

## 云的光学特性对目标-背景对比度的影响分析

王毅, 范伟, 陈秀红, 徐青山, 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:** 目标-背景对比度是基于大气辐射传输理论的空间目标识别的重要参量之一。云覆盖了 50% 的地球表面, 对电磁波和光波的传输有重要的影响, 因而其类型、在视线路径上出现的概率均会对目标识别产生重要影响。所以要保证目标识别的精度, 必须考虑云的作用。从辐射传输理论出发, 采用平面平行云的假定和 Lund 的无云视线概率模型, 对有云天气条件下的目标背景对比度进行了详细的分析。

**关键词:** 目标-背景对比度; 辐射传输; 无云视线概率; 目标识别

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)03-0281-06

## Effect of cloud on the target-background contrast

WANG Yi, FAN Wei, CHEN Xiu-hong, XU Qing-shan, RAO Rui-zhong

(Laboratory for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Target-background contrast is one of the important parameters for identification of target in space. Since cloud covers about 50% the ground surface and has important influence to the radiation transfer, it is necessary to taking into account the influence of cloud in the computing process of the target-background contrast. In the paper, the effect of the optical properties of cloud on the target-background contrast is analyzed based on the plane parallel assumption and the probability of cloud free light of sight (PCFLOS).

**Key words:** Target-background contrast; Radiation transfer; PCFLOS; Target identification

### 0 引言

目标-背景对比度是目标可识别的判定标准之一, 在空间目标识别领域内有广泛的应用。此前根据辐射传输理论对大气中的暗目标 (亮度为 0 的目标) 已进行了较为详细的研究, 分析了具体大气条件、地表特征和方位因素等对目标-背景对比度的影响<sup>[1-4)]</sup>。

但是所有的分析结论均是在无云条件下得到的, 无云的条件使得理论计算得到简化, 便于找出大气条件、地表特征及方位等因素对目标识别的影响。但是实际天气状况下, 云覆盖 50% 左右的地球表面, 无云天气只占很小的比例, 云的类型、光学性质、在视线路径上出现的概率均会对目标的识别产生影响。因而要更准确地评估人眼或仪器系统对目标识别的能力, 就必须

收稿日期: 2004-07-19; 修订日期: 2004-08-20

作者简介: 王毅 (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 主要从事遥感方面的研究。

详细考虑这些特征。本文从辐射传输理论出发,详细计算描述了云的光学特性等因素对目标识别的影响。

### 1 计算原理

#### 1.1 目标背景对比度

经辐射传输方程的推导结果可知<sup>[1-3]</sup>,目标-背景对比度只与目标处测得的背景辐射亮度和观测者看到的目标亮度的比值  $L$  及观察路径的透过率  $T$  有关:

$$C=LT \tag{1}$$

式中  $C$  为目标背景对比度。计算过程的各参数之间的关系如图 1 所示。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  $\theta$ ,太阳的天顶角为  $\theta_0$ 。观察者的方位角为  $\varphi$ ,太阳的方位角为  $\varphi_0$ 。

#### 1.2 云分类及物理性质

Borovikov 和 Sassen 等人把云层分为四类<sup>[5]</sup>:低层云、中层云、高层云及垂直发展的云(以底层为中层底部,顶层为高层顶部),如表 1 所示。对于每一类云的划分并没有通用的标准,通常,2 km 以下为低层云,

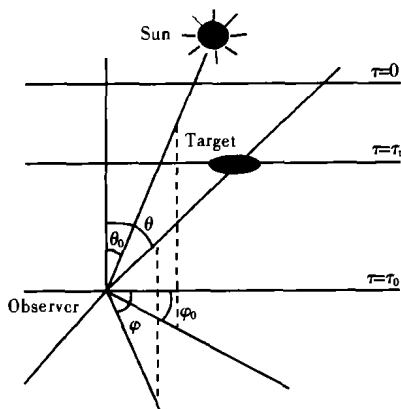


图 1 辐射传输几何  
Fig.1 Geometry of radiation transfer

2~6 km 为中层云,6 km 以上为高层云。低层和中层云由类似于雾的小水滴组成,具有与雾类似的散射特性。高层云主要由冰晶粒组成。

云的存在通过两种方式对目标识别产生影响,一是由于散射消光和较小程度的吸收限制了能量的传输,第二是无云视线时间(LOS)的限制。事实表明,由于消光造成的影响,整体削弱了目标和背景的亮度。

而无云视线的影响则可以通过 Lund 的无云概率模型进行统计分析。

表 1 典型云状的光学与物理性质

Tab.1 Physical and optical characteristics of typical cloud

Family	Cloud form	Base altitude/km	Thickness /km	Horizontal extent/km
High level (>6 km)	Cirrus	6.0~10.0	0.2~3.0	102~103
	Cirro-cumulus	6.0~9.0	0.2~1.0	10~102
	Cirro-stratus	5.0~9.0	0.5~5.0	102~103
Mid-level (2~6 km)	Alto-cumulus	2.0~6.0	0.1~0.8	10~102
	Alto-stratus	3.0~6.0	0.5~3.0	102~103
Lower level (<2 km)	Strato-cumulus	0.4~2.0	0.1~1.0	10~103
	Stratus	0.1~0.7	0.1~1.0	10~103
	Nimbo-stratus	0.1~1.0	1.0~10.0	102~103
Vertically developed (base>2 km top<11 km)	Fair WX cumulus	0.8~2.0	0.3~5.0	1.0~10.0
	Cumulo-nimbus	0.4~1.5	0.5~12.0	5.0~50.0
Family	Typical droplet density no/cm <sup>3</sup>	Average droplet radius/ $\mu$ m	Typical extinction coefficient/ $m^{-1}$ at 1 $\mu$ m	Typical back-scatter coeff- iont/ $m^{-1}$ ster <sup>-1</sup> at 1 $\mu$ m
High level (>6 km)	Ice crystals	Ice crystals	1.0E-4	1.0E-6
	Ice crystals	Ice crystals	2.0E-4	2.0E-6
	Ice crystals	Ice crystals	2.0E-4	2.0E-6
Mid-level (2~6 km)	450	5~7	1.7E-2	1.5E-3
	450	5~7	1.1E-1	5.0E-3
Lower level (<2 km)	350	5~7	4.7E-2	2.1E-3
	300	2~5	1.0E-1	4.6E-3
	330	7~8	1.3E-1	6.5E-3
Vertically developed (base>2 km top<11 km)	300	6~11	2.2E-2	1.0E-3
	70	1~103	4.4E-2	2.2E-3

在云辐射计算中,对于第一种情况通常采用平面平行云的假定,可使问题大为简化。在实际的天气系统下,往往有两层以上的云出现,此时就要考虑云层的重叠。一般处理云层重叠的方法有随机重叠、极大重叠和极小重叠。根据 D.A.Nahstedt 等人<sup>[6]</sup>对薄卷云

和亚可见卷云层数出现频率的统计分析可知,云层的数目越多,其出现的几率越小,因此在计算中只考虑一层的情况。

第二种情况是针对有限云和碎云而言,平行平面假定不再适用,是一个非常复杂的过程<sup>[7-10]</sup>。由于云在短时间内变化非常大,一般来说,每日的变化可忽略不计。在众多学者所作的激光雷达测量实验中得出,在1 min之内,云高可改变1000 m,散射比可改变40%。因此在这种情况下,对于目标探测来说,考虑有限云和碎云的统计规律才是有意义的。因此用Lund的无云视线概率模型,考虑不同视线路径上可探测到目标的概率。

这就要涉及到云量的概念。云量定义为向上或向下垂直观察时,有云天空所占的百分比。它表示出云垂直投影到地面所遮盖区域所占的百分比,或云遮蔽天空视野所占的比例。云量的值从0~1变化(全天无云总云量为0;天空完全为云所遮蔽为1。也有取0~10的变化范围)。云量对于地气系统的辐射收支及电磁波的传输均有直接的影响。

云所覆盖部分对地面的投影随着天顶角的增加而增加,或者表述为随着仰角的增加而减小。这是因为云的垂直投影小于其斜投影所占的面积。因此将随天顶角变化的云量称之为视云量,用 $S$ 表示。云量 $Cov$ 与 $S$ 的关系为 $Cov \leq S$ ,在天顶方向 $Cov=S$ 。无云视线概率 $P_{CLOS}$ 定义为 $S$ 的补数,即 $P_{CLOS}=1-S$ 。

$$A_{total}=A_{cloud}+A_{clear} \quad (2)$$

$$P_{CLOS}=A_{clear}/A_{total}=1-A_{cloud}/A_{total} \quad (3)$$

式中 $A_{total}$ 为总的投影面积; $A_{cloud}$ 为云投影所占面积; $A_{clear}$ 为未被云所遮挡的投影面积。Lund模型的 $P_{CLOS}$ 矢量<sup>[8]</sup>表示为:

$$P_{\alpha} = {}_{\alpha}C_{SS} K_1 \quad (4)$$

式中 ${}_{\alpha}P_{\alpha} = P_{CLOS}$ ,为矩阵形式,其行对应于云量,列对应于不同的仰角 $\alpha$ ; ${}_{\alpha}C_{SS}$ 为 $P_{CLOS}$ 的给定仰角及视云量的 $C$ 矩阵,其行对应仰角,列对应云量; ${}_{SS}K_1$ 为云量对应的概率列矢量。

## 2 平行平面云假设计算分析

首先采用云的平行平面假设,利用MODTRAN

进行了目标背景对比度的计算分析。MODTRAN模式提供了五种云模式及五种不同的降雨率可供选择,另外对于近地层常出现的雾霾,MODTRAN提供了一种垂直结构算法(VSA)可对其进行处理。

分别计算这几种云模式下目标背景对比度的变化。具体计算情况为:取标准大气模式、乡村气溶胶模式,能见度 $V=23$  km,观察者天顶角 $\theta=30^\circ$ ,太阳天顶角 $\theta_0=60^\circ$ ,观察者与太阳方位角差 $|\varphi-\varphi_0|=90^\circ$ ,计算波段范围为 $0.4\sim 4 \mu\text{m}$ ,目标物高度 $h=100$  m。对上述几种云模式,目标物高度超过其云顶高度则均不可见,而目标物高度低于云顶高度则有可能被观测到,计算结果如图2~图7所示。从图中可看出,尽管云顶或云底高度、云厚等参数选取不同,但是对于这几种云模式,目标物高度为100 m时的对比度谱分布曲线比较相似。图6中雨层云的目标背景对比度随波长变化平缓,没出现与图2~图4中的众多吸收峰。图7所示的雨层云且有降雨的情况下,对比度曲线在接近红外的部分相对较大。

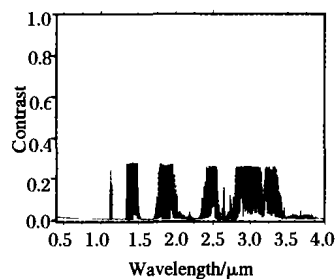


图2 在有积云时的对比度

Fig.2 Contrast with cumulus clouds

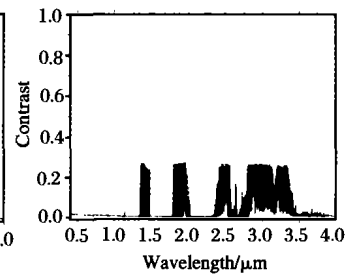


图3 在有层云/层积云时的对比度

Fig.3 Contrast with stratus-cumulus clouds

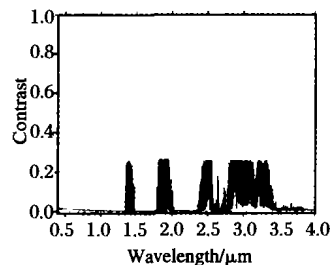


图4 在有层云时的对比度

Fig.4 Contrast with stratus clouds

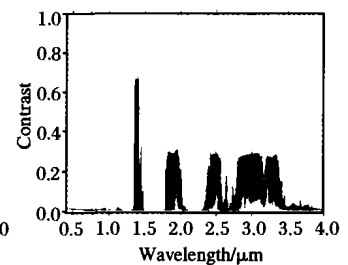


图5 在有高层云时的对比度

Fig.5 Contrast with altostratus-cumulus clouds

由目标物高度为100 m时的对比度曲线可见,对于低云和部分中云(云底高度为2.4 km的高层云),

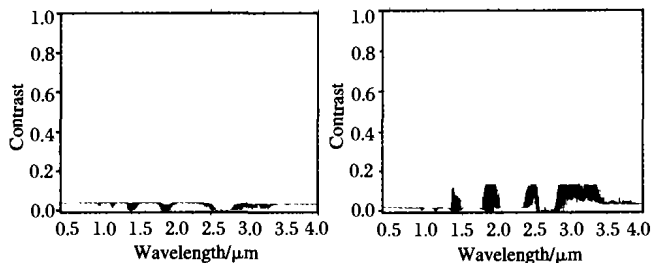


图6 在有雨层云时的对比度

图7 有层云降雨率为2.0

mm/h时的对比度

Fig.6 Contrast with nimbostratus clouds

Fig.7 Contrast at 2.0 mm/h rain with stratocumulus clouds

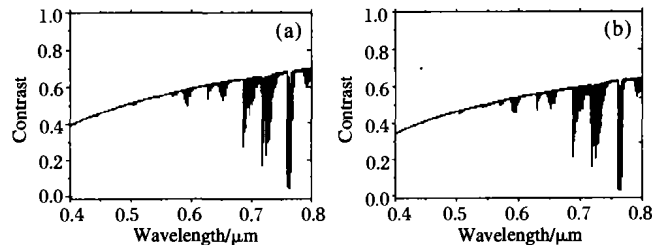


图8 在有卷云情况下的对比度(NOAA卷云廓线)

Fig.8 Contrast with cirrus (NOAA cirrus profiles)

由于云层较厚,阻挡了视线路径上的光传输,并且由于云自身的红外辐射而影响了天空背景亮度,从而造成了识别目标的困难。由于云层的存在,削弱了太阳的影响,而视线路径上的多次散射占主导作用,此时方位因素对目标识别的影响可忽略。按照国际民航组织建议采取的对比阈值0.05,则在这些云型的影响下,可见光波段的暗目标均无法识别。而对于接近云底高度的目标而言,云本身的红外辐射作用不可忽视,因而导致对比度的红外谱特征加强。

在考虑卷云时,必须选取云厚、云底(或云顶)高度及消光系数。一般消光系数的缺省值为0.14。在MODTRAN给定的三种云模式中,如果采用NOAA卷云廓线,则消光系数适用于整个波长范围;如果采用标准卷云模式或亚可视卷云模式,则消光系数仅仅是0.55 μm处的值。因为薄卷云(光学厚度在0.03~0.3之间)和亚可视卷云(光学厚度小于0.03)在可见光波段是透明的,但是在红外却是不透明的,因此只计算可见光波段上目标背景对比度的变化。

首先采用NOAA卷云廓线计算了云厚为1 km、云底高度为7 km的薄卷云对目标背景对比度的影响。由图8所示的关系可见,目标物高度为5 km(a)比高度为10 km(b)时的对比度明显降低,而且目标物高度取10 km比取5 km时的对比度变化平缓。在其他条件不变的情况下,采用标准卷云廓线和亚可视卷云廓线的计算结果与采用NOAA卷云廓线计算的结果是一致的。

### 3 无云视线概率模型计算分析

对于有限云和碎云,平行平面的假定不再适用,

采用Lund的无云视线概率进行目标背景对比度的统计处理,可避免复杂的计算过程。Lund的 $P_{\text{CHLOS}}$ 模型简单而准确,是目前应用最广泛的模型之一。在很多工作中已经验证了该模型的准确度,其典型误差为5%,并且与仰角有关。

每个月每个地点的 $k$ 矢量可从ISMCS(International Station Meteorological Climate Summary)中得到。 $C$ 矩阵是云类型的函数,其矩阵元可从CFLOS的相对频率得出。相对频率是基于全天空成像、可见天空覆盖率的观察、观测天空覆盖率和太阳辐射、卫星观测及飞机观测得到的。

根据D.A.Nahrstedt给出的North Korea的Wonsan和Oman的Al Khasal两个地理上完全不同的地区的 $k$ 矢量得到Wonsan的 $P_{\text{CHLOS}}$ 如图9所示,其中天顶角为20°、40°、60°和80°的 $P_{\text{CHLOS}}$ 如图9(a)所示,天顶角为10°、30°、50°和70°的 $P_{\text{CHLOS}}$ 如图9(b)所示。Al Khasal的 $P_{\text{CHLOS}}$ 如图10所示。

由图中所示结果可知,Wonsan的 $P_{\text{CHLOS}}$ 在10~5月较高,而在4~9月较低;而Al Khasal的 $P_{\text{CHLOS}}$ 在5~11月较高,而在12~4月较低。在秋冬两季,这两个地区的 $P_{\text{CHLOS}}$ 是可比较的,而在春夏季中东地区的 $P_{\text{CHLOS}}$ 持续升高,在西太平洋地区却相反。这是因为Wonsan有炎热潮湿的夏季,在下午经常有较低云层,而在冬季趋于冷晴天气,有极好的能见度。结果还表明,随着天顶角的增加, $P_{\text{CHLOS}}$ 也随之下降。

根据 $P_{\text{CHLOS}}$ 可得到两地目标背景对比度的统计规律,如图11、图12所示。目标背景对比度与 $P_{\text{CHLOS}}$ 有相似的变化规律,只是对比度受天顶角的影响更为明显,其随着天顶角的增加而降低的趋势比 $P_{\text{CHLOS}}$ 更快。天顶角为0°和40°时,Wonsan和Al Khasal的 $P_{\text{CHLOS}}$ 及对比度的变化关系如图13所示。由图13的关系也

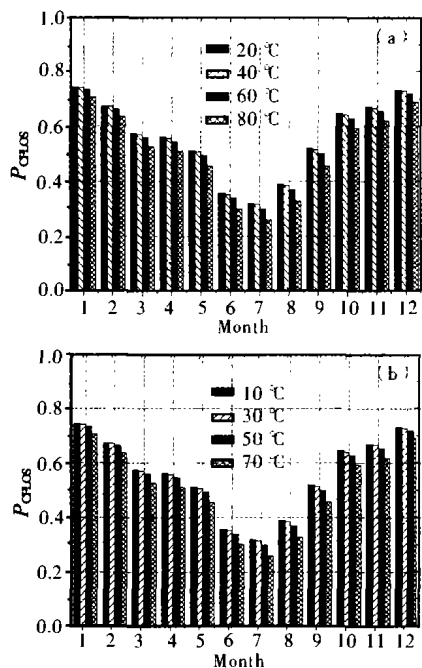


图9 Wonsan 得到的不同天顶角下的  $P_{CLOS}$

Fig.9  $P_{CLOS}$  at different zenith angles for Wonsan

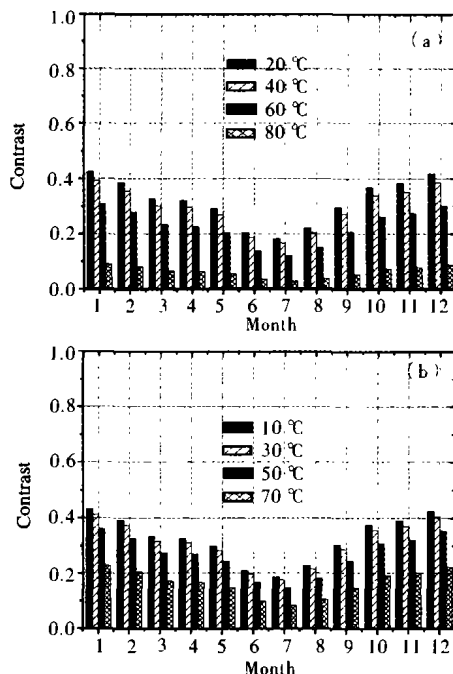


图11 Wonsan 得到的不同天顶角下的对比度

Fig.11 Contrast at different zenith angles for Wonsan

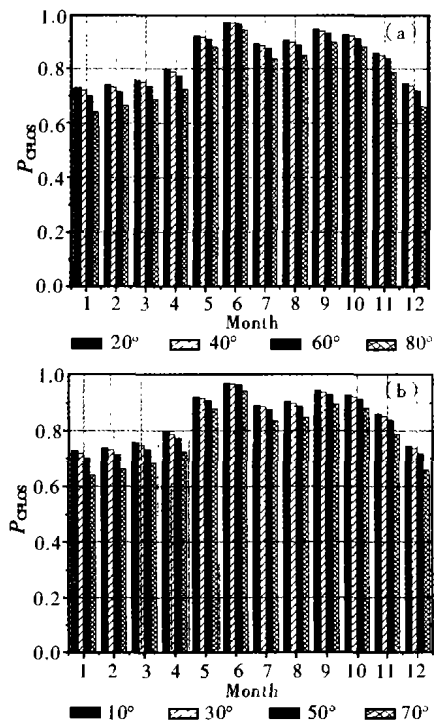


图10 Al Khasab 得到的不同天顶角下的  $P_{CLOS}$

Fig.10  $P_{CLOS}$  at different zenith angle for Al Khasab

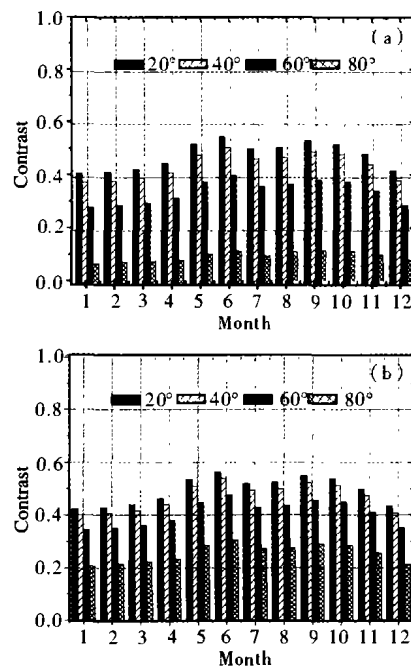


图12 Al Khasab 得到的不同天顶角下的对比度

Fig.12 Contrast at different zenith angles for Al Khasab

可推知上文分析的结论, 目标背景对比度与  $P_{CLOS}$  具有相似的变化规律, 只是对比度随天顶角增加而降低的趋势比  $P_{CLOS}$  更快。

以上的结论均是在波长为  $0.55 \mu\text{m}$  处的对比度

值,也可计算得到其他波长上的对比度的值。天顶角为  $0^\circ$  和  $40^\circ$  及波长为  $0.55$ 、 $1.3$ 、 $3.8 \mu\text{m}$  时, Wonsan 和 Al Khasal 的对比度的变化关系如图 14 所示。

最后需要指出  $P_{CLOS}$  并不唯一, 在云量相等的情况下,  $P_{CLOS}$  可能不同, 这时就需要无云区域概率 PCFA 或有云区域概率 PCA 来修正。

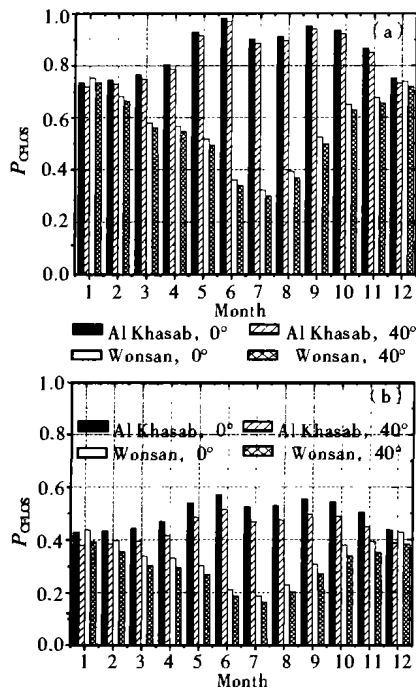


图 13 Wonsan、Al Khasab 得到的天顶角为 0° 和 40° 时的  $P_{CLOS}$

Fig.13  $P_{CLOS}$  at 0° and 40° zenith angles for Wonsan and Al Khasab

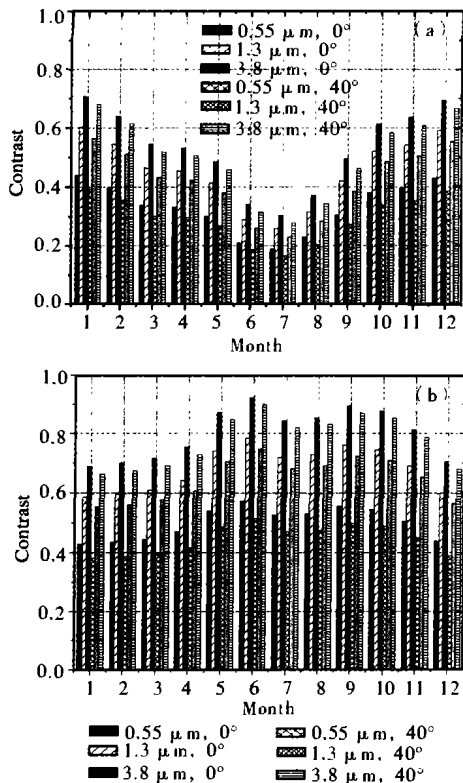


图 14 Wonsan、Al Khasab 得到的天顶角为 0° 和 40° 以及波长为 0.55, 1.3, 3.8  $\mu\text{m}$  时的对比度

Fig.14 Contrast at 0° and 40° zenith angles; at 0.55, 1.3, 3.8  $\mu\text{m}$  for Wonsan and Al Khasab

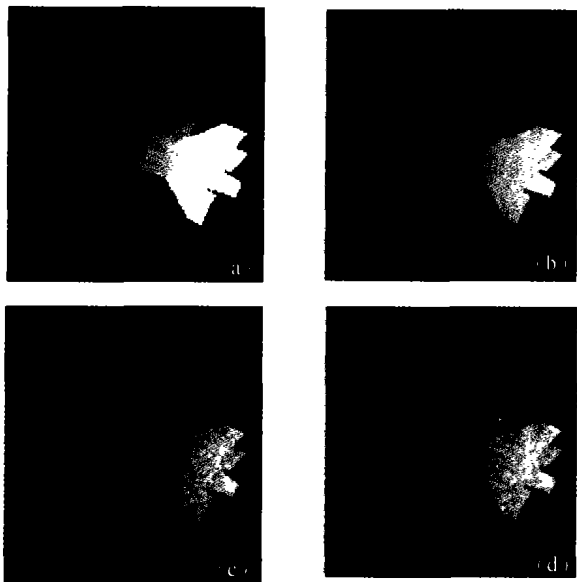
### 4 结论

本文从辐射传输理论出发,采用平面平行云的假定和 Lund 的无云视线概率模型,对有云天气条件下的目标背景对比度进行了详细的分析。具体结果为:对于 MODTRAN 给定的几种云模式,尽管云顶或云底高度、云厚等参数选取不同,但目标物高度为 100 m 时其对比度的谱分布曲线比较相似。并且分析可知,对于云层较厚的低云和部分中云,其存在阻挡了视线路径上的光传输,并且由于云自身的红外辐射而影响了天空背景亮度,从而造成了识别目标的困难。由于云层的存在,削弱了太阳的影响,视线路径上的多次散射占主导作用,此时方位因素对目标识别的影响可忽略。对于薄卷云和亚可视卷云的计算结果表明:在可见光波段上,云层上比云层下目标物的对比度低,且变化平缓。

由于其在有限云和碎云短时间内变化非常大,对于目标探测问题来说,考虑有限云和破碎云的统计规律才是有意义的。因此用 Lund 的无云视线概率模型分析考虑不同视线路径上可探测到目标的概率。结果表明,地理位置不同的地区  $P_{CLOS}$  随季节和地理位置的变化非常大,并且随着天顶角的增加,  $P_{CLOS}$  下降。目标背景对比度与  $P_{CLOS}$  具有相似的变化规律,只是对比度受天顶角的影响更为明显,其随着天顶角的增加而降低的趋势比  $P_{CLOS}$  更快。并且可计算得到各个对应波长上的对比度。最后需要指出的是  $P_{CLOS}$  并不唯一,需要无云区域概率  $P_{CFA}$  或有云区域概率  $P_{CA}$  来修正。

### 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.
- [2] 王毅,范伟,饶瑞中.大气中目标-背景对比度的离散纵标法计算分析[J].强激光与粒子束,2004,16(7):848-852.
- [3] 王毅,范伟,饶瑞中.典型大气条件下地目标-背景对比度的计算分析[J].激光与红外,2004,34(5):375-378.
- [4] 王毅,范伟,饶瑞中.大气、地表条件对目标-背景对比度的影响分析[J].量子电子学报,2004,21(1):92-97.
- [5] 范伟,王毅,饶瑞中.根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择[J].红外与激光工程,2005,34(2):180-185. (下转第 291 页)

图 6 中波红外 (3~5  $\mu\text{m}$ ) 仿真Fig.6 Medium wave IR (3~5  $\mu\text{m}$ ) simulation图 7 长波红外 (8~14  $\mu\text{m}$ ) 仿真Fig.7 Long wave IR (8~14  $\mu\text{m}$ ) simulation

射、内热源辐射和对流等因素影响下的热平衡方程, 求出目标表面的温度场分布, 并因之导出波段辐射,

借助热像仪的传感器模型, 附加噪声后, 得到目标的双色红外图像。

本文完成了双色红外图像的仿真工作, 仿真结果为目标识别算法提供了可靠的数据; 同时, 在结构上为后续的红外仿真工作提供了系统框架。实验图像表明, 文中所得仿真结果具备红外图像特征, 满足了设计要求, 并有一定的通用性。为了使仿真结果得到普遍应用, 可以通过修正文中所提的一些简化模型(如探测器的响应函数)和增加大气衰减模型得到更为真实的数据; 通过增加对象的纹理和与背景合成得到更为逼真的视觉效果, 其中通过此方案获得的 3D 目标的红外图像和通过投影和几何变换已有红外背景可方便地合成所需的红外场景。

#### 参考文献:

- [1] Black J V. Fusion of infrared and visible-light images[A]. Command Information Systems Workshop: 1st CIS Workshop[C]. 1994. 316-325.
- [2] Lanterman A D, Miller M I, Snyder D L. Automatic target recognition via the simulation of infrared scenes[A]. In Proc of the Sixth Annual Ground Target Modeling and Validation Conference[C]. Michigan: Keweenaw Research Center, Michigan Tech Univ, 1995. 195-204.
- [3] Powell Gavin, Martin Ralph, David Marshall, et al. Simulation of FLIR and LADAR data using graphics animation software[A]. Pacific Conference on Computer Graphics and Applications[C]. 2000. 126-134.
- [4] 张智丰, 李向新, 彭群生. 基于大气传输模型的动态目标红外成像仿真[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 524-527.
- [5] Nandhakumar N, Aggarwal J K. Integrated analysis of thermal and visual images for scene interpretation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(4): 469-480.
- [6] 俞佐平, 陆煜. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(上接第 286 页)

- [6] Nahrsted D A. Cloud modeling for laser weapon propagation analysis[A]. SPIE[C]. 2002, 4034. 69-82.
- [7] Allen J H, Malick J D. The Frequency of Cloud-Free Viewing Intervals[R]. 1983, AIAA-83-0441: 10-13.
- [8] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射-(1)云气候学和云的辐射作用[J]. 大

气科学, 1994, 18: 910-932.

- [9] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射-(2)环流模式中的云和云辐射参数化[J]. 大气科学, 1994, 18: 933-956.
- [10] 汪宏七, 赵高祥. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 910-932.