

## 瑞利多普勒激光雷达频率响应函数的研究

王晶晶<sup>1</sup>, 舒志峰<sup>2</sup>, 窦贤康<sup>2</sup>, 孙东松<sup>2</sup>, 夏海云<sup>2</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 概述了瑞利多普勒测风激光雷达的基本工作原理, 讨论和分析了基于 F-P 标准具双边缘鉴频技术的测量精度, 在窄带实验光源和宽带发射光源入射下, 分别测量了鉴频器的透过率曲线, 并比较了两种光源入射下由于频率响应函数引起的系统误差。结果表明: 瑞利测风激光雷达的频率响应函数满足设计要求, 在 -100~100 m/s 的径向风速动态范围内, 系统误差随径向风速的增大而增大, 宽带光源测量时, 由频率响应函数引起的系统误差在 0.74~1.38 m/s 之间; 窄带光源测量时, 由频率响应函数引起的系统误差在 0.75~0.84 m/s 之间。窄带光源较宽带光源测量时, 系统误差降低了 0~0.48 m/s。

**关键词:** 多普勒; 激光雷达; 风; 瑞利散射

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)09-2364-06

## Research of the frequency response function of the Rayleigh Doppler wind lidar

Wang Jingjing<sup>1</sup>, Shu Zhifeng<sup>2</sup>, Dou Xiankang<sup>2</sup>, Sun Dongsong<sup>2</sup>, Xia Haiyun<sup>2</sup>

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. School of Earth Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The principle of Rayleigh Doppler wind lidar was described. The discussion and analysis of the measurement accuracy of the frequency discriminator which based on the F-P etalon dual edge were presented. Transmission curve of the dual edge was also measured with narrow band and broad band laser, and the system error caused by the two kinds of light derived frequency response was also compared. It shows that the frequency response is according with the design requirement. While the radial velocity dynamic range is between -100 m/s and 100 m/s, the system error increases with the radial velocity. System error ranges from 0.74 m/s to 1.38 m/s measured with broad band laser, and ranges from 0.75 m/s to 0.84 m/s measured with narrow band laser. Compared with broad band laser measurement, system error is decreased between 0 and 0.48 m/s with narrow band laser measurement.

**Key words:** Doppler; lidar; wind; Rayleigh scattering

收稿日期: 2012-01-04; 修订日期: 2012-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(41174130); 国家 863 计划

作者简介: 王晶晶(1988-), 女, 硕士生, 主要从事激光遥感探测技术方面的研究。Email: dxsbwjj@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事多普勒测风激光雷达方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

## 0 引言

多普勒测风激光雷达是利用光的多普勒效应,通过目标物的多普勒频移反演出探测目标的运动矢量,是直接获得大气三维风场分布的工具之一,具有提供全球所需数据的发展潜力。其探测方式分为两种:相干(外差)探测和非相干(直接)探测。相干探测只能检测气溶胶散射信号的多普勒频移,在全球大气风场观测应用中受到限制,因为全球大部分地区尤其是海洋上空,以及高空大气层的气溶胶密度很低。而直接探测多普勒测风激光雷达的探测目标既可以是气溶胶也可以是分子,因此,在对流层一些气溶胶浓度极低的区域可以进行探测。对平流层风循环的研究,极大的推动了利用分子散射信号的直接探测技术的应用和发展<sup>[1]</sup>。1989年,CNRS(法国)的Chanin等人利用双Fabry-Perot标准具组建了基于分子散射的双边缘测风激光雷达系统,得到了25~60 km的中层大气中水平风速一维分量的分布,并通过添加第四个向北指向的望远镜,首次实现了中层大气水平风速的测量<sup>[2]</sup>。Souprauyen等人改进了系统,建立了第二代Rayleigh-Mie多普勒激光雷达,探测范围是整个平流层及对流层顶(约8~50 km),垂直分辨率为150 m。1992年,Korb等人对应用于地基大气风场测量的单边缘技术进行了研究,此技术既可以测量气溶胶信号也可测量分子信号,系统使用一台1 064 nm激光雷达,在对20 km内信号进行模拟计算后,得到了优于0.5 m/s的精度值<sup>[3]</sup>。1998年,Korb等人进一步描述了根据大气后向散射中分子信号进行测风的双边缘雷达技术,介绍了双边缘交叉区域的使用,并找到基于分子和基于气溶胶风速测量灵敏度相等的特点,以此来减小气溶胶后向散射对测量结果的影响<sup>[4]</sup>。1995年,美国NASA Goddard航天中心大气实验室开始论证和开展测风激光雷达的研究,作为NASA Millennium Program的项目之一和原来Zephyr多普勒激光雷达工程的延续,转变为目前的车载直接探测激光雷达,称之为GLOW(Goddard Lidar Observatory for Winds),该雷达于2000年9月在North Glen, N.H.进行了50 h的白天和夜间径向风测量外场实验,为未来星载测量系统提供技术支持,系统采用基于Fabry-Perot标准具的双边缘技术,

测量高度为1.8~35 km,垂直分辨率为178 m,风速测量误差在0.4~6 m/s之间<sup>[5]</sup>。美国MAC公司的Ground Winds在NASA等机构支持下建立了采用干涉条纹成像技术的激光雷达,同时探测米散射信号和瑞利散射信号,测量高度为0.5~20 km<sup>[6]</sup>。1999年ESA全面启动了全球第一台星载直接探测测风激光雷达计划(ADM-Aeolus),工作在人眼安全的紫外波段(355 nm),并接受大气不同层面的后向散射信号。接收机采用了条纹成像技术(分析气溶胶和云后向散射信号)和双边缘技术(分析分子后向散射信号),这两种散射机制具有不同的特性,因此可以覆盖人们关注高度范围内的大气风场分布,计划于2013年末发射升空。通过对全球风场廓线的观测,有望在数值天气预报和气象建模方面实现改善<sup>[7]</sup>。中国科学技术大学2009年研制了瑞利散射多普勒测风激光雷达系统,实现了平流层风场探测<sup>[8]</sup>。

瑞利测风激光雷达采用三通道F-P标准具作为鉴频器,其中两个通道用于边缘探测以获得信号多普勒信息,另一通道用于实时检测激光的发射频率,以消除测量过程中激光频率的抖动和漂移。多普勒信息根据由F-P标准具的透过率曲线得到的频率响应函数确定,因此透过率曲线的获取直接影响测风精度<sup>[9]</sup>。文中分析了频率响应函数对径向风速测量的影响,并分别采用窄带光源和宽带光源测量F-P标准具的透过率曲线,比较了两种方法获得的频率响应函数对径向风速的影响。

## 1 瑞利测风激光雷达基本原理

瑞利测风激光雷达采用双边缘技术,利用频谱分布相同而中心频率分开的两个F-P标准具的透过率曲线边缘对瑞利散射谱进行检测,得到回波信号的频率,同时利用第3个F-P标准具的透过率曲线边缘检测激光发射频率,并将两边缘透过率交点固定在激光发射频率处,二者频率差即多普勒频移量。如图1所示,两边F-P标准具的输入光强相同并且发射激光频率严格位于透过率的交点处,当大气风场作用时,回波信号产生多普勒频移,一个通道透过的信号强度增加,而另一个透过的信号强度减少,两通道透过的信号强度之差显示了多普勒频移,可以通过合适的校准和反演求得径向风速。实际测风时,

通过连续扫描的测量方法,在多个方位角测得径向风速,最终反演风场矢量<sup>[10]</sup>。

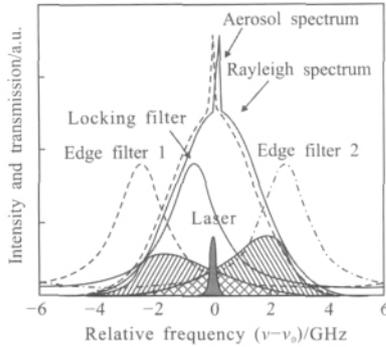


图 1 双边缘瑞利测风技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of double-edge Rayleigh wind measurement of lidar

## 2 理论分析

Fabry-Perot 标准具主要由两块平行放置的平面玻璃板或石英板组成,两板的内表面镀反射膜,光在入射到 Fabry-Perot 标准具上时将在两个平板之间产生多光束干涉。瑞利测风激光雷达系统中,入射到标准具的光束采用光纤耦合的方式得到,具有一定的发散角,若正入射且光束的全发散角  $2\theta_0$  很小时,标准具的透过率可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$h(\nu) = \frac{2T_p}{\theta_0^2} \int_0^{\theta_0} \left[ 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \frac{4\pi n d \nu \cos \theta}{2c} \right) \right]^{-1} \sin \theta d\theta \quad (1)$$

式中:  $T_p = [1 - A/(1-R)]^2$  为标准具的峰值透过率,  $A$  为标准具平板的吸收损耗;  $R$  为平板内表面膜层反射率;  $\theta$  为光线在平板内的入射角;  $d$  为平板间距;  $n$  为板间折射率。

一般标准具与入射光束的相对位置固定,可通过扫描标准具腔长或激光频率来得到标准具透过率曲线,但对激光频率的获取较为困难。腔长  $d$  与激光频率  $\nu$  相互独立,  $\nu$  引起的透过率变化可等效通过改变  $d$  来实现。所以,要测量标准具在光束频率域上的透过率曲线,可以采用扫描腔长  $d$  来实现。

发射激光谱线近似高斯线型,谱函数为:

$$f_L(\nu) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi \cdot \delta_L}} \exp \left( -4\ln 2 \frac{\nu^2}{\delta_L^2} \right) \quad (2)$$

发射激光在大气中传输时,由于分子的热运动将使分子后向散射谱发生多普勒展宽。发射激光和瑞利后向散射信号经过标准具的透过率分别为:

$$T_L(\nu) = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \quad (3)$$

$$T_R(\nu) = h(\nu) \otimes f_L(\nu) \otimes f_{\text{Ray}}(\nu) \quad (4)$$

式中:  $f_L(\nu)$  为激光发射谱线;  $f_{\text{Ray}}(\nu)$  为瑞利散射谱线;  $h(\nu)$  为 F-P 标准具的透过率函数。

假定望远镜接收的瑞利散射光强为  $I_R$ , 标准具两个边缘通道输出的光信号为:

$$I_i = I_R T_{Ri}(\nu_0 + \nu_d) \quad (5)$$

式中:  $i=1, 2$  为标准具的通道数;  $\nu_0$  为发射激光频率;  $\nu_d$  为多普勒频率。定义频率响应函数<sup>[13]</sup>:

$$R(\nu) = T_{R1}(\nu)/T_{R2}(\nu) = I_1/I_2 \quad (6)$$

在风速测量动态范围内,响应函数  $R(\nu)$  是单值函数,根据其反函数可以计算多普勒频移量  $\nu_d$ , 径向风速可表示为<sup>[11]</sup>:

$$V_i = \frac{\lambda}{2} \nu_d = \frac{\lambda}{2} [R^{-1}(\nu_0 + \nu_d) - T_L^{-1}(\nu_0)] \quad (7)$$

测量中频率响应函数  $R$  的测量通常会有一定误差,  $R$  的测量误差与两边缘通道透过率  $T_1$  和  $T_2$  有关,根据误差传递理论,得到  $R$  的测量误差为:

$$\Delta R = \left( \left| \frac{1}{T_1 - T_2} \right| + \left| \frac{1}{T_1 + T_2} \right| \right) (\Delta T_1 + \Delta T_2) R \quad (8)$$

式中:  $\Delta R$ 、 $\Delta T_1$  和  $\Delta T_2$  分别为  $R$ 、 $T_1$  和  $T_2$  的绝对误差。

频率响应函数测量误差将导致径向风速的误差,根据公式(7)可表示为:

$$\Delta V_i = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{dR}{d\nu} \right)^{-1} \cdot \Delta R \quad (9)$$

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验过程

该实验主要研究频率响应函数对径向风速测量的影响,由于锁定通道不参与频率响应函数的获取,在这里不做考虑。光路结构如图 2 所示;实物照片如图 3 所示。图中 M1~M4 是镀有 355 nm 全反射膜的反射镜片;BS1 和 BS2 是分束镜,透反比分别为 T92.4/R7.6、T50/R50。入射激光耦合到准直透镜 L1 后经过干涉滤光片 F1,被分束片 BS1 分成两束平行光,其中反射光经过反射镜 M1 通过会聚透镜 L2 聚焦到探测器 Det1;透射光被分束片 BS2 和分成两束光强相等的平行光,再分别被反射镜 M3 和 M4 反射到标准具的信号通道上,通过调整架使得激光平行正入射到标准具表面,标准具出射激光由会聚透镜 L3 和 L4 聚焦到探测器 Det2 和 Det3 上。

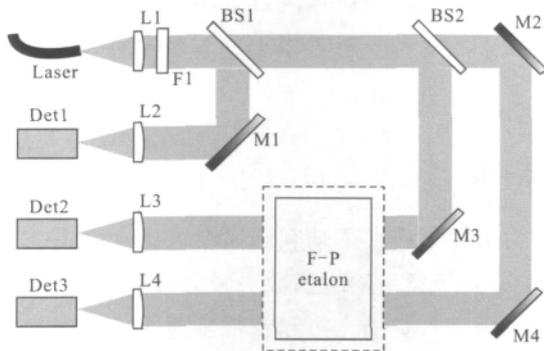


图 2 光路结构示意图

Fig.2 Structure scheme of the optical path

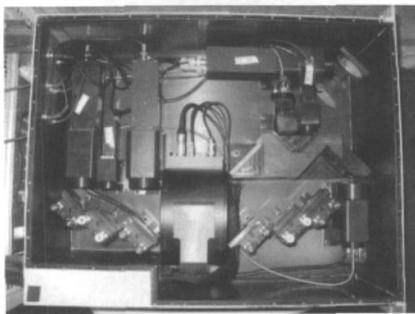


图 3 光路结构实物照片

Fig.3 Photo of optical path

标准具透过率曲线的测量,通过改变标准具腔长来实现。而标准具的腔长可以通过控制软件对其进行调节,要确保出现一个完整的透过率曲线,要求可调整的腔长范围至少对应一个自由谱间距<sup>[1]</sup>。通过镀不同厚度的膜可将两个通道的透过率曲线分开。

### 3.2 实验结果

按照图 2 的光路结构,分别采用 355 nm 的窄带光源和宽带光源作为入射光源,窄带光源测量时,标准具 10 步长采集一个数据点;宽带光源测量时,标准具 100 步长采集一个数据点,脉冲光 2000 发累计。两种光源下分别测得透过率点及拟合曲线如图 4 和图 5 所示。窄带光源测量得到两个通道透过率曲线带宽分别为 1.811GHz, 1.943GHz;宽带光源测量得到两个通道透过率曲线带宽分别为 1.815GHz,2.021 GHz。标准具透过率曲线带宽理论设计值为 1.7GHz,因此采用窄带光源时测得的透过率曲线更为理想,但两种光源测量的标准具透过率曲线带宽与理论设计值相比均有所增宽,造成这种现象的原因可能是光束存在发散角或者光路没调整到最佳状态<sup>[9]</sup>。

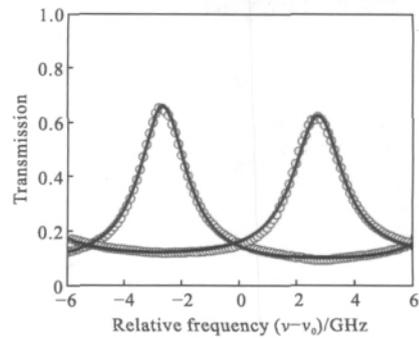


图 4 窄带光源入射时的透过率曲线

Fig.4 Transmission for F-P etalon measured with narrow band laser

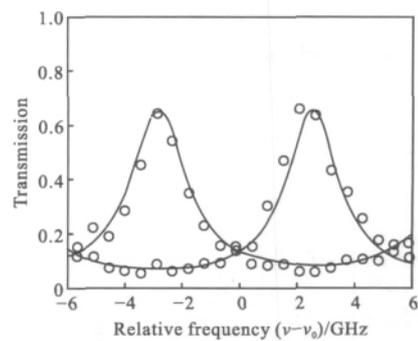


图 5 宽带光源测量的透过率曲线

Fig.5 Outgoing laser transmittance measured with broad band laser

### 3.3 透过率曲线对径向风速的影响

如果要求水平风速测量的动态范围达到 $\pm 100\text{m/s}$ ,则考虑风速动态范围内的径向风速误差。根据公式(6)和(8),窄带光源和宽带光源测量的频率响应函数曲线及其误差分别如图 6 和图 7 所示。

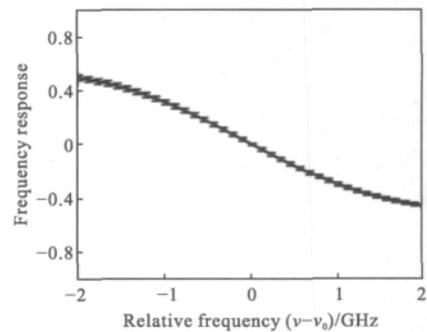


图 6 窄带光源入射时的频率响应函数及其误差

Fig.6 Frequency response and error measured with narrow band laser

根据图 6 和图 7,通过两种入射光测得的频率响应函数均在多普勒频移为零处取得最小值,窄带光源入射时频率响应函数误差小于宽带光源测量的误差。根据误差传递理论,分别得到两种光源测量时,径向风速误差随径向风速变化的曲线,图 8 为窄

带光源入射时的径向风速误差,图9为宽带光源入射时的径向风速误差。

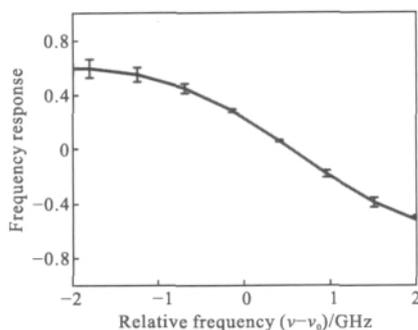


图 7 宽带光源入射时的频率响应函数及其误差

Fig.7 Frequency response and error measured with broad band laser

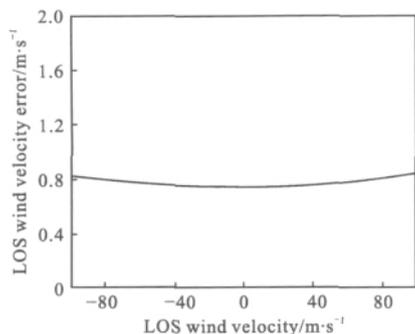


图 8 窄带光源入射时的径向风速误差

Fig.8 Radial velocity error measured with narrow band laser

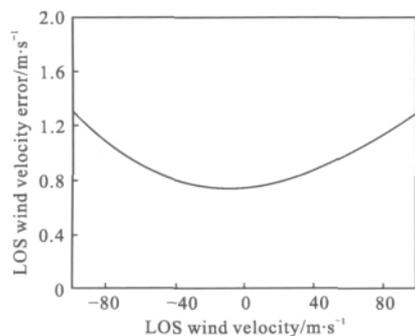


图 9 宽带光源入射时的径向风速误差

Fig.9 Radial velocity error measured with broad band laser

图 8 和图 9 表明,窄带光源和宽带光源入射时,由频率响应函数引起的径向风速误差均在径向风速为零附近取得最小值,且随风速增大而增大。而宽带光源入射时,误差随径向风速明显增大,以导致在径向风速较大值处,测量误差远大于窄带光源测量的结果。在 $\pm 100$  m/s 的径向风速动态范围内,窄带光源测量时系统误差在 0.75~0.84 m/s 之间,而宽带光源

测量时的系统误差在 0.74~1.38 m/s 之间。采用窄带光源较采用宽带光源测量透过率曲线时,系统误差降低了 0~0.48 m/s。

## 4 结 论

文中简要介绍了瑞利测风激光雷达的基本工作原理,分析了频率响应函数对径向风速的影响。实验分别采用窄带实验光源和宽带发射光源测量了标准具的透过率曲线,比较了两种光源测量的频率响应函数,以及由于频率响应函数引起的系统误差。结果显示:该窄带光源测量的透过率曲线满足瑞利测风激光雷达的设计要求,鉴于窄带实验光源便于系统调试,且与宽带发射光源相比具有良好的稳定性,这为今后标准具透过率曲线的测量提供了实验和理论依据。

## 参考文献:

- [1] Cristina Flesia, Korb C Laurence. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(3): 432.
- [2] Chanin M L. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 1273-1276.
- [3] Korb L C. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds[J]. *Appl Opt*, 1992, 31: 4002.
- [4] Korb L C. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(15): 3097-3104.
- [5] Gentry B. Tropospheric wind measurements obtained with the Goddard Lidar Observatory for Winds (GLOW): validation and performance [C]//International Symposium on Optical Science and Technology, 2001, 4484: 74-81, 30-31.
- [6] Hays P B. Circle to line interferometer optical system [J]. *Appl Opt*, 1990, 29: 1482-1489.
- [7] Straume-Lindner A G, Ingmann P, Endemann M. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-Aeolus [J]. *ESA Report*, 1999, (4): SP-1233.
- [8] Sun Dongsong. Low tropospheric wind profile from a 1.06 nm Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 52-56. (in Chinese)
- [9] Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, et al. Analysis and design of Fabry-Prot etalon of Doppler wind lidar[J].

- Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 9–13. (in Chinese)
- [10] Dabas A. Correcting winds measured with a Rayleigh Doppler lidar from pressure and temperature effects [J]. *Tellus*, 2008, 60A: 206–215.
- [11] Sun Dongsong. Ultraviolet Rayleigh lidar for wind and temperature measurements [J]. *Optical Review*, 2000, 7(6): 555–560.
- [12] Sun Dongsong. Low tropospheric wind profile from a 1.06 nm Doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 52–56. (in Chinese)
- [13] Shen Fahua. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. *Chinese Optic Letters*, 2009, 7(7): 593–597.
- [14] Li Chen, Shu Zhifeng, Xu Wenjing, et al. Development of molecule wind lidar receiver based on Fabry–Perot etalon [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 156–159. (in Chinese)
- [15] Xia Haiyun, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, et al. Analysis and performance of the Fabry–Perot etalon for a Doppler direct detection wind lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(1): 29–31. (in Chinese)

### 下期预览

## 泡沫对目标红外辐射透过率的计算及仿真

章文芳<sup>1</sup>, 汪家春<sup>2,3</sup>, 胡波<sup>1</sup>, 宋伟<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>

(1. 电子工程学院 软件测评中心, 安徽 合肥 230037; 2. 电子工程学院 安徽省红外与低温等离子重点研究所, 安徽 合肥 230037; 3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 基于电波吸收、反射和散射特性对泡沫衰减遮蔽机理进行探讨研究, 对目标红外辐射在大气中的透过率进行了定量分析与计算。根据泡沫遮蔽状态的不同, 分别对泡沫层和泡沫云两种干扰形式下目标红外辐射的透过率进行了定量计算, 并利用 matlab 仿真工具进行了数值仿真, 仿真结果表明: 泡沫相比大气对目标红外辐射的衰减作用明显, 并且随着泡沫厚度的增加, 目标红外辐射透过率逐渐减小, 与实验测得的值基本一致, 进一步验证了模型的合理性。