

星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真(II): 基于 Fabry-Perot 标准具的 Rayleigh 通道大气风速反演研究*

张日伟¹⁾ 孙学金^{1)†} 严卫¹⁾ 赵剑¹⁾ 刘磊¹⁾
李岩¹⁾²⁾ 张传亮¹⁾ 周俊浩¹⁾

1) (解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2013年12月25日收到; 2014年4月2日收到修改稿)

基于星载激光多普勒测风雷达工作原理, 构建了基于连续双通道 Fabry-Perot (F-P) 标准具的鉴频仿真系统, 仿真研究了 Rayleigh 通道大气风速反演算法, 系统分析了 Rayleigh-Brillouin 效应和 Mie 干扰信号对 Rayleigh 通道反演大气视线 (LOS) 风速的影响, 并利用无线电探空数据集仿真结果统计分析了 Rayleigh 通道大气水平视线 (HLOS) 风速反演误差. 结果表明, 基于连续双通道 F-P 标准具的 Rayleigh 通道可反演中高层大气风速; Rayleigh-Brillouin 效应和 Mie 干扰信号影响 Rayleigh 通道 LOS 风速反演精度; Rayleigh 通道风速反演对温度精度要求最高, 在晴空条件下可忽略 Mie 干扰信号的影响; 不考虑 Brillouin 效应时, 高度 2 km 以下 Rayleigh 通道无法反演 HLOS 风速, 高度 2 km 以上 Rayleigh 通道反演的 HLOS 风速误差小于 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速标准差在 $1\text{--}4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间; 同 Mie 通道一样, 气溶胶和云的分布影响 Rayleigh 通道 HLOS 风速反演误差. 研究结果对发展星载激光雷达测风技术具有重要参考意义.

关键词: 激光多普勒测风雷达, Fabry-Perot 标准具, 大气风速, Brillouin 效应

PACS: 07.07.Df, 42.62.-b, 42.68.Wt, 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.63.140703

1 引言

对全球大气风剖面的主动观测是最重要和最富挑战的气象观测之一^[1]. 星载激光多普勒测风雷达可提供可靠、精确、大范围的大气风场信息, 是目前测量全球风场最先进的技术之一. 在现有地基/机载激光多普勒测风雷达技术及欧空局 Aeolus 研究成果的基础上, 文献^[2]建立了非相干探测方式的星载激光多普勒测风雷达系统, 并对低对流层大气风速反演进行了仿真研究. 本文将对基于双边缘技术的中高层大气风速反演进行理论分析和仿真研究.

边缘技术^[3-9]是非相干探测激光多普勒测风雷达主要多普勒频移测量技术之一, 有单边缘技术和双边缘技术之分. 双边缘技术^[4-8]是单边缘技术基础上的改进, 它利用两个鉴频器进行风速测量, 多普勒频移导致两个鉴频器输出信号强度不一致, 可通过测量输出信号的相对变化来检测多普勒频移, 进而反演得到大气视线风速. 由于 Fabry-Perot (F-P) 标准具有陡峭的光谱响应和可调节特性, 成为星载激光多普勒测风雷达鉴频器的首选.

本文利用基于连续双通道 F-P 标准具的双边缘技术, 以大气分子为探测对象实现中高层大气风速测量. 主要分析研究 Rayleigh 通道信号获取及其

* 国家自然科学基金 (批准号: 41205125) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: SUNXJ2013@sina.cn

风速反演算法、Rayleigh-Brillouin 效应及气溶胶后向散射信号对 Rayleigh 通道测风的影响, 最后利用高垂直分辨率无线电探空数据集仿真结果统计分析 Rayleigh 通道风速反演误差.

2 理论分析与仿真研究

本节将根据文献 [2] 设计的星载激光多普勒测风雷达鉴频系统, 对基于连续双通道 F-P 标准具的 Rayleigh 通道风速反演进行理论分析和仿真研究.

2.1 连续双通道 F-P 标准具

边缘测风技术中, F-P 标准具是测量多普勒频移的关键部件 [4-13]. 理想 F-P 标准具的透过率可用 Airy 函数 [11,14] 描述, 其表达式为

$$T(v) = \left(1 - \frac{L}{1 - R}\right)^2 \times \frac{1}{1 + (4F^2/\pi^2) \sin^2[(2\pi nd/\lambda) \cos \theta]}, \quad (1)$$

式中, L 为激光通过 F-P 标准具后的光损耗, R 为两个平板内表面的反射率, F 为有效精细度, n 为两平板间介质的折射率, d 为标准具腔长, λ 为入射激光波长, θ 为入射光与标准具反射表面法线的夹角.

在双边缘测风技术中, 双 F-P 标准具应用最多 [4-8,15,16]. 欧空局对 ALADIN 的机载试验中采用基于连续双通道 F-P 标准具的双边缘技术反演大气风速, 结果表明连续双通道 F-P 标准具不再将大气散射信号分离, 较传统离散双 F-P 标准具的效率更高 [17,18]. 本文在仿真研究中拟采用连续双通道 F-P 标准具作为 Rayleigh 通道风速反演的鉴频器来检测多普勒频移, 从而测量中高层大气风速. 图 1 为连续双通道 F-P 标准具原理示意图 [18], 假设通道 A 和 B 的透过率均为 10%, 且入射总光子数为 100. 当光子进入通道 A 时, 有 $100 \times (1 - 10\%) = 90$ 个光子被反射进入通道 B, 只有 10 个光子透过通道 A, 并被 CCD 单元接收; 同样反射进入通道 B 的 90 个光子, 只有 9 个光子透过通道 B 并被 CCD 单元接收.

离散双 F-P 标准具的透过率完全相同, 而连续双通道 F-P 标准具的两个通道具有不同峰值的透过率, 图 2 为连续双通道 F-P 标准具测风原理示意图. 由图可知, 当多普勒频移为零时, 两个通道的输出信号强度不再相等. 通道 A 和 B 的半高宽 (分别为 $\Delta\lambda_{FWHM_A}$ 和 $\Delta\lambda_{FWHM_B}$) 及通道中

心间隔 $\Delta\lambda_{space}$ 取决于对鉴频系统的设计需求, 文献 [19] 和 [20] 分别对基于 Rayleigh 散射的 532 nm 和 355 nm 激光多普勒测风雷达的标准具参数进行了深入研究.

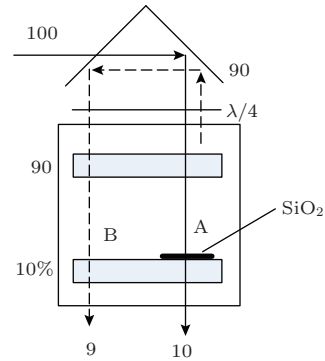


图 1 连续双通道 F-P 标准具原理示意图

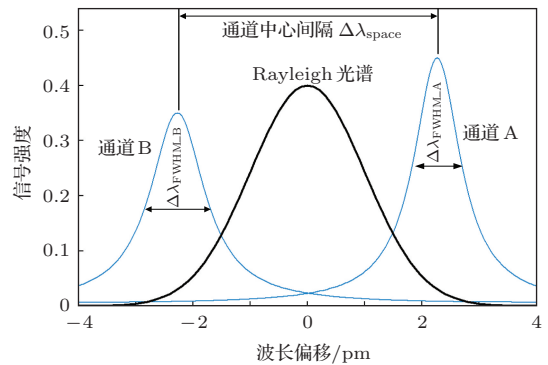


图 2 连续双通道 F-P 标准具测风原理示意图

2.2 Rayleigh 通道信号仿真

由文献 [2] 图 1 可知, 望远镜收集的大气散射信号首先进入 Mie 通道, 经反射后进入 Rayleigh 双通道, 并先后通过通道 A 和 B, 由 CCD 单元获取通过两个通道的信号总能量, 进而获得多普勒频移并反演得到大气视线风速. 本节仿真 Rayleigh 通道信号时, 暂不考虑 Brillouin 效应, 并用高斯函数来描述 Rayleigh 光谱, 其光谱宽度仅与温度 T 相关.

图 3 为模拟得到的通道 A 的透过率 $T_{FP_A}(v)$ 、反射率 $T_{FP_A}^{ref}(v)$ 及通道 B 的透过率 $T_{FP_B}(v)$ 随波长偏移 v 的变化曲线. 由图可知, 不同频率偏移时, 两通道的透过率不同, 且通道 A 的反射率也随波长偏移变化.

CCD 单元 i 的连续双通道 F-P 标准具透过率 T_{FP} 用以下公式 [21] 表示:

$$T_{FP}(i, v) = T_P^A T_{Fiz}^{ref}(v) T_{FP_A}(v) T_{FP_A}^{rel}(i) + T_P^B T_{Fiz}^{ref}(v) T_{FP_A}(v)$$

$$\times T_{\text{FP_B}}(v)T_{\text{FP_B}}^{\text{rel}}(i), \quad (2)$$

由(2)式可知,连续双通道F-P标准具透过率 T_{FP} 为通道A透过率(右端第一项)和通道B透过率(右端第二项)之和; T_{P}^{A} 和 T_{P}^{B} 分别为通道A和B透过率峰值,参数见表1; $T_{\text{Fiz}}^{\text{ref}}$ 为Fizeau干涉仪的反射率; $T_{\text{FP_A}}$ 和 $T_{\text{FP_A}}^{\text{ref}}$ 分别为通道A的透过率和反射率; $T_{\text{FP_A}}^{\text{rel}}$ 和 $T_{\text{FP_B}}^{\text{rel}}$ 分别为两个通道的光学延迟.图4为CCD探测器单元上连续双通道F-P标准具透过率 T_{FP} 分布.

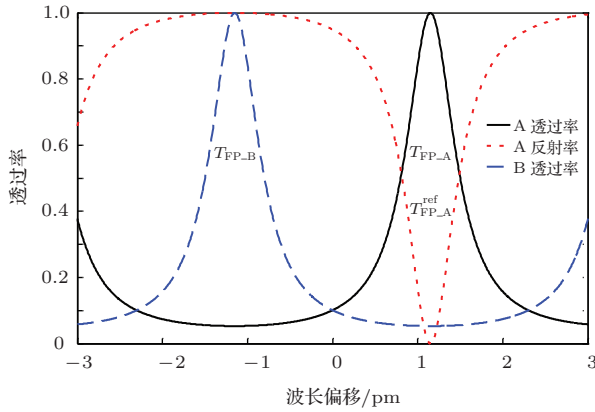


图3 通道A透过率/反射率和通道B透过率随波长偏移变化

表1 连续双通道F-P标准具及CCD参数设置

参数	参考值
通道A透过率峰值(T_{P}^{A})	0.68
通道B透过率峰值(T_{P}^{B})	0.61
通道A半最大值全宽度(FWHM)	1666 MHz
通道B半最大值全宽度(FWHM)	1666 MHz
通道A自由光谱范围(FSR)	10950 MHz
通道B自由光谱范围(FSR)	10950 MHz
通道Ax方向上的光斑中心单元	8.5 pxl
通道Ay方向上的光斑中心单元	12.5 pxl
通道Bx方向上的光斑中心单元	8.5 pxl
通道By方向上的光斑中心单元	4.5 pxl
CCD行/列单元数	16

因此,CCD探测器单元*i*接收的归一化Rayleigh散射信号透过率 $T_{\text{CCD}}^{\text{FP}}$,表达式[21]为

$$T_{\text{CCD}}^{\text{FP}}(i) = \int_v T_{\text{FP}}(i, v)G(v)dv, \quad (3)$$

式中, T_{FP} 为连续双通道F-P标准具透过率,由(2)式得到; $G(v)$ 为由Gaussian函数模拟的Rayleigh

光谱分布:

$$G(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{R}}} e^{-\frac{\lambda^2}{2\sigma_{\text{R}}^2}}, \quad (4)$$

其中, σ_{R} 为Rayleigh光谱的标准偏差,公式[18]为

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{2\lambda}{c} \sqrt{\frac{k_{\text{B}}TN_{\text{Avo}}}{M_{\text{air}}}}, \quad (5)$$

式中, λ 为激光波长, c 为光速, T 为温度, k_{B} 为玻尔兹曼常数, N_{Avo} 为阿伏伽德罗常数; M_{air} 大气分子平均摩尔质量.相关参数见表2.

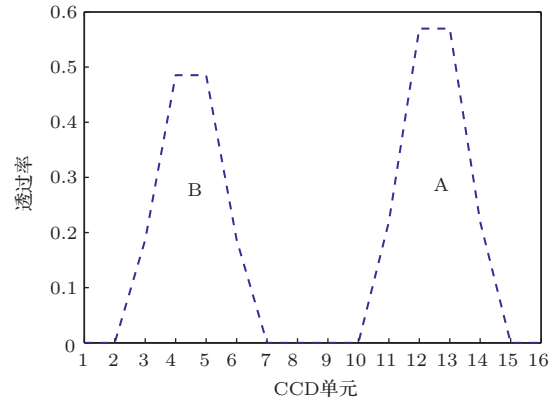


图4 CCD各单元上连续双通道F-P标准具透过率分布

表2 大气常量参数设置

参数	标记符号	参考值
光速	c	$2.9979 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Planck常数	h	$6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$
玻尔兹曼常数	k_{B}	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
阿伏伽德罗常数	N_{Avo}	$6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
大气分子质量	M_{air}	$29 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$

在求CCD各单元上的Rayleigh光谱分布时,选取的波长偏移范围为 $-3\sim 3$ pm,并将其离散为1201等份,得到一个维数为 16×1201 的标准具透过率矩阵.将大气分层并计算CCD各单元接收的大气回波信号,CCD单元接收的光子数有:Rayleigh后向散射光子数 $N_{\text{Rayleigh}}(i)$ 和背景辐射光子数 $N_{\text{BKG}}(i)$,它们分别用公式[21,22]表示为

$$N_{\text{Rayleigh}}(i) = \frac{1}{2}\eta N_s T_{\text{P}}^{\text{FP}} T_{\text{CCD}}^{\text{FP}}(i) S_{\text{tot_ray}}, \quad (6)$$

$$N_{\text{BKG}}(i) = \frac{1}{2}\eta N_s \Delta\lambda_{\text{BKG}}^{\text{FP}} T_{\text{P}}^{\text{FP}} S_{\text{BKG}}, \quad (7)$$

(6)和(7)式中, η 为探测器的量子效率; N_s 为激光器累积脉冲数; $\Delta\lambda_{\text{BKG}}^{\text{FP}}$ 为连续双通道F-P标准具背景辐射等效带宽; $S_{\text{tot_ray}}$ 为发射一个脉冲,接

收到的高度 z 处总 Rayleigh 后向散射信号; S_{BKG} 为背景辐射. $S_{\text{tot_ray}}$ 和 S_{BKG} 分别用如下两式^[22]表示:

$$S_{\text{tot_ray}}(\lambda, z) = \Delta z_{\text{LOS}} T_{\text{RX}} T_{\text{TX}} \frac{E\lambda \pi D^2}{hc} \frac{\pi D^2}{4} T^2(\lambda, z) \frac{\beta_m(\lambda, z)}{R(z)^2}, \quad (8)$$

$$S_{\text{BKG}}(\lambda, z) = L_{\text{BKG}}(\lambda) T_{\text{RX}} \frac{\lambda}{hc} \frac{2\Delta z_{\text{LOS}}}{c} \left[\frac{\pi\Delta\theta D}{25 \times 4} \right]^2, \quad (9)$$

(8) 和 (9) 式中, 有效照射深度 $\Delta z_{\text{LOS}} = \Delta z / \cos(\tilde{\phi})$, Δz 为距离分辨率, $\tilde{\phi}$ 为激光回波信号入射角; T_{TX} 和 T_{RX} 分别为发射和接收光学透过率; E 为发射激光脉冲能量; D 为望远镜口径; $T(\lambda, z)$ 为卫星和海拔高度 z 处大气分层之间的单程大气透射率; $\beta_m(\lambda, z)$ 为大气分子后向散射系数; $R(z)$ 为卫星到大气分层的距离; $L_{\text{BKG}}(\lambda)$ 为白天地球辐射率, $L_{\text{BKG}}(355 \text{ nm}) = 260 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; $\Delta\theta$ 为接收视场角. (6)–(9) 式相关参数见表 3.

表 3 星载激光多普勒测风雷达系统部分仿真参数设置

参数	标记符号	参考值
激光波长	λ	355 nm
重复频率	PRF	100 Hz
激光线宽	$\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$	50 MHz
单脉冲能量	E	0.12 J
发射光学透过率	T_{TX}	0.66
接收光学透过率	T_{RX}	0.42
望远镜口径	D	1.5 m
接收视场角	$\Delta\theta$	3.5×10^{-4} rad
探测器量子效率	η	0.82
F-P 标准具背景辐射等效带宽	$\Delta\lambda_{\text{BKG}}^{\text{FP}}$	297.5 pm
累积脉冲数	N_s	700
地球表面入射角	$\tilde{\phi}$	35°
距离分辨率	Δz	1000 m

在中高层大气中, 可能有气溶胶和云层存在, 并对 Rayleigh 通道大气风速反演产生影响, 因此 Mie 干扰信号也是必须考虑的因素.

由于 Mie 散射光谱比 Rayleigh 散射光谱窄很多, 如图 5 所示, 本文在仿真时可将 Mie 光谱看成是冲击响应函数 δ . 若波长偏移为 \hat{v} , Mie 回波信号在 CCD 各单元的分布为

$$T_{\text{CCD}}^{\text{Mie_jam}}(i) = \int_v T_{\text{FP}}(i, v) G_{\text{Mie}}(v) dv$$

$$= T_{\text{FP}}(i, \hat{v}), \quad (10)$$

式中, G_{Mie} 为 Mie 回波信号的光谱分布, 则 Rayleigh 通道中 CCD 各单元接收的 Mie 干扰信号光子数^[21,22]为

$$N_{\text{Mie_jam}}(i) = \frac{1}{2} \eta N_s T_{\text{P}}^{\text{FP}} T_{\text{CCD}}^{\text{Mie_jam}}(i) S_{\text{tot_Mie}}, \quad (11)$$

$$S_{\text{tot_mie}}(\lambda, z) = \Delta z_{\text{LOS}} T_{\text{RX}} T_{\text{TX}} \frac{E\lambda \pi D^2}{hc} \frac{\pi D^2}{4} T^2(\lambda, z) \frac{\beta_a(\lambda, z)}{R(z)^2}, \quad (12)$$

(11) 和 (12) 式相关参数见表 3.

因此, Rayleigh 通道 CCD 各单元接收的总光子数为

$$N_{\text{tot}}(i) = N_{\text{Rayleigh}}(i) + N_{\text{BKG}}(i) + N_{\text{Mie_jam}}(i). \quad (13)$$

此外, CCD 单元还接收到很小的探测器暗电流等噪声, 本文不再考虑.

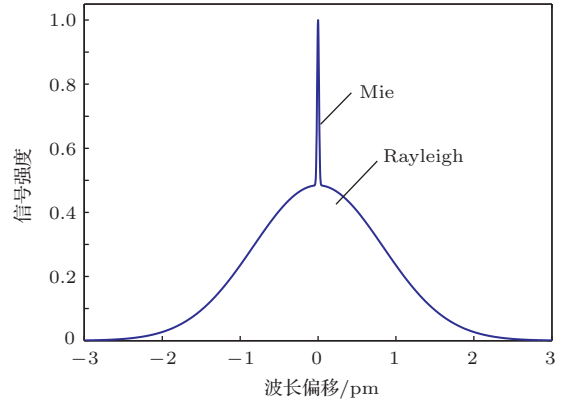


图 5 Rayleigh 和 Mie 散射光谱示意图

2.3 风速反演算法研究

Rayleigh 通道中, CCD 各单元接收到通过通道 A 和 B 的总光子数可由 (14) 式计算得到:

$$N_A = \sum_{i=9}^{16} N'_{\text{tot}}(i),$$

$$N_B = \sum_{i=1}^8 N'_{\text{tot}}(i). \quad (14)$$

用 N_A 和 N_B 的差和比定义接收器响应函数 R , 用公式^[18,23,24]表示为

$$R = \frac{N_A - N_B}{N_A + N_B}. \quad (15)$$

2.2 节在对 Rayleigh 通道信号进行仿真时, 假设 Rayleigh 光谱为 Gaussian 函数, 其谱宽由温度 T 决定, 因此接收器响应函数 R 是一个关于温度 T (单位: K) 和波长偏移 ν 的函数, 即 $R = R(T, \nu)$, 若将波长偏移转化为 LOS 风速, 则 $R = R(T, v_{\text{LOS}})$.

图 6 为仿真得到的接收器响应函数 R 随 LOS 风速 v_{LOS} 和温度 T 的变化, 其中温度 T 范围为 170—340 K (间隔 1 K), 多普勒频移对应的 LOS 风速 v_{LOS} 范围为 $-150—150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (间隔 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). 由图可知, 响应函数 R 的变化范围为 $-0.4—0.6$; LOS 风速为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 响应函数 $R \approx 0.1$; 响应函数 R 绝对值随 LOS 风速增加而增大, 随温度升高而减小.

在有效变化范围内, 若已知任一 (T, R) , 可通过查找表获得对应的大气视线风速 v_{LOS} , 进而得到大气水平视线风速 v_{HLOS} :

$$v_{\text{HLOS}} = \frac{v_{\text{LOS}}}{\sin(\phi)}. \quad (16)$$

3 Rayleigh-Brillouin 效应和 Mie 干扰信号测风影响分析

在实际大气中, Rayleigh 通道测量大气风速需考虑温度和 Mie 干扰信号的影响 [19]. 其中, 温度决定了 Rayleigh 散射信号的谱宽, 而 Mie 干扰信号在 Rayleigh 宽光谱上有一个较窄的峰值 (如图 5 所示). 此外, 激光与大气分子相互作用时, 还存在与压强相关的 Brillouin 散射, 并对 Rayleigh

通道测风产生影响 [12,24]. 因此, 考虑 Brillouin 散射的 Rayleigh (简称为 Rayleigh-Brillouin 散射) 谱线形状同时与温度和压强相关, 用 Gaussian 函数已不能恰当描述, 而是采用 Tenti S6 模型来表示 [25]. Tenti S6 模型中, 参数 y 为激光波长与平均自由程的比, 由温度和压强决定, y 越小 Rayleigh-Brillouin 散射谱线形状越接近 Gaussian 线形 [12]. 图 7 为利用 1976 年美国标准大气中的温度和压强廓线计算得到的参数 y 随高度变化及 y 取不同值的 Rayleigh-Brillouin 光谱线形. 由图可知, 在标准大气中, 高度 0—30 km 之间, 参数 y 的取值范围为 0.39—0.01, 且随高度增加而减小; 当高度在 20 km 以上时, Rayleigh-Brillouin 谱线与高斯函数模拟的 Rayleigh 散射光谱基本重合, 此时可忽略 Brillouin 效应.

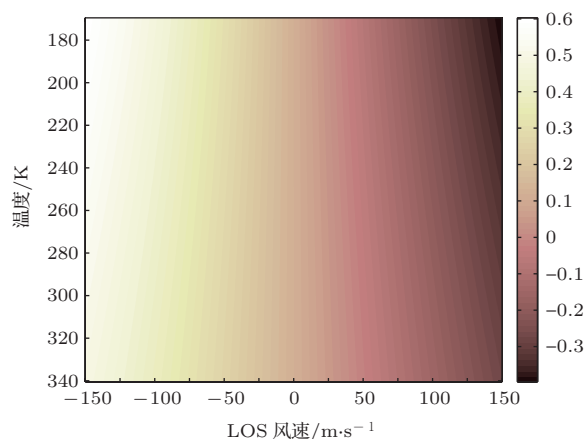


图 6 (网刊彩色) 接收器响应函数 R 随 LOS 风速和温度的变化

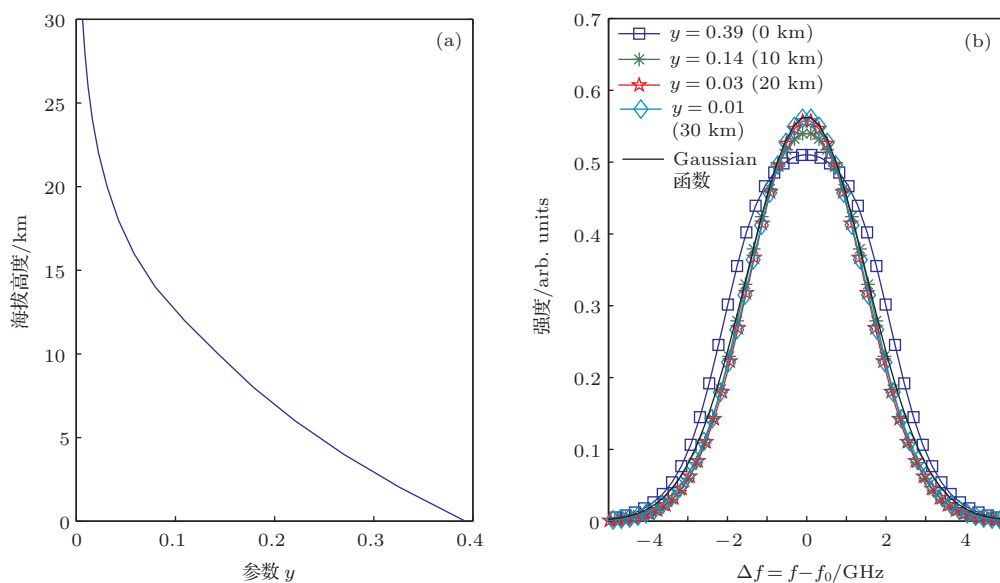


图 7 (网刊彩色) 参数 y 随高度变化及不同 y 时的 Rayleigh-Brillouin 线形 (a) 参数 y 随高度变化; (b) 不同 y 时的 Rayleigh-Brillouin 线形

本节将分析Rayleigh-Brillouin效应和Mie干扰信号对Rayleigh通道测风的影响. 本文仿真时, 压强变化范围为0—1040 hPa, 温度变化范围为170—340 K, LOS风速变化范围为-150—150 m·s⁻¹.

3.1 Rayleigh-Brillouin效应

压强和温度是Rayleigh-Brillouin效应的两个影响因子, 它们都是Rayleigh通道大气风速系统误差的来源. 本小节在不考虑Mie干扰信号的前提下, 分别分析压强和温度对Rayleigh通道LOS风速的影响.

3.1.1 压强

Brillouin散射与压强相关, 并影响大气分子散射回波光谱形状, 如图7(b)所示, 因此, Brillouin效应也影响了接收器响应函数. 图8为接收器响应函数 R 随LOS风速和压强的变化, 其中图8(a)为温度300 K时, 响应函数 R 随LOS风速和压强的变化, 图8(b)压强分别为0, 500, 1000 hPa, 温度分

别为250 K和300 K时的响应函数 R 随LOS风速的变化. 由图8(a)可知, 响应函数 R 的变化范围为-0.3—0.5, 响应函数 R 绝对值随风速增加而增大; 对于某一LOS风速, 响应函数 R 随压强变化不明显. 由图8(b)可知, 某一压强和温度下, 响应函数 R 与LOS风速呈近线性关系, 且在LOS风速为0 m·s⁻¹附近, 响应函数曲线交于一点 ($R \approx 0.1$); 同一压强下, 温度越低响应函数曲线越陡峭, 同一温度下, 压强越大响应函数曲线越陡峭, 温度较压强对响应函数 R 影响大.

图9为响应函数 $R = 0.03$ 时, LOS风速及其误差随温度和压强的变化. 其中, 图9(a)为LOS风速随温度和压强变化, 用 $LOS(P, T)$ 表示, 单位为m·s⁻¹; 图9(b)为考虑和不考虑压强时的LOS风速误差, 用 $LOS(P, T) - LOS(P = 0, T)$ 表示, 单位为m·s⁻¹. 由图9(a)可知, 当响应函数 $R = 0.03$ 时, 对应的LOS风速范围为22—32 m·s⁻¹; LOS风速随压强增大、温度降低而减小, 反之亦然. 由图9(b)可知, 不考虑Brillouin效应时, Rayleigh通道反演的LOS风速误差范围为-2.3—0 m·s⁻¹; 高

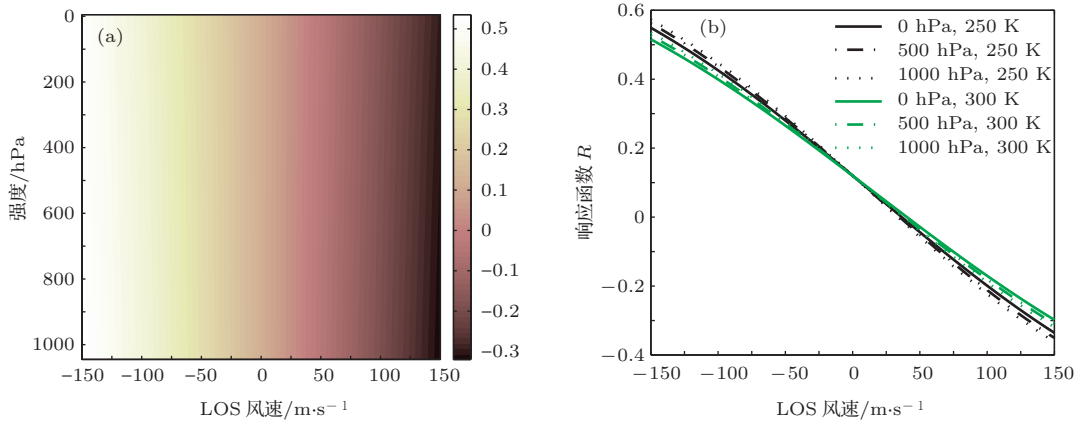


图8 (网刊彩色) 响应函数 R 随LOS风速和压强的变化 (a) $T = 300$ K; (b) $T = 250$ K和 $T = 300$ K

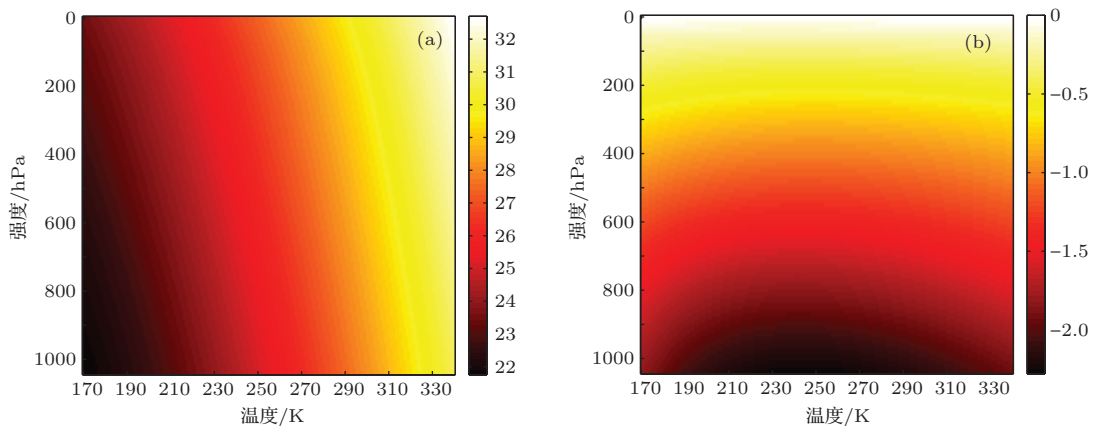


图9 (网刊彩色) 响应函数 $R = 0.03$ 时, LOS风速及其误差随温度和压强的变化关系 (a) $LOS(P, T)$; (b) $LOS(P, T) - LOS(P = 0, T)$

度越低压强越大, LOS 风速误差越大, 在地表风速误差最大; 高度 20 km (压强为 54 hPa) 时, 风速误差可达 0.1—0.2 m·s⁻¹, 此时可不考虑 Brillouin 效应.

图 10 为由图 9(a) 得到的响应函数 $R = 0.03$ 时, LOS 风速对压强的一阶导数随温度和压强的变化, 用 $dLOS/dP$ 表示, 单位为 $m \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$. 由图可知, 压强每变化 1 hPa, LOS 风速变化 -0.001 — $-0.0038 m \cdot s^{-1}$; 随压强减小, LOS 风速变化越快; 同一压强下, 温度在 240—290 K 之间, LOS 风速比在其他温度下变化快.

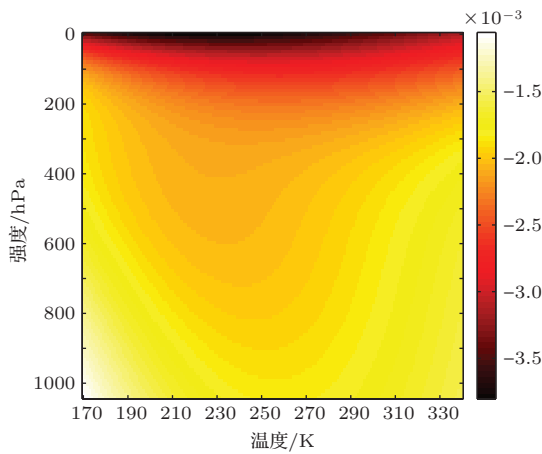


图 10 (网刊彩色) 响应函数 $R = 0.03$ 时, $dLOS/dP$ 随温度和压强的变化

3.1.2 温度

温度决定了 Rayleigh 回波信号光谱宽度. 图 11 为由图 9(a) 得到的响应函数 $R = 0.03$ 时, LOS 风速对温度的一阶导数随温度和压强的变化, 用 $dLOS/dT$ 表示, 单位为 $m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$. 由图可知, 温度每变化 1 K, LOS 风速的变化范围为 0.023—0.069 $m \cdot s^{-1}$, 比 $dLOS/dP$ 大一个量级以上; $dLOS/dT$ 随温度升高而增大, 当温度大于 250 K, $dLOS/dT > 0.05 m \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$.

由以上分析可知, 压强和温度均影响 Rayleigh 通道 LOS 风速反演; 通过比较发现, 温度变化 1 K 导致的 LOS 风速误差比压强变化 1 hPa 大一个量级以上. 因此, 高精度的温度廓线, 可有效减小 Rayleigh 通道 LOS 误差, 这与文献 [24] 的结论一致. Rayleigh 通道反演 LOS 风速时, 大气压强和温度都是由辅助资料提供, 因此需要通过质量控制来减小大气风速反演误差.

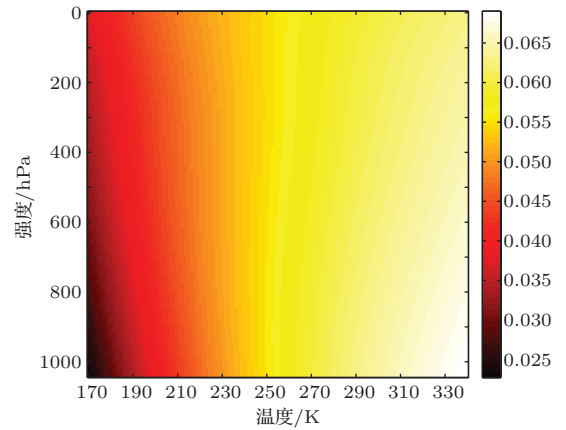


图 11 (网刊彩色) 响应函数 $R = 0.03$ 时, $dLOS/dT$ 随温度和压强的变化

3.2 Mie 干扰信号

根据 Mie 和 Rayleigh 散射理论, 气溶胶后向散射系数 β_{aer} 与波长 λ 的关系 $\beta_{aer} \propto \lambda^{-a}$ (其中, $0 < a < 4$), 大气分子后向散射系数 β_{mol} 与波长 λ 的关系 $\beta_{mol} \propto \lambda^{-4}$. 而在晴空大气条件下, 中高层大气中的气溶胶浓度非常低, 气溶胶大气分子后向散射比 β_{aer}/β_{mol} 非常小, 但当大气中有云层或厚气溶胶层存在时, β_{aer}/β_{mol} 值变大.

图 12 为 Rayleigh 通道响应函数 $R = 0.03$, 压强 $P = 1000 hPa$ 时, LOS 风速误差随温度和气溶胶大气分子后向散射比 β_{aer}/β_{mol} 的变化, 用 $LOS(P = 1000 hPa, T, \beta_{aer}/\beta_{mol}) - LOS(P = 1000 hPa, T, \beta_{aer}/\beta_{mol} = 0)$ 表示, 单位为 $m \cdot s^{-1}$. 由图可知, LOS 风速误差随气溶胶大气分子后向散射比 β_{aer}/β_{mol} 增大、温度降低而增大; 当 $\beta_{aer}/\beta_{mol} < 0.1$ 时, LOS 风速误差范围为 -0.1 — $0.1 m \cdot s^{-1}$, $\beta_{aer}/\beta_{mol} \approx 0.3$ 时, LOS 风速误差小于 $0.4 m \cdot s^{-1}$. 因此, 在晴空条件下, Mie 干扰信号引起的 LOS 风速误差很小, 可以忽略 Mie 干扰信号对 Rayleigh 通道风速反演的影响; 而当大气中存在云层或较厚的气溶胶层时, 气溶胶大气分子后向散射比 β_{aer}/β_{mol} 较大, Rayleigh 通道 LOS 风速反演误差较大, 需考虑 Mie 干扰信号对 Rayleigh 通道风速反演的影响.

4 结果分析

本节将无线电探空数据集 [2,26] 应用到仿真系统中, 并统计分析 Rayleigh 通道风速误差并验证反演算法, 同时通过对不同天气条件下风速反演结果的对比, 分析气溶胶和云对 Rayleigh 通道风速反演

的影响。由第3节分析可知, 温度对LOS风速反演的影响较压强, 有云条件下Mie干扰信号对LOS风速反演的影响较大, 另外激光多普勒测风雷达数据庞大、计算耗时, 本节在统计分析Rayleigh通道风速误差时, 暂不考虑Brillouin效应。

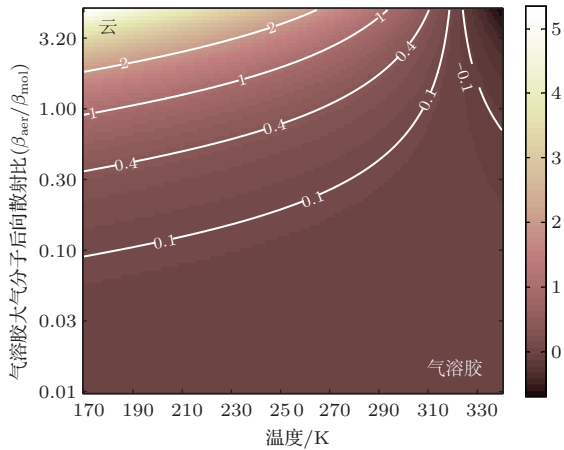


图12 (网刊彩色) 响应函数 $R = 0.03$, 压强 $P = 1000 \text{ hPa}$ 时, LOS 风速误差随温度和气溶胶大气分子后向散射比 $\beta_{\text{aer}}/\beta_{\text{mol}}$ 的变化

图13为利用无线电探空数据集所有有效数据(包含晴空和有云)对Rayleigh通道HLOS风速误差和标准差的统计分析结果, 高度范围为0—30 km, 其中图13(a)为HLOS风速误差随高度变化, 图13(b)为HLOS风速标准差随高度变化。由图13可知, Rayleigh 通道反演的HLOS风速误差小于 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且在高度2 km 以下无法反演得到HLOS风速; 在高度2—20 km之间, HLOS风

速误差标准差保持在 $1\text{—}2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 20 km 以上随高度增加而增大, 最大可达 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其主要原因是Rayleigh通道风速反演以大气分子为探测对象, 在对流层2 km 附近Rayleigh通道HLOS风速反演误差较小, 而随着高度增加大气分子浓度降低, 尤其在20 km 以上, 大气分子浓度非常低, 反演的HLOS风速误差标准差变大; 而研究地区的气溶胶粒子主要集中在对流层2 km 以下, Rayleigh通道受Mie信号的影响较大, 无法反演得到可靠的HLOS风速。实际上, 高度3 km 以下Mie通道可反演得到较高精度的HLOS风速 [2]。

本文同样考虑了大气气溶胶和云分布对Rayleigh通道测风误差的影响。图14为当大气垂直分层为1 km 时, RMA模式(不考虑气溶胶吸湿作用)、无线电探空+无云(仅考虑气溶胶吸湿作用)及无线电探空+云(同时考虑气溶胶吸湿作用和云)三种情况下Rayleigh通道HLOS风速反演最大偏差和标准差的统计结果。由图可知, 当考虑云的分布时, 高度10 km 以下Rayleigh通道HLOS风速最大偏差和标准差明显增大, 这是由于云层多集中在10 km 以下, 当有云层存在时, 对Rayleigh通道HLOS风速反演产生影响, 与3.2节的理论分析结果一致; 当考虑气溶胶分布时, 高度2 km 以下无线电探空+无云情况比RMA模式的最大偏差及标准差稍大, 这是由于研究地区的气溶胶多集中在2 km 以下, 气溶胶的吸湿作用使气溶胶大气分子后向散射比 $\beta_{\text{aer}}/\beta_{\text{mol}}$ 增大, 从而导致Rayleigh通道HLOS风速反演误差增大, 与3.2节的理论分析结果一致。

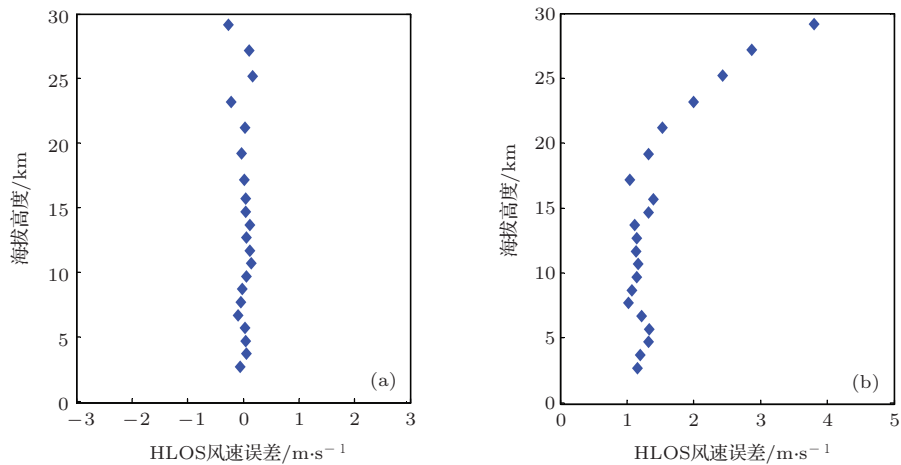


图13 Rayleigh 通道HLOS风速误差及标准差随海拔高度变化 (a) HLOS风速误差; (b) HLOS风速标准差

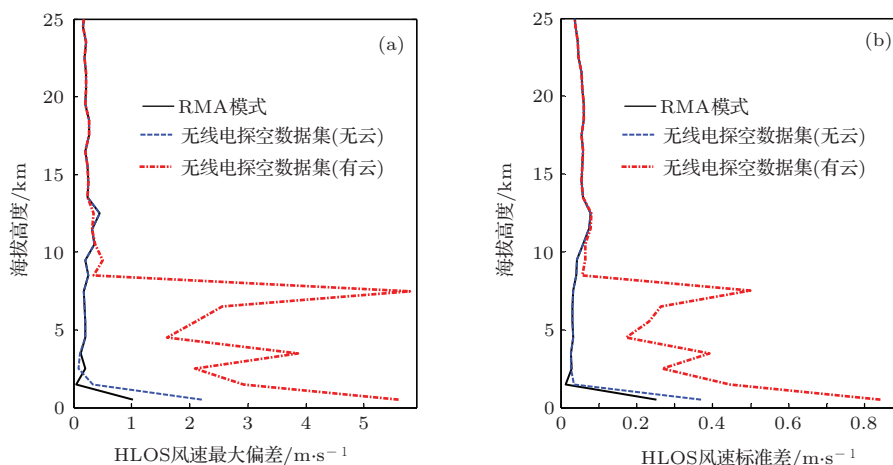


图14 (网刊彩色) Rayleigh 通道 HLOS 风速最大偏差及标准差随海拔高度变化 (大气垂直分层为 1 km) (a) HLOS 风速误差; (b) HLOS 风速标准差

5 结 论

本文仿真研究了星载激光多普勒测风雷达基于连续双通道 F-P 标准具的 Rayleigh 通道信号仿真及其风速反演算法, 理论分析了 Rayleigh-Brillouin 效应和 Mie 干扰信号对 Rayleigh 通道风速反演的影响, 最后利用高垂直分辨率无线电探空数据集仿真结果对 Rayleigh 通道的 HLOS 风速反演误差进行了统计分析. 仿真分析和统计结果表明, 压强、温度和 Mie 干扰信号都对 Rayleigh 通道风速反演产生影响; 压强越大, 温度越低对 LOS 风速反演影响越大, 且温度较压强对 LOS 风速误差影响大; 晴空条件下, Mie 干扰信号对 Rayleigh 通道风速反演的影响可以忽略; 高度 2 km 以下 Rayleigh 通道无法反演 HLOS 风速, 高度 2 km 以上 HLOS 风速误差小于 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, HLOS 风速标准差范围为 $1\text{--}4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且随高度升高而增大; 气溶胶和云的分布导致反演的 HLOS 风速误差及其标准差增大, 在有云条件下, Rayleigh 通道大气风速反演需考虑云的分布. 本文的研究工作对发展我国的星载激光雷达测风技术和中高层大气风场激光探测技术具有重要意义.

感谢荷兰皇家气象协会 Marseille 博士和爱因霍芬科技大学 Houchi 博士提供的帮助和支持.

参考文献

[1] World Meteorological Organization 1998 *WMO Satellite Reports SAT-21. WMO/TD No.913*

[2] Zhang R W, Sun X J, Yan W, Liu L, Li Y, Zhao J, Yan W X, Li H R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 140702 (in Chinese) [张日伟, 孙学金, 严卫, 刘磊, 李岩, 赵剑, 颜万祥, 李浩然 2014 物理学报 **63** 140702]

[3] McKay J A 1998 *Appl. Opt.* **37** 6480

[4] Sun D S, Zhong Z Q, Zhou J, Hu H L, Kobayashi T 2005 *Opt. Rev.* **12** 409

[5] Tang L, Wang Y T, Shu Z F, Dong J H, Wang G C, Xu W J, Hu D D, Chen T D, Dou X K, Sun D S, Cha H 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 114207

[6] Zhu X P, Liu J Q, Chen W B 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 2005 (in Chinese) [竹孝鹏, 刘继桥, 陈卫标 2010 中国激光 **37** 2005]

[7] Tang L, Wang C R, Wu H B, Dong J H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 014213

[8] Du J, Ren D M, Zhao W J, Qu Y C, Chen Z L, Geng L J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024211

[9] Shen F H, Sun D S, Liu C L, Qiu C Q, Shu Z F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 220702 (in Chinese) [沈法华, 孙东松, 刘成林, 仇成群, 舒志峰 2013 物理学报 **62** 220702]

[10] Killeen T L, Hays P B 1984 *Appl. Opt.* **23** 612

[11] Xia H Y, Sun D S, Zhong Z Q, Wang B X, Chen M 2006 *Laser & Infrared* **36** 29 (in Chinese) [夏海云, 孙东松, 钟志庆, 王邦新, 陈敏 2006 激光与红外 **36** 29]

[12] Shen F H, Shu Z F, Sun D S, Wang Z C, Xue X H, Chen T D, Dou X K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060704 (in Chinese) [沈法华, 舒志峰, 孙东松, 王忠纯, 薛向辉, 陈廷娣, 窦贤康 2011 物理学报 **60** 060704]

[13] Shen F H, Shu Z F, Sun D S, Wang Z C, Xue X H, Chen T D, Dou X K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030702 (in Chinese) [沈法华, 舒志峰, 孙东松, 王忠纯, 薛向辉, 陈廷娣, 窦贤康 2012 物理学报 **61** 030702]

[14] Born M, Wolf E (Translated by Yang J S) 1978 *Principles of Optics* (Beijing: Science Press) pp424-444 (in Chinese) [玻恩 M, 沃耳夫 E 著 (杨葭荪译) 1978 光学原理 (北京: 科学出版社) 第 424—444 页]

[15] Flesia C, Korb C. L 1999 *Appl. Opt.* **38** 432

[16] Chi R L, Feng S M, Zhong Z Q, Sun D S, Zhou J, Hu H L 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 36

- [17] Reitebuch O, Lemmerz C, Nagel E, Paffrath U, Durand Y, Endemann M, Fabre F, Chaloupy M 2009 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **26** 2501
- [18] Paffrath U, Lemmerz C, Reitebuch O, Witschas B, Nikolaus I, Freudenthaler V 2009 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **26** 2516
- [19] Garnier A, Chanin M L 1992 *Appl. Phys. B* **55** 35
- [20] Flesia C, Korb C L 1999 *Appl. Opt.* **38** 432
- [21] Kloe J D, Marseille G J, Stoffelen A 2009 http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/vamp_tn3_v0_3_20090421.pdf [2014-03-11]
- [22] Marseille G J, Stoffelen A 2003 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **129** 3079
- [23] Chanin, M L, Garnier A, Hauchecorne A, Porteneuve J 1989 *Geophys. Res. Lett.* **16** 1273
- [24] Dabas A, Denneulin M L, Flamant P, Loth C, Garnier A, Dolfi-Bouteyre A 2008 *Tellus* **60A** 206
- [25] Tenti G, Boley C D, Desai R C 1974 *Can. J. Phys.* **52** 285
- [26] Sun X J, Zhang R W, Marseille G J, Stoffelen A, Donovan D, Liu L, Zhao J 2014 *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **7** 1393

Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (II): Study on the retrieval of atmospheric wind speed for Rayleigh channel based on Fabry-Perot interferometer*

Zhang Ri-Wei¹⁾ Sun Xue-Jin^{1)†} Yan Wei¹⁾ Zhao Jian¹⁾ Liu Lei¹⁾
 Li Yan¹⁾²⁾ Zhang Chuan-Liang¹⁾ Zhou Jun-Hao¹⁾

1) (College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

2) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 25 December 2013; revised manuscript received 2 April 2014)

Abstract

Based on the principle of spaceborne Doppler wind lidar, a simulation system of frequency discrimination is built based on the double sequential Fabry-Perot (F-P) interferometer. The wind retrieval algorithm of Rayleigh channel is simulated and studied. The influence on the retrieved atmospheric line-of-sight (LOS) wind speed in Rayleigh channel by the Rayleigh-Brillouin effect and Mie contamination is systematically analyzed. The horizontal line-of-sight (HLOS) wind error is analysed using the simulated result of the radiosonde dataset. The results show that the wind speeds of the middle and upper atmosphere can be retrieved in Rayleigh channel based on the double sequential F-P interferometer; the Rayleigh-Brillouin effect and Mie contamination influence the accuracy of LOS wind speed retrieval in Rayleigh channel; the Rayleigh channel requires more accurate temperature; Mie contamination can be ignored in clear atmosphere; when Brillouin effect is not considered, below 2 km, the HLOS wind speed cannot be retrieved in Rayleigh channel, and above 2 km, the HLOS wind speed error in Rayleigh channel is less than $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and its standard deviation is $1\text{--}4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Just as the Mie channel, distributions of aerosol and cloud have an influence on wind error for spaceborne Doppler wind lidar in Rayleigh channel. The research results have an important reference value for the development of spaceborne lidar wind technology.

Keywords: Doppler wind lidar, Fabry-Perot interferometer, wind speed, Brillouin effect

PACS: 07.07.Df, 42.62.-b, 42.68.Wt, 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.63.140703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41205125).

† Corresponding author. E-mail: SUNXJ2013@sina.cn