

红外圆偏振光透雾性能分析

曾祥伟,褚金奎,康维东

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:雾对红外系统的探测性能有一定影响,圆偏振光在雾中传输时具有优良的保偏性和持久性,为解决雾的红外遮蔽问题提供了新思路。分析雾对红外光波的衰减是由吸收和散射共同作用;阐述了圆偏振光透雾是由圆偏振光波螺旋性的随机化速率缓慢和圆偏振光子在传播方向的随机化速率缓慢共同作用,致使圆偏振光受雾滴的光散射影响较小;结合圆偏振透雾机理和大气光谱特征,探究雾中目标检测的优化波段,研究表明:在近红外波段的 0.78~1.1 μm 、1.48~1.56 μm 、1.63~1.86 μm 、2.03~2.18 μm 、2.39~2.5 μm 和中红外波段的 3.6~4.15 μm , 适宜采用圆偏振成像技术提高红外系统透雾性能,长红外波段,雾滴的光吸收占总消光的比例增大,已不宜采用圆偏振成像技术来提高红外系统的透雾性能。最后,分析了红外圆偏振透雾技术的特点,并对深入研究提出了建议。

关键词: 红外遮蔽; 圆偏振; 雾; 波段选择

中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1204002

Analysis on fogging performance of infrared circularly polarized light

Zeng Xiangwei, Chu Jinkui, Kang Weidong

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Sensing in scattering environments, such as fog, poses a serious challenge for infrared systems. Circular polarization is of increasing interest due to its potentially superior persistence in fog. Circular polarization imaging is one of the ways to avoid fog attenuation in infrared waves. Fog attenuation in infrared waves involves complicating interactions of scattering and absorption. The mechanism of circular polarization's increased persistence was theoretically expounded; it was proposed that circular polarization depolarized slowly due to the randomization of the photon's direction and the randomization of the helicity. Then, circularly polarized light was less affected by scattering. Optimal detection bands of target detection in fog were selected based on the mechanism of circular polarization's increased persistence and the atmospheric radiation spectrum. Optimal bands were selected which were 0.78–1.1 μm , 1.48–1.56 μm , 1.63–1.86 μm , 2.03–2.18 μm , 2.39–2.5 μm in the SWIR and 3.6–4.15 μm in the MWIR. However, the circular polarization imaging technique wasn't conducive to improve the fogging performance in the LWIR due to the optical absorption ratio increased. Finally, the characteristics and the development direction of circularly polarized imaging in complex atmosphere were summarized.

Key words: IR shielding; circular polarization; fog; band selection

收稿日期:2017-04-10; 修订日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金(E51675076, E51505062, E51305057, E51321004)

作者简介:曾祥伟(1990-),男,博士生,主要从事红外偏振方面的研究。Email: zengxw163@163.com

导师简介:褚金奎(1965-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事智能机器人、仿生传感器和机构学等方面的研究。Email:chujk@dlut.edu.cn

0 引言

透雾技术广泛运用于监控、道路交通、战场侦察和航空航天等领域,由于霾和细水雾对红外光波的衰减通常小于可见光,红外透雾功能在许多领域已有所应用,如目前在安防中广泛应用的红外透雾相机。但雾对红外光波仍有一定的衰减^[1-2],尤其当雾滴粒径与红外系统工作波长接近时,雾将对红外系统的探测性能造成极大影响,如何提高红外系统在雾中的探测能力是目前亟待解决的问题,迫切需要新的理论、新的算法以及新的系统带动红外系统透雾性能的进一步提升。圆偏振光在雾中传输时具有优良的保偏性和持久性,为解决雾的红外遮蔽问题提供了新思路。

2012 年,美国空军莱特·帕特森空军基地研究表明:圆偏振光穿透雾时具有良好的保偏性,圆偏振特性基本维持不变,且信号衰减程度较小。对于探测识别雾中目标,圆偏振成像探测技术展现出良好的应用前景^[3]。将圆偏振探测技术融合到红外系统中,是否能够有效提高红外系统在雾中的探测能力呢?目前,相关理论分析还未见报道,而这方面工作对实际应用具有重要的理论指导意义。

1 雾对红外光波遮蔽机理分析

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶组成的一种胶体系统,由于冰雾形状复杂且体内成分不均,通常采用水雾分析雾对红外光波的遮蔽效应。水雾雾滴近球形,体内成分较为均匀,且尺寸与红外光波波长接近,通常采用 Gustav Mie 散射理论分析水雾对红外光波的遮蔽作用。红外光波在水雾中传输时,其特性变化是经过多个雾滴的累计体现,研究时,分析单个雾滴对红外光波的衰减作用。

红外光波通过雾滴后,被移去的能量部分被雾滴散射,部分被雾滴吸收。总消光效率分为散射效率和吸收效率:

$$Q_{ext} = Q_{sca} + Q_{abs} \quad (1)$$

式中: Q_{ext} 为消光效率因子; Q_{sca} 为散射消光因子; Q_{abs} 为吸收消光因子。经 Mie 散射理论求得:

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)\text{Re}(a_n + b_n)]$$

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)\text{Re}(|a_n|^2 + |b_n|^2)]$$

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \quad (2)$$

式中: $x = 2\pi a / \lambda$, a 为雾滴的半径, λ 为入射波长; a_n 和 b_n 为尺寸参数。进一步求解消光截面 C_{ext} 、散射截面 C_{sca} 和吸收截面 C_{abs} 为:

$$C_{ext} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)\text{Re}(a_n + b_n)]$$

$$C_{sca} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)] \quad (3)$$

$$C_{abs} = C_{ext} - C_{sca}$$

上述分析可知:雾对红外波段的衰减是由吸收和散射共同作用,且与雾滴粒径和波长有关。

由于雾滴尺寸分布不均和雾滴形状非理想球形,采用近似公式量化分析。利用几何光学与惠更斯原理的组合, Van de Hulst^[4]对消光因子和吸收消光因子进行近似替代。

当满足 $(n-1) \ll 1, n' \ll 1, 2\pi a / \lambda \gg 1$ 或 $|n-1-in'| \leq 1, 2\pi a / \lambda \geq 1$ 时,雾滴的消光效率因子 Q_{ext} 和吸收消光因子 Q_{abs} 采用下式计算:

$$Q_{ext} = 2 - 4e^{-\tan\beta} \frac{\cos\beta}{\rho} \sin(\rho - \beta) - 4e^{-\tan\beta} \times \left(\frac{\cos\beta}{\rho}\right)^2 \cos(\rho - 2\beta) + 4 \left(\frac{\cos\beta}{\rho}\right)^2 \cos 2\beta \quad (4)$$

$$Q_{abs} = 1 + \frac{e^{-4xn'}}{2xn'} + \frac{e^{-4xn'} - 1}{8x^2 n'^2}$$

式中: $\rho = \frac{4\pi a}{\lambda}(n-1), \tan\beta = \frac{n'}{n-1}$, n 和 n' 分别代表水雾复折射率的实部和虚部, $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ 。

选取常用红外激光波长 1.55、3.5、10.6 μm , 分析雾滴粒径与消光的关系(见图 1), 研究发现:当雾滴粒径和光波波长接近时,雾滴对光波的遮蔽较为严重。由于雾中含有大量与红外光波波长相当的雾滴,雾对红外光波有较大的衰减。

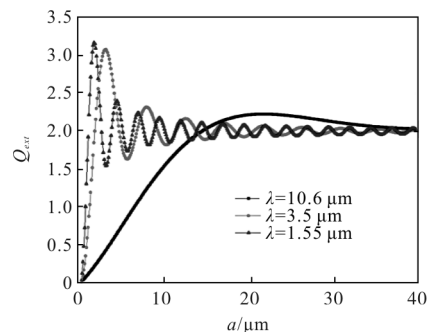


图 1 雾滴半径与消光的变化关系

Fig.1 Relationship between droplet radius and extinction

综上所述得出结论：雾对红外光波遮蔽是由吸收和散射共同作用，且与雾滴粒径和波长有关，当雾滴粒径和红外光波波长相当时，雾对红外光波的遮蔽较为严重。

2 圆偏振光透雾机理定性分析

圆偏振光在雾中传输时发生前向散射和后向散射。Shurcliff 等^[5]认为圆偏振光在前向散射中会保持其初始的旋性，在后向散射中经单次空间反射，旋性发生一次翻转。当发生多次散射后，部分圆偏振光的旋性发生多次改变，其旋性保持和反转受散射次数影响；圆偏振光子与雾滴发生多次碰撞，光子的振动方向也不断发生偏转。因此，圆偏振光波螺旋性的随机化速率与圆偏振光子在传播方向的随机化速率直接影响圆偏振光的透雾性能。

MacKintosh 等^[6]研究发现：圆偏振光在散射介质中传输时，圆偏振光波螺旋性的随机化速率缓慢。Xu 和 Alfano^[7]研究发现：圆偏振光在散射介质中传输时，不仅其光波的螺旋性随机化速率缓慢，圆偏振光子在传播方向的随机化速率也缓慢。因此，圆偏振光在前向散射中会具有良好的保偏性和持久性。陈延如等^[8]实验证实：圆偏振光在前向散射中，散射介质的深度变化和浓度变化对圆偏振光特性的影响较小。

圆偏振光经过多次散射后，后向散射光的偏振特性会发生变化，其旋性会因介质的散射影响发生反转^[9-11]，机理如图 2 所示^[12]，当圆偏振光在浑浊介质中传输时，一部分发生后向散射，在接收面上形成径向较小的圆环，这部分圆偏振光的旋性发生反转；

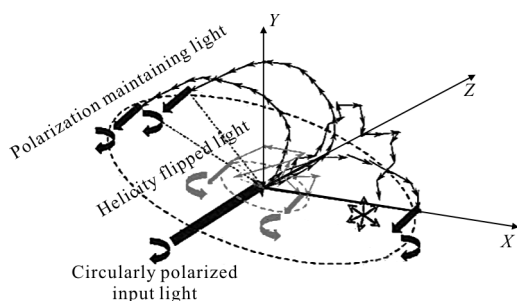
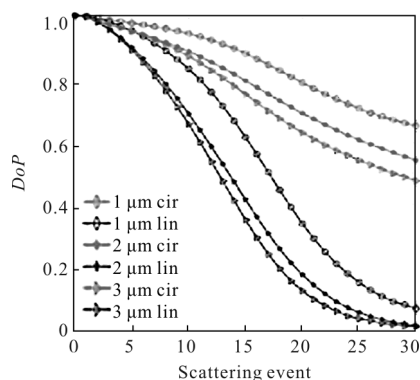


图 2 后向散射圆偏振光旋性反转与保持的机理图

Fig.2 Schematic diagram illustrating mechanism of helicity reversal and maintaining of backscattering circularly polarized light

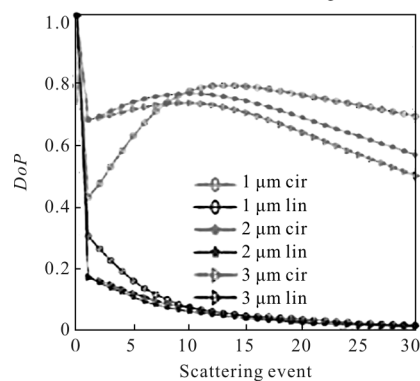
随着传输距离的增加，一部分前向散射光经过多次连续小角度变换，返回到接收面，成为后向散射光，这部分光形成径向较大的圆环，并保持其初始的旋性，因此，在浑浊介质或远距离传输时，大部分圆偏振光在后向散射中保持其初始的旋性。

2015 年，J. D. van der Laan^[13]用蒙特卡洛法模拟了雾中圆偏振光和线偏振光的传播演变历程，仿真结果(见图 3)表明：圆偏振光在前向散射(见图 3(a))和后向散射(图 3(b))中，较线偏振光都具有更好的保偏性和持久性；随着散射次数的增加，后向散射圆偏振光的偏振度先减少后增加，这是由于部分前向散射圆偏振光经过多次连续小角度变换后成为后向散射圆偏振光。



(a) 前向散射

(a) Forward scattering



(b) 后向散射

(b) Backscattering

图 3 雾中圆/线偏振传播特性对比

Fig.3 Contrast of circular/linear polarization propagation in fog

通过上述分析得出结论：圆偏振光透雾是由圆偏振光波螺旋性的随机化速率缓慢和圆偏振光子在传播方向的随机化速率缓慢共同作用，使得圆偏振光受雾滴的光散射影响较小。因此，圆偏振成像技术

可以减缓雾滴光散射引起的消光，一定程度上提高红外系统在雾中的探测识别能力。

3 红外圆偏振透雾波段的选择

雾对红外光波的衰减是由吸收和散射共同作用，圆偏振光受到散射影响较小，适用于改善主要受雾滴的光散射影响的红外光波。另外，红外光波的衰减还受到大气的影响，由于气体分子粒径远小于雾滴粒径，气体分子的光散射可以忽略，大气对红外光波的衰减主要受气体分子吸收光谱的影响，优化波段时应避开大气的吸收带。红外的大气窗口光谱段主要有：长红外波段(8~14 μm)，中红外波段(3.5~5.5 μm)和近红外波段(0.78~1.1 μm, 1.4~1.9 μm, 2.0~2.5 μm)。研究雾在这些波段的消光特性，选取主要受雾滴的光散射影响的波段，另外，波段选取还需避开个别气体分子的吸收带。

研究时，假设雾中仅含有一种粒径的雾滴，选取雾滴半径为 1、4、10、20 μm 的水雾，其中，半径为 1 μm 和 4 μm 代表辐射雾，半径为 10 μm 和 20 μm 代表平流雾^[14-16]。图 4 为从可见光到长红外范围内雾滴复折射率的实部和虚部^[17]。

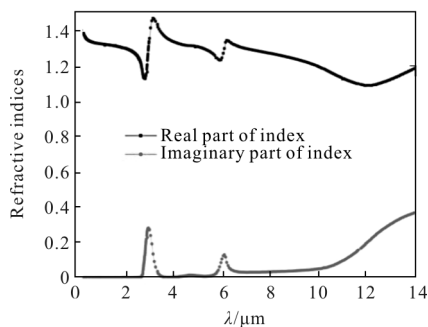


图 4 水雾复折射率的实部与虚部

Fig.4 Real and imaginary part of complex refractive indices for water mist

采用 Van de Hulst^[4]的近似方法，分析不同粒径雾滴的消光效率因子、散射消光因子和吸收消光因子与波长的变化关系(见图 5)，研究发现：近红外波段，消光主要由雾滴的光散射引起，且主要受小雾滴的光散射影响；中红外波段，消光由雾滴的光散射和光吸收共同作用，在不同波长表现出较大的差异；长红外波段，雾滴的光吸收占总消光的比例增大，已不宜采用圆偏振成像技术提高红外系统的

透雾性能。

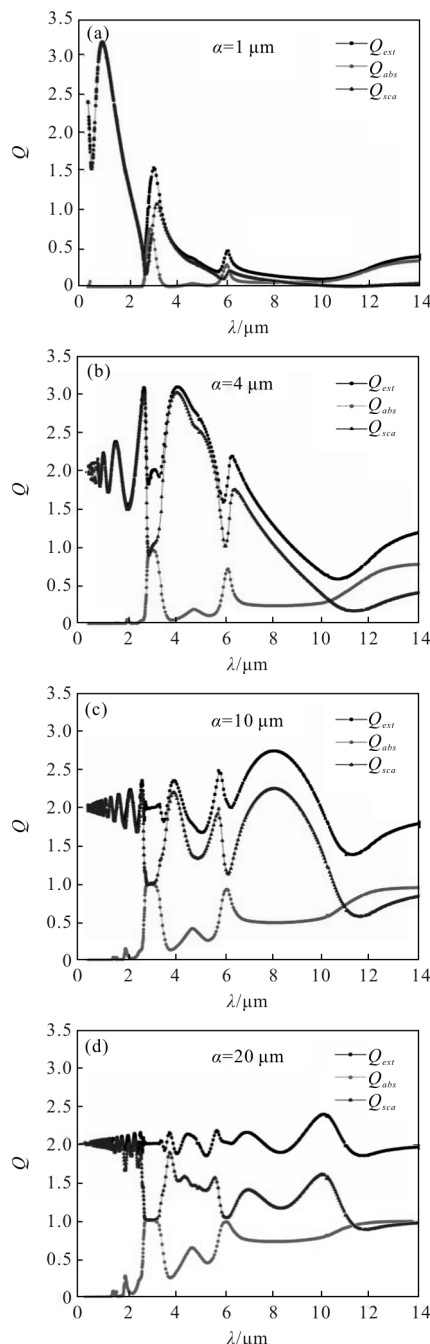


图 5 不同粒径雾滴的效率因子与波长的变化关系

Fig.5 Q_{ext} , Q_{sca} and Q_{abs} vs wavelength in different droplets

选取近红外和中红外波段，量化雾滴的光散射占总消光的比例(见图 6)，优化主要受雾滴的光散射影响的波段，研究发现：近红外波段，雾滴的光散射所占总消光的比例达到 95%以上，该区间主要包括 CO₂ 吸收带(1.43~1.44 μm、1.58~1.61 μm、1.96~2.01 μm)、水汽谐波带 (1.38~1.46 μm、1.88~1.91 μm) 和 CH₄ 吸收带

(2.2~2.37 μm)^[18], 需避开这些吸收带, 优化波段为 0.78~1.1 μm 、1.48~1.56 μm 、1.63~1.86 μm 、2.03~2.18 μm 和 2.39~2.5 μm ; 中红外波段, 3.6~4.15 μm 范围内, 雾滴的光散射占总消光的比例达 80% 以上, 该区间包括 N_2O 吸收带(3.90 μm 和 4.06 μm)^[18], 由于大气中 N_2O 体积比很少且在 3.90 μm 和 4.06 μm 两个波长的带强不高, 可忽略 N_2O 的影响, 优化波段为 3.6~4.15 μm 。

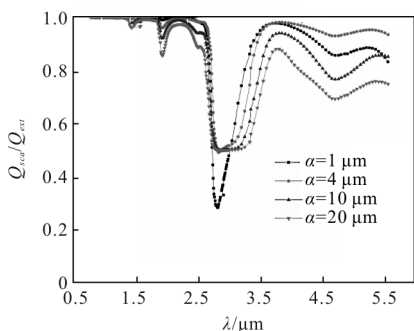


图 6 从近红外到中红外波段 $Q_{\text{sca}}/Q_{\text{ext}}$ 值的变化

Fig.6 $Q_{\text{sca}}/Q_{\text{ext}}$ results from SWIR to MWIR wavelengths

4 结论

雾对红外光波的遮蔽由吸收和散射共同作用, 当雾滴粒径和波长接近时, 雾对红外光波的遮蔽尤为严重。而圆偏振光在雾中传输时具有优良的保偏性和持久性, 受到水雾的光散射影响较小, 这为解决雾的红外遮蔽问题提供了新思路。研究表明: 近红外波段的 0.78~1.1 μm 、1.48~1.56 μm 、1.63~1.86 μm 、2.03~2.18 μm 、2.39~2.5 μm 和中红外波段的 3.6~4.15 μm , 雾滴的光散射占总消光比例较大, 适合采用圆偏振成像技术来提高红外系统的透雾性能; 长红外波段, 雾滴的光吸收占总消光的比例增大, 已不宜采用圆偏振成像技术来提高红外系统的透雾性能。

目前, 仅定性分析了红外圆偏振光的透雾性能, 尚需定量研究红外圆偏振光的透雾效果以及可视距离, 这将对红外圆偏振透雾技术的实际应用具有一定的理论指导意义。

参考文献:

[1] Hu Biru, Wu Wenjia, Dai Mengyan, et al. Study on property of infrared obscure of artificial fog [J]. *J Infrared*

Millim W, 2006, 25(2): 131-134. (in Chinese)
 胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等. 人造雾的红外遮蔽性能试验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 131-134.
 [2] Dumoulin J, Boucher V, Greffier F. Numerical and experimental evaluation of road infrastructure perception in fog and/or night conditions using infrared and photometric vision systems[C]//SPIE, 2009, 7453: 74530T.
 [3] Air Force Office of Scientific Research. Polarization imaging: seeing through the fog of war [EB/OL]. 2012-02-01[2017-02-18].<http://phys.org/news/2012-02-polarization-imaging-fog-war.html>.
 [4] Van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles [M]. Toronto: General Publishing Company, 1957.
 [5] Shurcliff W A, Ballard S S. Polarized Light [M]. New York: D Van Nostrand, 1964: 98-103.
 [6] MacKintosh F C, Zhu J X, Pine D J, et al. Polarization memory of multiply scattered light [J]. *Physical Review B*, 1989, 40(13): 9342-9345.
 [7] Xu Min, Alfano R R. Circular polarization memory of light [J]. *Physical Review E*, 2005, 72(6): 065601.
 [8] Chen Yanru, Wang Jiawang. Analysis and comparison of scattering property between linearly and circularly polarized light [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, 14(6): 551-557.(in Chinese)
 陈延如, 王家旺. 圆偏振光和线偏振光散射特性分析与比较[J]. 量子电子学报, 1997, 14(6): 551-557.
 [9] Kim A D, Moscoso M. Backscattering of beams by forward-peaked scattering media [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(1): 74-76.
 [10] Macdonald C, Meglinski I. Backscattering of circular polarized light from a disperse random medium influenced by optical clearing [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(4): 324-328.
 [11] Sun P, Ma Y, Liu W, et al. Experimentally determined characteristics of the degree of polarization of backscattered light from polystyrene sphere suspensions [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055708.
 [12] Yu Yang, Fan Zhiguo, Xu Shaohan, et al. Study on helicity flip of backscattered circular polarized light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1113004. (in Chinese)
 于洋, 范之国, 徐少罕, 等. 圆偏振光的后向散射旋性反转特性分析[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1113004.
 [13] Van der Laan John David, Wright Jeremy B. Evolution of circular and linear polarization in scattering environments [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31874-31888.

- [14] Deirmendjian D. Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and infrared [J]. *Applied Optics*, 1964, 3(2): 187–196.
- [15] Al Naboulsi M. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 319–329.
- [16] Hutt Daniel L. Estimation of aerosol microphysical parameters from visible and infrared extinction measurements [C]//SPIE, 1996, 2828(1): 503–514.
- [17] Segelstein D J. The complex refractive index of water [D]. Kansas: University of Missouri, 1981.
- [18] Shi Guangyu. Atmospheric Radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.