

文章编号: 0253-2239(2010)01-0007-07

全光纤拉曼测温激光雷达分光系统设计

毛建东^{1,2} 华灯鑫¹ 胡辽林¹ 王玉峰¹ 汪 丽¹

(¹ 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; ² 北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要 设计了一个 532.25 nm 波长的转动拉曼激光雷达用新型全光纤分光系统, 对强背景噪声下微弱的转动拉曼信号进行高精度提取, 以用于探测大气温度。该新型全光纤分光系统由 3 个光纤布拉格光栅 (FBG) 及光纤环行器构成, 利用 FBG 的波长选择特性, 可高精度剔除大气回波信号中的米氏散射、瑞利散射信号成份, 分离出中心波长分别为 530.6 nm 和 528.8 nm 的转动拉曼散射信号, 用于反演大气温度。通过对分光系统进行参数优化设计和数值计算, 表明基于 FBG 的分光系统可以对回波信号中的米氏散射、瑞利散射信号进行高达 7 个数量级以上的抑制, 满足转动拉曼测温激光雷达对米氏散射、瑞利散射信号的高精度剔除。

关键词 大气光学; 转动拉曼激光雷达; 光纤布拉格光栅; 大气温度廓线

中图分类号 TN958.98, TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0007

Design of Spectroscopic Filter of All-Fiber Rotational Raman Lidar for Temperature Profiling

Mao Jiandong^{1,2} Hua Dengxin¹ Hu Liaolin¹ Wang Yufeng¹ Wang Li¹

¹ School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

² School of Electrical and Information Engineering, North University for Nationalities, Yinchuan, Ningxia 750021, China

Abstract An all-fiber spectroscopic filter of rotational Raman lidar system at a laser wavelength of 532.25 nm for temperature profiling is designed for the first time for filtering the weak rotational Raman signal under condition of intense background noise. The spectroscopic filter is optically constructed with three fiber Bragg gratings (FBG) and three optical circulators, and this configuration can separate two rotational Raman signals at the central wavelength of 530.6 nm and 528.8 nm, respectively, for atmospheric temperature retrieval, and block simultaneously Mie-scattering and Rayleigh-scattering signals with a high rejection rate. The spectroscopic filter parameters are designed and optimized by numerical calculation, and the results show that a rejection rate of larger than 7 orders of magnitude for Mie- and Rayleigh-scattering signals can be achieved, which is needed for rotational Raman lidar for temperature profiling.

Key words atmospheric optics; rotational Raman lidar; fiber Bragg grating; atmospheric temperature profile

1 引 言

在气象学中, 温度是描述大气状态的一个非常重要的参数。大气温度廓线的探测对研究太阳辐射、地球动力学上的热量传递, 解释地球温暖化现象, 提高气象预报准确度, 特别对城市气象变化等研究有很重

要的意义。同时, 大气温度的探测对研究气溶胶特性、相对湿度分布等也具有非常重要的作用^[1,2]。

激光雷达技术凭借其高时空分辨能力和探测灵敏度, 已经在大气参数的遥感测量中发挥了重要的作用^[3]。自从 1972 年 J. Cooney^[4] 提出利用大气分

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(60878050、40675015)资助课题。

作者简介: 毛建东(1975—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气遥感探测技术等方面的研究。

E-mail: mao_jiandong@163.com

导师简介: 华灯鑫(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光雷达大气遥感探测技术及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

子(N₂, O₂)的转动拉曼散射谱线来探测大气温度的原理以来,随着分光技术及其器件制造技术的提高,基于转动拉曼散射原理的激光雷达对对流层的温度廓线的探测技术,越来越引起人们的重视,并在国外得到了迅速的发展。

但是,由于转动拉曼散射的截面相对于气溶胶引起的米氏散射和大气分子引起的瑞利散射要小3~4个数量级,需要拉曼激光雷达的分光系统具有很高的带外抑制和光谱分辨能力,尤其需要对米氏散射和瑞利散射信号具有7个数量级以上的抑制^[2,5],实现从强烈的米氏散射、瑞利散射信号中提取出微弱的拉曼谱线。因此,强背景噪音(米氏、瑞利散射及太阳背景光)下的弱信号(拉曼散射)提取技术成为保证高精度探测的关键。目前,转动拉曼测温激光雷达主要采取较高的激光能量和较大的望远镜接收系统,以及采用窄带干涉滤波片^[5]、双光栅单色仪^[6~8]或者双光栅多色仪^[9]等分光方法来剔除强背景噪音,提取有效的拉曼信号;张寅超等^[10,11]以及华灯鑫等^[2,12]也采用上述分光器件来构建转动拉曼分光器。但在实际应用中,这些分光方法往往造成系统庞大、效率低、可靠性差,从而影响其发展。例如,在文献^[12]采用的窄带干涉滤光片和光栅组成的转动拉曼分光系统中,由于各种光学器件尺寸以及光路的限制,造成其分光系统盒体积庞大,尺寸达1000 mm×500 mm×200 mm(不含光学平台),重量近10 kg;同时由于滤光片透射比仅为60%,光栅衍射效率仅为60%,因此该分光系统中的光学损耗较大,效率偏低。

近年来,随着光纤通信技术的飞速发展,光纤通信中普遍采用的光纤滤波器技术,如光纤布拉格光栅(FBG)技术已较成熟,它具有许多独特的优点,如优良的波长选择性,光谱分辨率极高,光谱响应函数旁瓣小,半峰全宽小,体积小、插入损耗低、结构简单紧凑、性能稳定以及易于实现全光纤连接等。

2001年美国NASA的Langley研究中心^[13]研发出了世界上首台基于窄带FBG分光的、用于大气水蒸汽探测的近红外波长域差分吸收激光雷达系统,在该激光雷达系统分光系统中,所用的FBG长度仅为2.5 cm,所用光环形器尺寸也为厘米量级,重量几乎可以忽略,而其所用的两个FBG的反射率则分别高达93%和91%,而且实现了全光纤连接,光学效率较高,结构非常紧凑。

在充分分析现有转动拉曼测温激光雷达的基础上,本文在理论上提出了一种基于FBG技术分光的

探测大气温度的全光纤转动拉曼激光雷达。系统分析及计算表明,分光系统对米氏散射、瑞利散射信号的抑制率能够达到了7个数量级以上,保证了对高、低量子数拉曼谱线的高精度提取,从而实现对大气温度廓线的有效探测。

2 转动拉曼散射信号测量大气温度的原理

当激光器将532.25 nm波长的脉冲发射到大气中时,激光将与大气中N₂和O₂等分子发生相互作用,产生转动拉曼散射。根据激光雷达方程,望远镜接收到的转动拉曼散射光子数为^[5]

$$n = (E_0/h\nu)Cz^{-2}T^2 \sum_j \beta_{RRS,J}, \quad (1)$$

式中 n 是接收到的距离 z 处的激光回波信号光子数; E_0 是激光发射能量; h 是普朗克常数; ν 是激光频率; C 是标定系统常数,包括接收系统的有效接收面积、系统的光学损失等; T 是大气分子和气溶胶的总透射率; J 为转动拉曼谱的量子数; $\beta_{RRS,J}$ 是N₂和O₂产生的后向散射系数。

考虑到大气荧光对转动拉曼光谱的斯托克斯(Stokes)支存在干扰的特点^[5],本文选择探测反斯托克斯(Anti-Stokes)支来反演大气温度。根据转动拉曼信号的后向散射截面公式,N₂分子在反斯托克斯支上的转动拉曼散射截面变化如图1所示,图1也表示出了分光系统中两个拉曼通道的FBG2、FBG3的反射率曲线。

考虑到低层大气温度的变化范围为200~300 K,所以取温度 $T=200\text{K}, 300\text{K}$ 的谱线强度。从图1可以看出N₂的转动拉曼散射谱强度分布随温度的变化,在靠近发射激光波长附近的拉曼谱线强度随温度升高而降低,而远离发射波长的拉曼谱

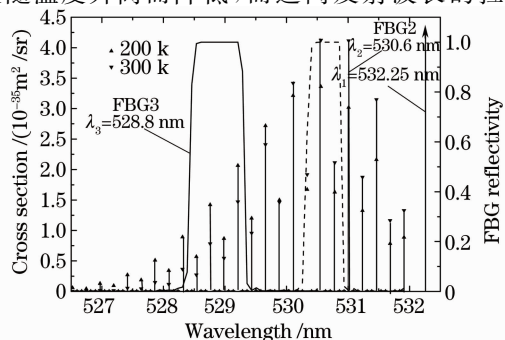


图1 N₂的转动拉曼散射截面和FBG2、FBG3的反射率

Fig. 1 Cross section of rotational Raman scattering and reflectivity of FBGs

线强度随温度升高而升高,即对应较低量子数的谱线强度随温度的升高而降低,而对应较高量子数的谱线强度随温度的升高而升高。在 530.6 nm 处,拉曼信号随温度的负变化率最大,在 528.8 nm 处,拉曼信号随温度的正变化率最大,因此,取转动拉曼光谱为 $\lambda_{b2}=530.6\text{ nm}$, $\lambda_{b3}=528.8\text{ nm}$, 相应的转动量子数分别为 $J=6$, $J=14$ 作为中心波长来反演大气温度, λ_{b2} , λ_{b3} 也分别定为 FBG2, FBG3 的布拉格(Bragg)反射波长。在设计分光系统时,为了保证探测到的两个转动拉曼信号都具有一定的强度,所选用的 FBG2、FBG3 还要保证一定的带宽。

如果已知分光系统中两个转动拉曼通道的 FBG2, FBG3 的反射率函数 $G_i(\nu)$ ($i=2,3$)、归一化的转动拉曼散射光谱 $h_r(\nu, T)$, 则这两个拉曼通道的透射函数为

$$f_{ir}(\nu, T) = \int h_r(\nu' - \nu, T) G_i(\nu') d\nu' \quad i=2,3 \quad (2)$$

因此,通过 FBG2, FBG3 并被探测到的转动拉曼信号的光子数为

$$n_i(\nu, T) = f_{ir} n \quad i=2,3 \quad (3)$$

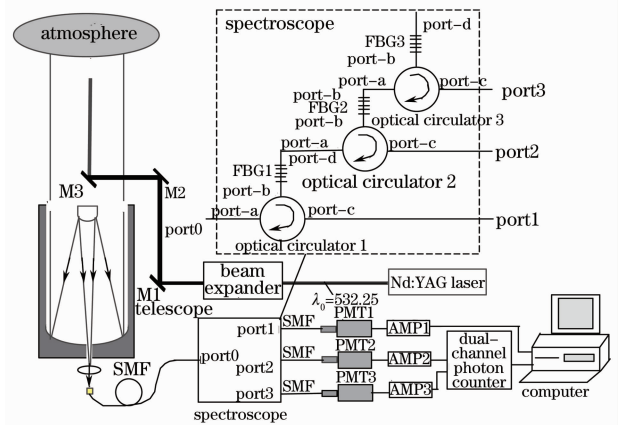
通过分析两个拉曼通道接收到的大气中 N_2 和 O_2 的 Anti-Stokes 支上转动拉曼散射信号的比值,可反演出大气温度分布。设两个通道接收到的转动拉曼散射的光子数 $n_2(\nu, T)$, $n_3(\nu, T)$ 的比率为^[5]

$$R = \frac{n_2}{n_3} \approx \exp\left\{-\left[\frac{A}{T^2(z)} + \frac{B}{T(z)} + D\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 z 为探测高度, A, B, D 为常数。利用无线电探空数据对上式进行拟合标定,得到常数 A, B, D 后,便可以反演出大气温度高度分布。

3 转动拉曼激光雷达系统构成及原理^[14]

基于 FBG 技术的转动拉曼激光雷达系统构成如图 2 所示,激光雷达和 FBG 的参数如表 1 所示。系统采用 Nd:YAG 种子注入激光器的二次谐波 532.25 nm 激光作为光源,输出能量为 300 mJ,重复频率为 20 Hz。经 10 倍准直扩束后,垂直射入大气。接收望远镜采用卡塞格林式,直径为 500 mm。



FBG1-FBG3: fiber Bragg grating; M1-M3: mirror; AMP1-AMP3: amplifier

图 2 基于 FBG 的转动拉曼激光雷达系统原理图

Fig. 2 Schematic of the rotational Raman lidar system using the FBG

表 1 转动激光雷达系统参数

Table 1 System parameters of rotational Raman lidar

Injection-seeded Nd:YAG laser	Laser wavelength/nm	532.25		
	Laser energy per pulse /mJ	300		
	Pulse repetition rate/Hz	20		
Receiving Telescope	Diameter/mm	500		
	Field of view/mrad	0.01		
	Core diameter of fiber/ μm	10		
	Numerical aperture of fiber	0.24		
Spectroscopy based on FBGs	Fiber Bragg grating filter	FBG1,	FBG2,	FBG3
	Bragg wavelengths /nm	532.25,	530.6,	528.8
	Effective refractive index	1.462,	1.458,	1.453
	Length /mm	10,	10,	10
	Effective refractive index modulation	6×10^{-5} ,	1×10^{-3} ,	1.5×10^{-3}
	Full width at half maximum(FWHM)/nm	0.028,	0.583,	0.733
Detector system	Dimension of optical circulator /mm	OD5.5 \times L60		
	Detection quantum efficiency	0.26		

将望远镜接收到的大气回波信号直接耦合到单模光纤 (SMF), 然后送入光纤环行器 1 (Optical circulator1) 的输入端口 port-a, 经光纤环行器 1 输出到接有 FBG1 的输入端口 port-b, FBG1 将满足 Bragg 条件的波长等于 λ_{b1} 的米氏散射和瑞利散射信号反射回光纤环行器 1 中, 并由光纤环行器 1 的输出端口 port-c 输出后, 由光电探测部件 1 (PMT1) 接收。此为通道 1。在通道 1 处, 通过设计 FBG1 的参数, 使得透射过 FBG 1 的米氏散射、瑞利散射信号非常微弱, 达到了很高的带外抑制率。

由于 FBG 1 对其他波长不为 λ_{b1} 的光无反射作用, 因此其他波长的光透射过 FBG 1 的输出端口 port-d 后, 再进入光纤环行器 2 (Optical circulator2) 的输入端口 port-a, FBG 2 将波长等于 λ_{b2} 的低量子数转动拉曼散射信号完全反射回光纤环行器 2, 并在其输出端口 port-c 输出后, 由光电探测部件 (PMT2) 接收。此为通道 2。

同理, 其他波长不为 λ_{b2} 的光信号透射过 FBG 3 后, 又经光纤环行器 3 (Optical circulator3) 被 FBG 3 反射, 分离出波长为 λ_{b3} 的高量子数转动拉曼散射信号, 并由光电探测部件 3 (PMT3) 接收。此为通道 3。

在通道 2、通道 3 处, 通过设计 FBG 2 和 FBG 3 的参数, 使得它们对残留的米氏散射、瑞利散射信号分别又进行了进一步的抑制。至此, 在对米氏散射、瑞利散射信号的进行有效抑制的同时, 实现了对高低量子数转动拉曼散射谱线的高精度提取。

4 基于 FBG 的分光系统设计

在转动拉曼散射激光雷达系统中, 除了接收到的用于温度探测的转动拉曼散射信号以外, 同时也接收到了气溶胶产生的米散射和大气分子产生的瑞利散射回波信号等, 虽然米氏散射、瑞利散射信号可以用于反演大气气溶胶的光学特性, 但对于温度探测而言就成为干扰信号, 需要把它们与转动拉曼散射信号分开, 也就是需要从温度探测的转动拉曼通道中高精度滤掉这些干扰信号。但转动拉曼散射的截面通常比瑞利散射小 3~4 个数量级, 理论计算表明, 要实现在探测高度 3 km 附近的温度误差小于 1 K 时, 系统需要对背景噪声 (主要考虑米氏散射和瑞利散射) 具有 7 个数量级以上的带外抑制能力^[2]。因此, 对米氏散射、瑞利散射信号的带外抑制能力是分光系统设计的关键。

利用紫外光在光纤上制作光栅时, 所得光栅从理论上可以看作是对光纤的一种微扰。当不考虑包

层模的耦合时, 根据耦合模理论, 光栅中的正向光场和反向光场分别表示为^[15]

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\sigma R(z) + i\kappa S(z), \\ \frac{dS}{dz} = -i\sigma S(z) - i\kappa^* R(z), \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}$ 为耦合系数直流分量; n_{eff} 为光纤有效折射率; Δn 为光栅折射率变化量; $\frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz} = \frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz}$, 是由于光栅周期啁啾化而引入的耦合项; $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 为 Bragg 反射中心波长, 其中 Λ 为光纤光栅的周期; $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \nu \Delta n$, 为耦合系数交流分量, ν 表示条纹可见度; $R(z) = A(z) \exp(i\delta z)$, $S(z) = B(z) \exp(-i\delta z)$, $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别表示光栅中正向和反向传输光场的振幅。对于均匀 FBG 而言, (5) 式有解析解。

由于光栅两端折射率突变形成了法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 效应, 在光栅反射谱两边产生了很多的旁瓣^[16,17], 这些旁瓣的存在不仅影响分光器对米氏散射、瑞利散射信号的剔除率, 从而影响大气温度的探测精度, 还大大降低了 FBG 的波长选择性。实际应用中, 可以通过使光栅折射率变化量的幅度沿着光栅长度方向呈各种钟形函数分布来设计各种光学切趾的光纤光栅来抑制旁瓣, 即用 $\Delta n f(x)$ 代替 Δn ^[17]。目前在光栅分析中, 常用的切趾函数有: 高斯切趾 $f(z) = \exp(-\alpha z^2/L^2)$ 、超高斯切趾 $f(z) = \exp(-\alpha z^{2m}/L^{2m})$ 、升余弦切趾 $f(z) = [1 + \cos(\pi z/aL)]/2$ 等 (L 表示光栅长度, α 为切趾函数参数)。这些切趾函数的共同特点是在光栅中心处值为 1, 而在光栅两端趋于 0, 用这种方法可以有效地消除 F-P 效应^[15]。

对于切趾光栅而言, 利用耦合模方程不能求得解析解, 通常多用龙格-库塔 (Runge-Kutta) 法或传输矩阵法进行数值求解。其中, 矩阵分析法是将非均匀光栅分成若干小段, 每一小段都看作是均匀的子光栅, 这样每小段都可以用一个 2×2 矩阵来描述。采用矩阵分析法来设计切趾光栅。令 $R_i(S_i)$, $R_{i-1}(S_{i-1})$ 是通过第 i 段光栅正向 (反向) 的光场振幅, 则有^[15,18]

$$\begin{vmatrix} R_i \\ S_i \end{vmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{vmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sin(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sin(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

把每小段光栅矩阵连乘起来,根据光栅的边界条件:输入端 $R_0 = R(L/2) = 1, S_0 = S(L/2) = 0$, 得^[15,18]

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_i \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据(8)式便可求出光栅反射系数 $\rho = S_M/R_M = F_{21}/F_{11}$, 反射率为 $R = |\rho|^2$; 同理, 可得光栅透射系数 $\tau = R_M/R_0 = 1/F_{11}$, 透射比为 $T = \tau^2$ 。

FBG1 使用均匀光栅, 而 FBG2, FBG3 使用 $G=10$ 的高斯切趾函数。其透射比和反射率曲线如图 3 所示。

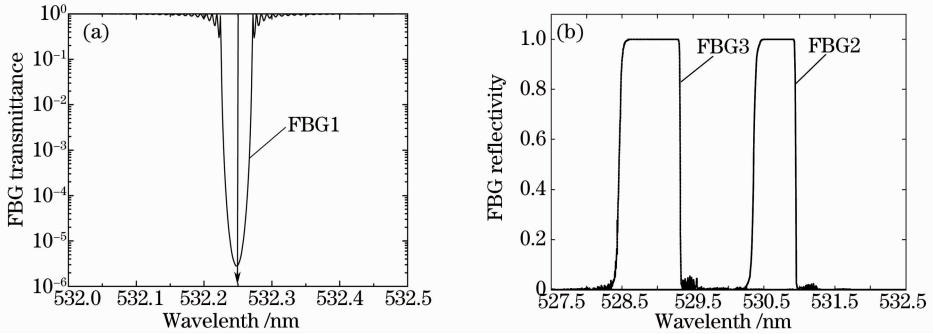


图 3 (a) 均匀 FBG1 的透射比曲线, (b) 切趾 FBG2、FBG3 的反射率曲线

Fig. 3 (a) Transmission of the uniformed FBG 1, (b) Reflectivity of the apodized FBG 2 and FBG 3

设 FBG1 的透射率为 $T_1(\nu)$, FBG2, FBG3 的反射率为 $R_2(\nu), R_3(\nu)$ 。归一化的米氏散射和瑞利散射光谱函数分别为 $h_a(\nu), h_m(\nu, T)$, 如下所示^[19]:

$$h_a(\nu) = \sqrt{\frac{1}{\pi \Delta \nu_1^2}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{\Delta \nu_1^2}\right), \quad (9)$$

$$h_m(\nu, T) = \sqrt{\frac{1}{\pi(\Delta \nu_1^2 + \Delta \nu_r^2)}} \exp\left(-\frac{\nu^2}{\Delta \nu_1^2 + \Delta \nu_r^2}\right), \quad (10)$$

式中 $\Delta \nu_1 = \delta \nu / \sqrt{4 \ln 2}$, $\delta \nu$ 激光发射谱宽, 其值设为 150 MHz, 由于米氏散射谱增宽很小, 故其可以近似为激光发射谱^[19]。 $\Delta \nu_r = \sqrt{8kT/m\lambda_0^2}$, T 为大气温度, λ_0 是激光波长; k 是玻尔兹曼常数, 其值为 1.38×10^{-23} J/K; m 是大气分子的平均质量, 其值为 4.81×10^{-26} kg。

所以被 FBG1 透射、混入转动拉曼通道的米氏散射和瑞利散射信号可分别由下式计算^[1]:

$$f_{1a}(\nu) = \int h_a(\nu' - \nu) T_1(\nu') d\nu', \quad (11)$$

$$f_{1m}(\nu) = \int h_m(\nu' - \nu, T) T_1(\nu') d\nu'. \quad (12)$$

而被 FBG2、FBG3 反射、混入转动拉曼通道 2, 3 的米氏散射和瑞利散射信号可分别用下式计算:

$$f_{ia}(\nu) = \int h_a(\nu' - \nu) R_i(\nu') d\nu', \quad (i = 2, 3) \quad (13)$$

$$f_{im}(\nu) = \int h_m(\nu' - \nu, T) R_i(\nu') d\nu'. \quad (i = 2, 3) \quad (14)$$

图 4 所示为根据(11)式~(14)式计算的 FBG1, FBG2 和 FBG3 对米氏散射、瑞利散射信号的抑制程度曲线。根据图 4, 选择 FBG1 的 Bragg 波长为 $\lambda_{b1} = 532.25$ nm, 主要用于滤除米氏散射和瑞利散射信号。考虑到瑞利散射信号的光谱范围为 3 GHz, 因此选择 FBG1 在 λ_{b1} 的反射谱的半峰全宽 (FWHM) 为 0.028 nm, 其对 λ_{b1} 处的米氏散射和瑞利信号的反射率达到 0.999 以上, 而对米氏散射和瑞利信号透射比分别为 2.78×10^{-6} , 2.998×10^{-6} , 如图 4 中的(a)所示。此时, 转动拉曼谱信号则几乎可以全部透过 FBG1, 当然还有残留的部分米氏散射和瑞利信号也透射过去, 但是此时对米氏散射和瑞利信号的抑制率已经达到了 5 个数量级以上。

选择 FBG2, FBG3 的 Bragg 波长分别为 $\lambda_{b2} = 530.6$ nm 和 $\lambda_{b3} = 528.8$ nm, 主要用于提取量子数分别为 $J_1 = 6$ 和 $J_2 = 14$ 的拉曼谱线, 它们反射谱的半峰全宽分别为 0.583 nm、0.733 nm, 反射率分别为 0.999、0.999 以上, 这样 FBG2, FBG3 在 $\lambda_{b2}, \lambda_{b3}$ 处就分别可以对转动拉曼谱线进行有效提取。同时, FBG2 对 λ_{b1} 处的米氏散射和瑞利信号的反射率

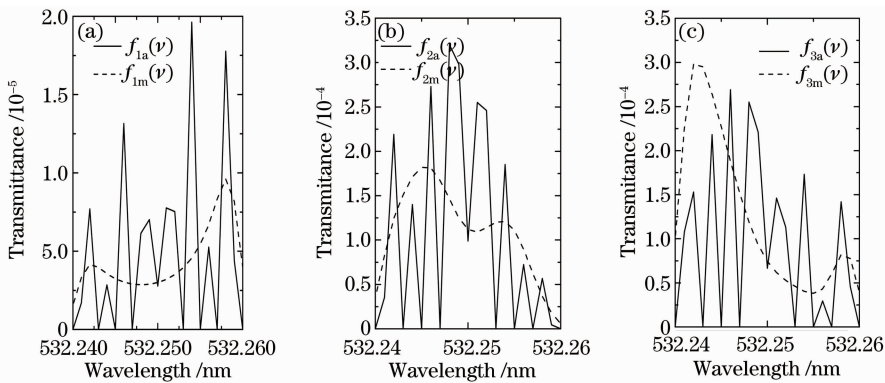


图4 (a)被 FBG1 透射、混入拉曼通道的瑞利和米散射信号, (b), (c)被 FBG2, FBG3 反射、混入拉曼通道 2,3 的瑞利和米氏散射信号

Fig. 4 Mie scattering transmittance $f_{ia}(\nu)$ and Rayleigh scattering transmittance $f_{im}(\nu)$ of the i th FBG

分别为 9.893×10^{-5} , 1.12×10^{-4} , FBG3 对米氏散射和瑞利散射信号的反射率则分别为 6.664×10^{-5} , 7.445×10^{-5} , 如图 4(b), (c) 所示。因此, FBG2, FBG3 可分别对反射进入转动拉曼通道的的残余米氏散射和瑞利散射信号进行进一步抑制, 其抑制率达到了 2 个数量级以上。

至此, 本文所设计的基于 FBG 的分光系统对米氏散射和瑞利散射信号的抑制率达到了 7 个数量级以上, 保证了对高、低量子数转动拉曼谱线的高精度提取。

5 结 论

提出了一种全新的、高精度、高效率的基于 FBG 的分光系统, 对激光雷达回波信号中的米氏散射和瑞利散射信号进行 7 个数量级的高精度剔除, 同时分离出两条用于反演大气温度廓线的转动拉曼散射信号, 实现了一种全光纤连接探测大气温度廓线的转动拉曼激光雷达系统。理论数值计算表明分光系统设计是可行的。与同类激光雷达相比, 分光系统具有结构紧凑、重量轻、可靠性高、分光效率高特点, 具有很好的应用前景, 对于同类激光雷达或其他激光雷达的分光系统设计具有重要的借鉴意义。同时, 这也是国内首次提出该分光方案^[20], 为我国今后激光雷达空基应用甚至是星载应用提供了一条可行的技术方案和实践。

参 考 文 献

- 1 D. Hua, M. Uchida, T. Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Pérot etalons for temperature profiling of the troposphere[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(7): 1305~1314
- 2 Liu Jun, Hua Dengxin, Li Yan. Rotational Raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 755~759
- 刘 君, 华灯鑫, 李 言. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 755~759
- 3 Gao Fei, Hua Dengxin, Wu Min *et al.*. Effect of M^2 factor of laser beam for a non-coaxial lidar system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1649~1654
- 高 飞, 华灯鑫, 吴 敏 等. 光束品质因子 M^2 对非同轴激光雷达探测性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1649~1654
- 4 J. Cooney. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1972, **11**(1): 108~112
- 5 A. Behrendt, J. Reichardt. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter based polychromator[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1372~1378
- 6 Y. F. Arshinov, S. M. Bobrovnikov, V. E. Zuev *et al.*. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19): 2984~2990
- 7 A. Ansmann, Yu. Arshinov, S. Bobrovnikov *et al.*. Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar[C]. *SPIE*, 1998, **3583**: 491~497
- 8 D. Kim, H. Cha. Pure rotational raman lidar for atmospheric temperature measurements [J]. *J. Kor. Phys. Soc.*, 2001, **39**(5): 838~841
- 9 I. Balin, I. Serikov, S. Bobrovnikov *et al.*. Bergh. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational-pure-rotational Raman lidar[J]. *Appl. Phys. B.*, 2004, **79**(6): 775~782
- 10 Liu Yuli, Zhang Yinchao, Su Jia *et al.*. Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 43~48
- 刘玉丽, 张寅超, 苏 嘉 等. 探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 43~48
- 11 Su Jia, Zhang Yinchao, Zhao Yuefeng *et al.*. Optical design of double grating monochromator of a pure rotational Raman lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 92~96
- 苏 嘉, 张寅超, 赵曰峰 等. 双光栅纯转动拉曼测温激光雷达单色仪的光学设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 92~96
- 12 D. Hua, J. Liu, T. Kobayashi. Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotational Raman lidar[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(9A): 5849~5852
- 13 I. Stenholm, Russell J. DeYoung. Ultra narrowband optical filters for water vapor differential absorption lidar (DIAL) atmospheric measurements[C]. NASA/TM-2001-211261, 2001: 1~21

- 14 J. MAO, L. HU, D. HUA *et al.*. Pure rotational Raman lidar with fiber Bragg grating for temperature profiling of the atmospheric boundary layer[J]. *Optica Applicata*, 2008, **38**(4): 715~726
- 15 Tang Shucheng. Numerical simulation of spectrum properties of fiber gratings[J]. *Modern Transmission*, 2002, (2): 23~28
汤树成. 光纤光栅谱特性的数值模拟[J]. 现代有线传输, 2002, (2): 23~28
- 16 Wang Lin, Yan Fengping, Li Yifan *et al.*. Jian Shuisheng. Optimization of Chirped Fiber Bragg Gratings by Asymmetrically Apodization Method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 587~592
王琳, 延凤平, 李一凡等. 非对称切趾对啁啾光纤光栅特性优化的分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 587~592
- 17 Wang Kun. Research of apodising functions of narrowband FBG filters[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2006, (2): 22~26
王昆. 窄带FBG滤波器切趾函数的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006, (2): 22~26
- 18 Zhang Dongsheng. Tailoring the Spectrum of Fiber Gratings and Its Applications[D]. Tianjin: Nankai University, 2004. 52~54
张东生. 光纤光栅的谱形控制及其应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2004. 52~54
- 19 Shen Fahua, Gu Jiang, Dong Jingjing *et al.*. Calibration of Rayleigh Doppler wind lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **20**(6): 881~884
沈法华, 顾江, 董晶晶等. 瑞利散射多普勒测风激光雷达的校准[J]. 强激光与粒子束, 2006, **20**(6): 881~884
- 20 Hua Dengxin, Mao Jiandong, Hu Liaolin *et al.*. All-fiber raman lidar system based on wavelength division multiplexing technique [P]. China Patent: IL2007 10018406.2, 2009. 8. 19
华灯鑫, 毛建东, 胡辽林等. 基于波分复用技术分光的全光纤拉曼散射激光雷达系统[P]. 中国专利: IL2007 10018406.2, 2009. 8. 19