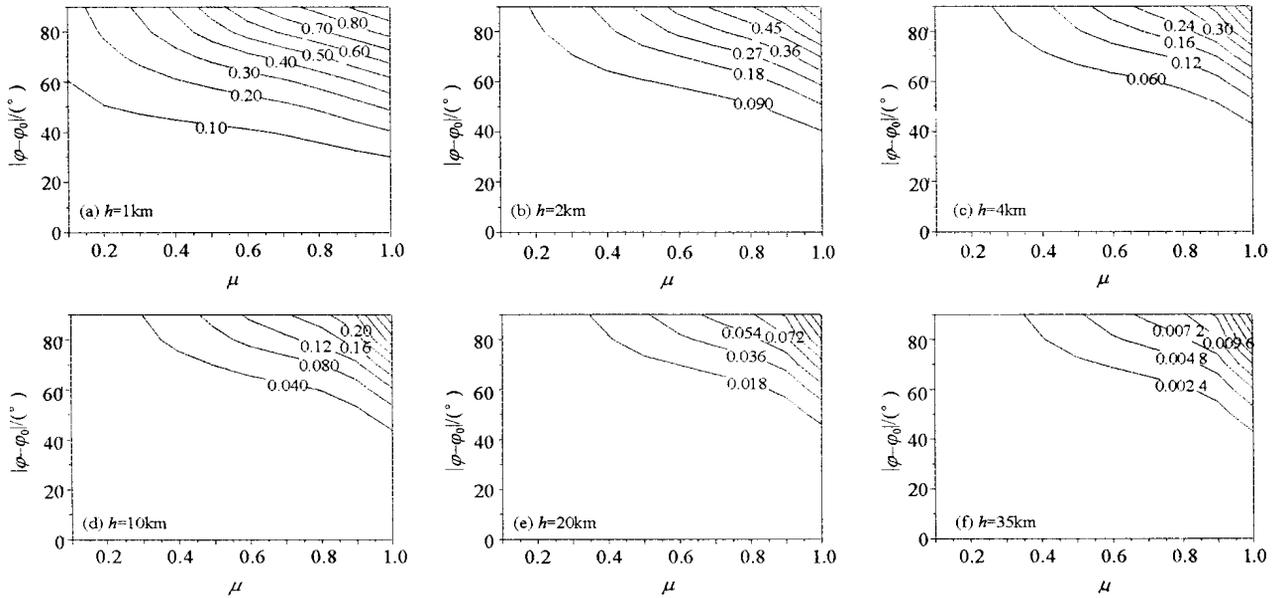


Fig. 2 Relation between C_{ob} and h

图 2 目标背景对比度 C_{ob} 随高度 h 的变化关系

出, C_{ob} 值等值线间的分布区域逐渐变窄, 向着观察者的天顶角余弦值较大的区域靠拢, 也即向垂直观察方向靠拢, 这也说明了在垂直方向比在水平方向更容易识别目标。

2.2 水平能见度的影响

本文也计算了随着水平能见度 V 从 2~13km 变化, 相应目标背景对比度的变化, 如图 3 所示, 计算中各参数的取值为: $h = 2\text{km}$, $\mu_0 = 0.5$, $\tau = 0.9$, $g = 0.85$, $R_{albedo} = 0.08$ 。水平能见度 V 的计算公式为

$$V = 3.912 / \tau_{ext} \tag{8}$$

由(8)式可以看出: V 与大气消光系数 τ_{ext} 成反比关系。所以目标背景对比度随水平能见度的变化关系, 也是目标背景对比度随着大气消光系数的变化关系。由图 3 可知, 随着 V 的增加, C_{ob} 值增大, 所以对于可见光波段的暗目标, 更容易被识别出来。

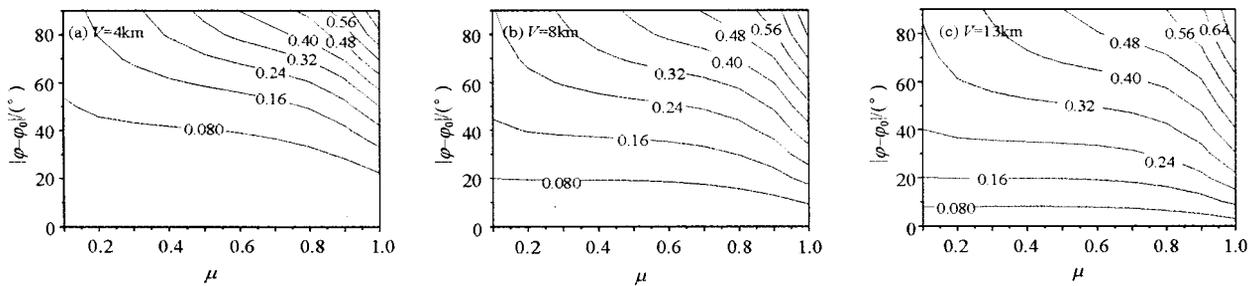


Fig. 3 Relation between C_{ob} and V

图 3 目标背景对比度 C_{ob} 随水平能见度 V 的变化关系

2.3 太阳天顶角的影响

目标背景对比度还与太阳天顶角有关。图 4 反映出 C_{ob} 随着太阳天顶角余弦 μ_0 的变化关系。计算参数为: $h = 2\text{km}$, $V = 2\text{km}$, $\tau = 0.9$, $g = 0.85$, $R_{albedo} = 0.08$ 。在计算中考虑太阳天顶角余弦变化范围为 0.1~1.0。

由图 4 可以看出, 随着 μ_0 的增加(θ_0 的减小), C_{ob} 值减小。当 μ_0 值较小时, C_{ob} 值较大的等值线间的区域集中在观察者与太阳方位垂直的方向; 当 μ_0 趋近于 1.0 时, C_{ob} 值分布情况受观察者和太阳的方位角差 $|\theta - \theta_0|$ 的影响变小, 这是因为此时太阳相对于观察者为垂直入射, 太阳对观察者各方位的影响趋于均匀。当太阳接近于垂直入射时对观察者识别目标造成的影响最大, 目标背景对比度最小。当 μ_0 逐渐增大时, C_{ob} 的等值线逐渐趋于与观察者的天顶角余弦变化的方向平行。特别是当太阳天顶角余弦接近 1 时, C_{ob} 的等值线分布趋于与观察者天顶角无关。因此, 太阳的天顶角对目标背景对比度影响很大, 不仅影响目标背景对比度的大小, 而

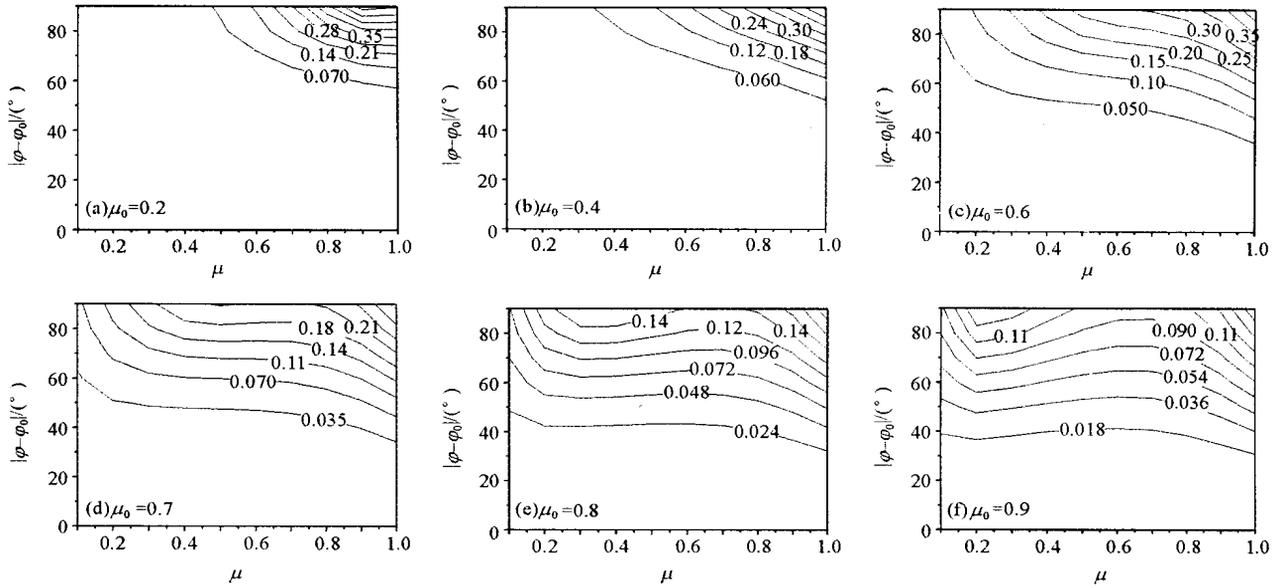


Fig. 4 Relation between C_{ob} and μ_0

图 4 目标背景对比度 C_{ob} 与太阳天顶角余弦 μ_0 的关系

且影响目标背景对比度的分布情况。

同时也必须看到,在 $\mu_0 = 0.7$ 时, C_{ob} 值仍然是随着观察者天顶角余弦的增加而增加的,这与前面的结论一致。而当 μ_0 继续增加时, C_{ob} 值受太阳的影响较为强烈,曲线发生变化。这是因为当太阳垂直入射时,太阳对观察者各方位的影响趋于相同,在视线路径内的太阳光强烈地影响着人眼对目标的识别。

2.4 单次散射反照率的影响

C_{ob} 也随着单次散射反照率 ω 的变化而变化。为单次散射过程中光束遭受散射的百分数,也即为散射占总消光的比例。当 $\omega = 1.0$ 时,表示没有辐射能量的损失,是一种不考虑吸收损耗的理想情况。另外当 ω 很小时,表示散射与吸收相比可忽略。我们取 ω 变化范围为 $0.1 \sim 1.0$,计算了 C_{ob} 与 ω 的关系。

具体计算参数为: $h = 2\text{km}$, $V = 2\text{km}$, $\mu_0 = 0.5$, $g = 0.85$, $R_{albedo} = 0.08$ 。目标背景对比度随单次散射反照率的变化如图 5 所示。

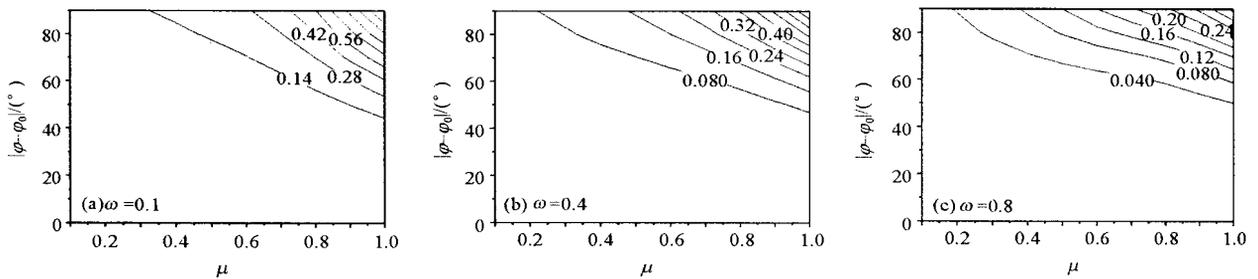


Fig. 5 Relation between C_{ob} and ω

图 5 目标背景对比度 C_{ob} 与单次散射反照率 ω 的关系

由图 5 可以看出,随着 ω 的增加, C_{ob} 值减小。但是从 C_{ob} 值总的变化趋势来看, ω 只对 C_{ob} 值的大小有影响,并不改变其随 μ 和 $|\phi - \phi_0|$ 的变化的分布。这是因为当 ω 值较大时,表示散射在消光中占主导地位,增加了观察路径上的背景辐照亮度,从而增加了识别目标的困难。

3 结 论

利用 DOM 方法计算分析可知:在 $0.55\mu\text{m}$ 波长下,目标背景对比度 C_{ob} 受到观察者的天顶角 θ 、方位角 ϕ , 太阳的天顶角 θ_0 、方位角 ϕ_0 , 水平能见度 V , 高度 h , 以及单次散射反照率 ω 等因素的影响。

随着太阳天顶角余弦 μ_0 的增加(太阳天顶角 θ_0 的减小), C_{ob} 值减小。当 μ_0 值较大或趋于 1 时, C_{ob} 值随着观察者天顶角余弦 μ 的增加而缓慢增加;当 μ_0 值较小时, C_{ob} 值随着 μ 的增加(θ 的减小)而增加。说明在

垂直方向比水平方向易于识别目标,而越接近水平方向,越不容易识别目标。观察者与太阳的方位角差 $|\theta - \theta_0|$ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,随着 $|\theta - \theta_0|$ 的增加, C_{ob} 值增加;在 $|\theta - \theta_0| = 90^\circ$ 时, C_{ob} 值达到最大。随着高度 h 的增加, C_{ob} 减小。随着水平能见度 V 的增加, C_{ob} 值增加。随着单次散射反照率 ω_0 的增加, C_{ob} 值减小。

我们在前期工作中采用 Eddington 近似计算,没有考虑随着观察者方位角和太阳方位角的变化引起空间目标识别变化的情况。本文分析了方位因素对目标识别的影响,对以前的工作进行了补充,使得我们此前的理论研究在精度上得到了提高。但是本文的结论也是在做了一系列假设的情况下得出的,例如忽略了目标本身发光及反射和吸收特性对目标识别的影响;忽略了其它可能光源的影响;忽略了大气中云的影响等等。因而对目标背景对比度的研究仍然需要进一步的理论探索。

参考文献:

- [1] 王毅, 饶瑞中. 空间斜程能见度的影响因素分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 945—950. (Wang Y, Rao R Z. Slant visibility: multi-factors analysis. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(10): 945—950)
- [2] 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1993. (Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. *Advanced Atmospheric Physics*. Beijing: China Meteorological Press, 1993)
- [3] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. Academic Press, 1980.
- [4] Chandrasekhar S. Radiative transfer[M]. New York: Dover, 1960.
- [5] Stamens K, Tsay S C, Wiscombe W, et al. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Appl Opt*, 1988, 27(12): 2402—2509.
- [6] Stamens K, Tsay S C, Wiscombe W, et al. A general-purpose numerically stable computer code for discrete-ordinate-method radiative transfer in scattering and emitting layered media[R]. DISORT Report, 2000.
- [7] Louis E. Vertical-attenuation mode with eight surface meteorological range 2 to 13 kilometers[R]. Environment Research Papers, 1970.

Analysis on the object-background contrast by numerical radiative transfer computation

WANG Yi, FAN Wei, RAO Rui-zhong

(Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: In this paper, a software-package, DISORT (discrete ordinate method), is used to compute the object-background contrast at $0.55\mu\text{m}$ wavelength under the standard atmosphere. It is also analyzed that object background contrast is affected by many factors, including the horizontal visibility, altitude, the visual zenith angle, and solar zenith angle, azimuthal angles difference between the observer and the sun, and the aerosol single scattering albedo. As the result, the contrast increases with the increase of the observer zenith angle, with the decrease of the solar zenith angle, with the increase of the azimuthal angles difference, with the decrease of the altitude, and with the decrease of the single scattering albedo.

Key words: Object-background contrast; Radiative transfer; Discrete-ordinate-method (DOM); Object identification