

大气传输对激光主动夜视技术的影响

邓永丽^{1,2}, 叶超^{1,2}, 刘云¹, 秦莉¹, 王立军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:讨论了大气消光作用对目标信号的衰减和大气后向散射对目标对比度的影响情况, 从实用角度论述了大气消光的计算方法, 得出常用几种波长激光的大气透过率情况, 并分析了激光主动夜视系统中大气后向散射对图像对比度的影响。

关键词:激光主动夜视; 大气传输; 大气消光; 后向散射; 对比度

中图分类号: TN221 **文献标识码:** A

Influence of atmospheric transmission on active night vision imaging

DENG Yong-li^{1,2}, YE Chao^{1,2}, LIU Yun¹, QIN Li¹, WANG Li-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The influence of atmospheric extinction on targets and atmospheric backscattering on the contrast are discussed. A practical calculation of the attenuation coefficient is introduced also. And some atmospheric transmittances of different wavelength laser are drawing, the influence of the atmospheric backscattering on active night vision image quality is analyzed finally.

Key words: laser active night vision; atmospheric transmission; atmospheric attenuation; backscattering; contrast

1 引言

夜视技术根据有无照明光源有被动式和主动式之分。被动式由于其受天空背景照度、气象条件和目标温度对比度等条件限制, 作用距离有限, 不能满足远距离成像的需要。而主动式红外成像技术利用大功率半导体激光照明器耦合像增强器能克服上述缺点, 广泛应用于目标的探测与识别中^[1-2]。

全天候和远距离工作是主动成像技术最突出的优点。在主动式成像系统中, 激光器发射的照明信号经过“大气—目标反射—大气”后, 进入接收传感器并成像于荧光屏上。气象条件的好坏直接影响了系统的工作距离和成像质量, 因此, 研究大气对主动夜视系统的影响能优化系统结构、改善成像质量、提高系统功能。大气传输对成像质量的影响主要体现在以下几方面:

- 1) 大气的消光作用对照明信号的衰减;
- 2) 大气的后向散射作用引入了附加杂散信号, 产生附加背景, 从而降低了目标对比度;
- 3) 大气湍流使图像产生畸变和非等晕效应;
- 4) 回波信号间的相干干涉使得图像发生斑纹。

对于均匀大气, 只需考虑大气消光和后向散射作用对成像质量的影响。文中就这两方面展开讨论, 得到几种波长下大气的透过率情况和大气后向散射对图像对比度的影响, 并分析了距离选通技术在减弱后向散射方面的作用。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60636020); 国防基金项目 (No. A1320070032); 长春光机所三期创新项目 (No. 079Y32M070) 资助。

作者简介: 邓永丽 (1983 -), 女, 硕士, 主要从事主动红外夜视技术的研究。E-mail: attey@126.com

收稿日期: 2009-08-16; **修订日期:** 2009-10-10

2 大气的消光作用

大气是由多种成分组成的光学介质,这些成分对通过其中的辐射产生吸收、散射、折射等作用,削弱辐射信号的强度,影响成像质量。对于均匀大气,消光主要由大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射引起,辐射通量呈指数衰减,满足:

$$\phi = \phi_0 e^{(-kl)} = \phi_0 \tau \quad (1)$$

式中, ϕ_0 为初始通量; k 为大气衰减系数; l 为传输距离; τ ($\tau = \phi/\phi_0 = \exp(-kl)$) 为大气的透过率,表征了此段路程上辐射能量的衰减程度。

主动夜视多采用 800 ~ 1600 nm 的近红外激光进行照明,此波段的分子散射^[3]和气溶胶的吸收很小,而信号的衰减主要由 H₂O 和 CO₂ 分子的吸收和气溶胶散射引起。这样,大气的透过率可表示为 H₂O 的透过率 τ_{H_2O} , CO₂ 分子透过率 τ_{CO_2} 和气溶胶的散射透过率 τ_{sca} 之积^[4],即:

$$\tau = \tau_{H_2O} \cdot \tau_{CO_2} \cdot \tau_{sca} \quad (2)$$

2.1 H₂O 分子的吸收

低层大气中水蒸气的吸收是主要的。一定大气路程内水蒸气对辐射的吸收通常用可降水量 ω 表示。通过某一温度的相对湿度 H_r 和同一温度下海平面每千米路程的饱和凝结水量。

ω_0 (g/cm³) 表示出水平路程为 S 路程(km) 内的凝结水量 ω (cm) 为:

$$\omega = 10^{-1} \omega_0 H_r S \quad (3)$$

由于气压和湿度随高度而异,故上式还需进行适当修正^[5]。其中湿度的修正系数为 $e^{-\beta z}$ ($\beta = 0.45/\text{km}$), 压强引起的修正系数为 $e^{-0.0654 h}$, 故高度为 h , 水平路程为 S (km) 的可凝结水量的厚度(等效到海平面后)为:

$$\omega = \omega_0 H_r e^{-0.45 h} \times e^{-0.0654 h} \cdot S = \omega_0 H_r e^{-0.5154 h} \cdot S \quad (4)$$

有时还需考虑斜程上水蒸气的吸收,此路径各高度吸收系数不同。若地面法线与此路程夹角为 θ , 通过积分得从高度 h_1 到 h_2 上的可凝结水量为:

$$\begin{aligned} \omega &= \int_{h_1}^{h_2} \omega_0 H_r e^{-0.5154 h} \frac{dh}{\cos\theta} \\ &= \omega_0 H_r \frac{e^{-0.5154 h_1} - e^{-0.5154 h_2}}{0.5154 \cos\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

根据凝结水量 ω 值,查表可得水蒸气的透过率 τ_{H_2O} ^[5]。

2.2 CO₂ 分子的吸收

除去水蒸气,二氧化碳是大气吸收辐射能量最多的成分,同样的,CO₂ 分子的吸收进行高度与密度的修正后为:

$$\kappa = \kappa_h e^{-0.19 h} \times e^{-0.123 h} = \kappa_h e^{-0.313 h} \quad (6)$$

式中, κ 为将 h 高度上传输路径折算为海平面后的路径长度; κ_h 为 h 高度上传输路径;第一个指数项为吸收本领随高度的修正项,第二个指数项为密度随高度的修正项。

对于从高度为 h_1 到 h_2 , 天顶角为 θ 的斜程,同样地有:

$$\kappa = \frac{e^{-0.313 h_1} - e^{-0.313 h_2}}{0.313 \cos\theta} \quad (7)$$

计算出二氧化碳的海平面有效路径长度后,即可确定二氧化碳的透过率 $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 。

2.3 气溶胶的散射

对于近、中红外波段的激光大气传输衰减分析中,波长处于大气窗口时,辐射的衰减主要由气溶胶散射引起。大气的散射计算较复杂,实际应用中,常利用气象能见度 R_V 来简化计算。海平面上能见度 R_V 与衰减系数 β 的关系为:

$$\beta = \frac{3.912}{R_V} \quad (8)$$

对上式进行波长修正得到:

$$\beta = \frac{3.912}{R_V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (9)$$

一般, λ_0 取 0.55 μm , 波长修正因子 q 视能见度而定: $R_V < 6$ km 能见度很差时, q 取 0.585 $R_V^{1/3}$; 对于中等能见度, q 取 1.3; 当能见度特别好 ($R_V > 20$ km) 时, q 取 1.6。

同样,气溶胶的密度随海拔高度而变化,需进行高度上的修正^[6-7],即:

$$\beta = \beta_0 \left(\frac{N(h)}{N(0)} \right) \quad (10)$$

其中, $N(h)$, $N(0)$ 分别为 h 高度和海平面上气溶胶分子的浓度; $N(h) = N_0 \exp(-h/h_0)$; h_0 为特征高度,与气候有关。几种能见度条件下,特征高度和气溶胶衰减系数分别如表 1 和表 2 所示。

因此, h 高度上气溶胶的透过率为:

$$\tau_{sac} = \exp \left[- \frac{3.912}{R_V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q R e^{-(h/h_0)} \right] \quad (11)$$

表 1 不同地面能见度条件下的气溶胶特征高度

能见度/km	3	5	8	10	13	25
h_0 /km	0.90	0.99	1.10	1.15	1.23	1.45

表 2 几种能见度下的衰减系数 k

(单位: km ⁻¹)			
波长/ μm	0.808	1.064	1.540
标准晴朗 $R_V = 23$ km	0.0919	0.0595	0.0328
轻雾 $R_V = 10$ km	0.2373	0.1659	0.1026
中雾 $R_V = 5$ km	0.5325	0.4043	0.2793

3 大气对主动夜视系统的影响

对于一般主动红外成像系统来讲,在远距离观察时,光源光轴常接近系统光轴。光源发出的光在进入接收装置前,除受大气双程的衰减外,还有一部分后向散射辐射也进入接收系统,这相当于产生一附加背景,降低了对比度和清晰度,特别当大气状态不好或超远距离工作时图像可能被后向散射淹没,从而严重影响了系统正常工作^[5]。

后向散射对系统的影响主要表现为对目标对比度的影响^[5,8]。如图1所示,考虑接收器立体角 Ω 内的大气的后向散射情况。假设照明器发射功率为 P ,光束发散立体角 Ω_{las} 的光强为 I_0 ($I_0 = P/\Omega_{\text{las}}$),照明器与接收器视场的重叠始于 R_0 ,终于目标 R_m 处,其间某一位置 R 处 dR 长度内的辐射衰减量为 $d\phi$ 。

$$d\phi = -I_0\Omega k e^{-kR} dR \quad (12)$$

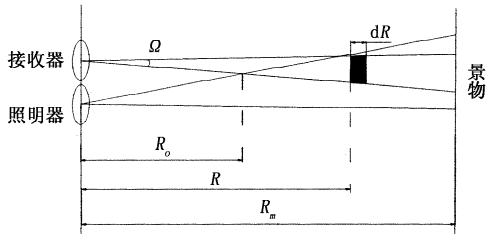


图1 主动照明示意图

大气对辐射的散射在空间 Ω' 内有一角分布 $\sigma(\theta)$,后向散射考虑的是 $\theta = 180^\circ$ 的情况,此时衰减系数 $k_{\text{后}}$ 为:

$$k_{\text{后}} = \int \sigma(180^\circ) d\Omega' = \frac{k}{8\pi} \Omega_0 \quad (13)$$

式中, Ω_0 为物镜对此散射元的接收立体角, $\Omega_0 = \pi D^2/R^2$, D 为物镜口径。

由此得到 dR 路程上后向散射通量为:

$$\begin{aligned} d\phi_{\text{后}} &= I_0\Omega k_{\text{后}} e^{-kR} dR \\ &= I_0\Omega \frac{k}{8\pi} \frac{\pi D^2}{4R^2} e^{-kR} dR \end{aligned} \quad (14)$$

这部分后向散射在进入接收系统前还要经过大气的再次衰减,则上式修改为:

$$d\phi_{\text{后}} = \frac{I_0\Omega D^2 k}{32} \times \frac{e^{-2kR}}{R^2} dR \quad (15)$$

物镜接收到的总后向散射为从 R_0 到 R_m 整个路程散射通量之和,即:

$$\phi_{\text{后}} = \int_{R_0}^{R_m} d\phi_{\text{后}} = \int_{R_0}^{R_m} \frac{I_0\Omega D^2 k}{32} \times \frac{e^{-2kR}}{R^2} dR \quad (16)$$

化简后得:

$$\phi_{\text{后}} = \frac{I_0\Omega D^2 k}{32} \int_{R_0}^{R_m} \frac{e^{-2kR}}{R^2} dR \quad (17)$$

假设景物立体角元 Ω 内,景物为朗伯面,目标的反射率为 ρ_t ,与目标相邻背景反射率为 ρ_b ,有:

$$\phi_t = \rho_t I_0 \Omega e^{-2kR_m} \frac{D^2}{4R_m^2} \quad (18)$$

$$\phi_b = \rho_b I_0 \Omega e^{-2kR_m} \frac{D^2}{4R_m^2} \quad (19)$$

考虑后向散射影响时,目标对临近背景的表现对比度 C_v 为:

$$\begin{aligned} C_v &= \frac{(\phi_t + \phi_{\text{后}}) - (\phi_b + \phi_{\text{后}})}{(\phi_t + \phi_{\text{后}}) + (\phi_b + \phi_{\text{后}})} \\ &= C_0 \left(\frac{1}{1 + 2\phi_{\text{后}}/(\phi_t + \phi_b)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

其中, C_0 为目标与背景间的固有对比度 $C_0 = \left(\frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t + \rho_b} \right)$,由于大气的后向散射作用,目标的对比度恶化为:

$$\frac{C_v}{C_0} = \left(1 + \frac{kR_m^2 e^{2kR_m}}{4(\rho_t + \rho_b)} \int_{R_0}^{R_m} \frac{e^{-2kR}}{R^2} dR \right)^{-1} \quad (21)$$

式(21)变形得到:

$$\frac{C_v}{C_0} = \left(1 + \frac{k(R_0 + \Delta R)^2 e^{2k(R_0 + \Delta R)}}{4(\rho_t + \rho_b)} \int_{R_0 + \Delta R}^{R_0} \frac{e^{-2kR}}{R^2} dR \right)^{-1} \quad (22)$$

在主动照明系统中,广泛采用距离选通技术以削弱大气后向散射的影响。通过采用短脉冲光源配合以选通型工作像管,以时间的先后分开有用的景物反射光和影响对比度的大气后向散射光,从而很大程度地减小了后向散射对成像系统的影响。

4 讨论

对于主动照明系统的信噪比的表述式如下:

$$\text{SNR} = \frac{E_i}{\text{NEI}} \text{MTF}_s \quad (23)$$

$$E_i = \frac{I_0 \rho_t}{4R^2} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \tau_r \cdot (\tau_a^2 C) \quad (24)$$

式中, MTF_s 为系统总调制传递函数,包括物镜、像管、电子线路和显示器等;NEI为 $\text{SNR} = 1$ 时噪声等效照度; E_i 为目标的输入照度; τ_r 为接收系统的透过率;大气透过率 τ_a 和目标表现对比度 C 体现了大气对目标信号的影响。

主动夜视系统中,大气传输对激光能量的衰减作用是非常显著的。 H_2O 子的消光作用如图2所示。随着大气中水蒸气含量的增加,透过率急剧降低;另一方面,近红外的 $0.808 \mu\text{m}$, $1.064 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 的辐射中, H_2O 分子对波长 $1.540 \mu\text{m}$ 的辐射吸收率低,其辐射透过高,有利于夜视成像。从图

3 的 CO₂ 的透过率曲线中可以发现,近红外波段 CO₂ 分子对大气消光影响很小,对 0.808 μm 和 1.064 μm 几乎完全透明,即使对 1.540 μm 的光源,当传输距离达 1000 km 时,CO₂ 的透过率也高达 0.927。选择主动照明激光器时,应选择在大气窗口,尽量避开表 3 所示一些吸收峰^[9]。

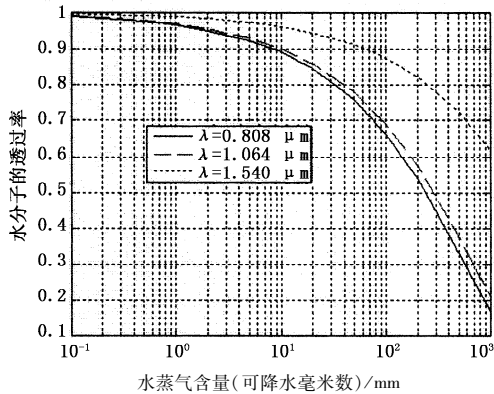


图2 水蒸气含量对透过率的影响曲线

表3 H₂O 及 CO₂ 对可见光和近红外区主要吸收谱线

吸收分子	主要吸收谱线中心波长/μm							
H ₂ O	0.72	0.82	0.93	0.94	1.13	1.38	1.46	1.87
	2.66	3.15	6.26	11.7	12.6	13.5	14.3	
CO ₂	1.4	1.6	2.05	4.3	5.2	9.4	10.4	

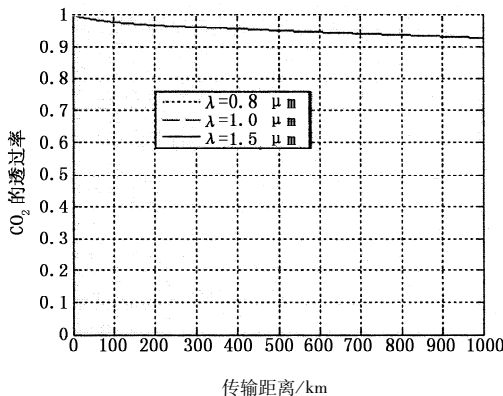


图3 CO₂ 透过率曲线

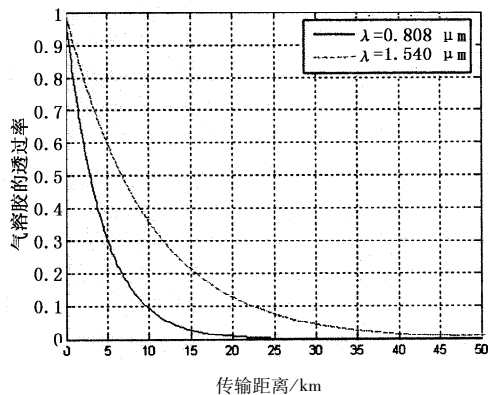


图4 气溶胶的透过率曲线

图4 为气溶胶散射对透过率的影响曲线图。 R_e 取中等能见度 ($R_e = 10$ km) 情况。由图可知,气溶胶是大气消光作用的主要因素之一。同样,波长为 1.540 μm 时比 0.808 μm,气溶胶的透过率高。

波长 1.540 μm 的激光不仅在大气透过率方面有优势,同时,具有更好的隐蔽性和更高的安全性,将是未来夜视技术的主要发展发向^[10]。

大气对主动夜视系统另一个影响表现在此大气的后向散射降低图像的对比度。如图5所示,当采用波长 0.808 μm 照明时,若有效空气柱长度 ΔR 达 2 km 时,对比度降为原来的 1/10;而对于照明波长为 0.154 μm 时, ΔR 为 3.6 km 左右时,对比度衰减为原来的 1/10。由此可见进行远距离探测时,大气后向散射可能完全淹没目标信号,致使系统无法工作。因此,要进行远距离成像就必须有解决大气后向散射的问题。

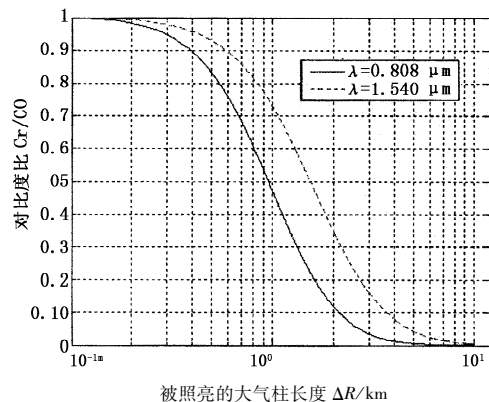


图5 大气后向散射对成像对比度的影响

在主动照明系统中,广泛采用时间标注法分离目标回波和大气后向散射杂波。距离选通技术通过采用短脉冲光源照明,配合以选通型工作像管,以时间的先后分开目标信号和影响对比度的大气后向散射信号。假如光源脉冲宽度为 τ ,任一时刻被照亮的大气长度为 τ_c ,信号经过双程传输,接收的大气长度仅为 $\tau_c/2$,大大削弱了后向散射的影响。

对于搜救、监视的夜视成像大多采用大功率半导体激光器阵列光源,光源脉冲宽度一般为 0.1 ~ 2 μs,这样接收器接收到的大气长度仅为几十米到数百米,此时后向散射的影响很小。2007 年美国 OBZERV 夜视技术公司采用 860 nm/808 nm 双波长半导体激光器耦合三代选通 ICCD 的 ARGV-2400 系统,对车辆、人及车牌的识别距离分别为 10 km、5 km 和 2 km。而在距离选通夜视技术方面,我国尚

处于理论研究和实验验证阶段。

5 结束语

大气对激光主动夜视成像的影响主要体现在对激光辐射能量的衰减和对图像对比度的降低上。文中讨论了均匀大气的影响,从实用角度论述了大气消光的计算方法,得出几种常用波长激光的大气透过率情况,并分析了激光主动成像中大气后向散射对图像对比度的影响,对主动红外成像系统有一定指导作用。

参考文献:

- [1] Kevin J Snell, Andre Parent, Marc Levesque, et al. Active range-gated near-IR TV system for all-weather surveillance[J]. Proc. SPIE, 1997, 2935: 171 - 182.
- [2] 杨玉兰, 孙金霞, 付国柱. 主动成像系统中大气后向散射的分析和处理[J]. 液晶与显示, 2009, 24(1): 331 - 334.
- [3] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331 - 335.
- [4] 于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 523 - 527.
- [5] 张敬贤, 等. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 112 - 116.
- [6] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学·精密工程, 1998, 6(4): 35 - 42.
- [7] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 11 - 63.
- [8] Richard L Espinola, Brian Teaney, Quang Nguyen, et al. Active imaging system performance model for target acquisition [J]. Proc. SPIE., 2007. 6543: 65430T - 1 - 65430T - 12.
- [9] 王祥科. 小型化激光主动成像系统研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [10] Martin H Ettenberg, Robert M Brubaker, Michael A Blessinger, et al. A 320 × 256 InGaAs Camera for Range Gated and Staring Applications [J]. Proc. SPIE, 2005, 5783: 21 - 32.