

基于拉曼激光雷达的大气三相态水同步精细探测分光系统的设计与仿真分析

王玉峰 张晶 汤柳 王晴 高天乐 宋跃辉 狄慧鸽 李博 华灯鑫

Design and simulation analysis of spectroscopic system for synchronous atmospheric three-phase water detection based on Raman lidar

Wang Yu-Feng Zhang Jing Tang Liu Wang Qing Gao Tian-Le Song Yue-Hui Di Hui-Ge Li Bo Hua Deng-Xin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 224205 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180644

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180644>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[多波长发光二极管光源雷达系统与近地面低层大气气溶胶探测](#)

Multi-wavelength light-emitting diode light source radar system and near-ground atmospheric aerosol detection

物理学报.2018, 67(18): 184208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180721>

[一种测量大气消光系数边界值的新方法](#)

A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient

物理学报.2018, 67(5): 054205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172008>

[绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能](#)

Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement

物理学报.2018, 67(1): 014207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171834>

[高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析](#)

Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator

物理学报.2017, 66(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184202>

[变形镜高斯函数指数对迭代法自适应光学系统的影响](#)

Influence of Gaussian function index of deformable mirror on iterative algorithm adaptive optical system

物理学报.2015, 64(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094207>

基于拉曼激光雷达的大气三相态水同步精细探测分光系统的设计与仿真分析*

王玉峰[†] 张晶 汤柳 王晴 高天乐 宋跃辉 狄慧鸽 李博 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院精密仪器工程系, 西安 710048)

(2018年4月10日收到; 2018年9月13日收到修改稿)

水是惟一具有三相态的大气参数, 三相态水的分布研究对认识云微物理、云降水物理以及人工影响天气过程具有重要的科学意义. 在大气三相态水的拉曼激光雷达探测技术中, 需首先解决三相态水的高光谱分光技术, 以保证对回波信号的精细提取和高信噪比探测. 考虑到水汽、液态水和固态水的拉曼光谱特性, 本文首先通过理论仿真详细探讨了各拉曼通道中滤光片的选型参数对三相态水光谱重叠特性和探测信噪比的影响; 并针对两者无法同时取得最优解的情况, 提出了利用多目标规划问题的评价函数方法, 分析获得了各通道最优的滤光片参数. 结果表明, 当固态水、液态水和水汽通道窄带滤光片中心波长和带宽分别为 397.9 nm (3.1 nm), 403 nm (5 nm) 和 407.6 nm (0.6 nm) 时, 可获得各通道间最低的光谱重叠度和最佳探测信噪比, 从而实现了三相态水同步探测拉曼分光系统的优化设计. 进一步的仿真结果表明, 当激光雷达探测效率因子为 1800 J·mm·min 时, 在有云条件下系统可获得白天 3.6 km 以上和晴天条件下 4 km 以上的三相态水有效探测, 保证了利用拉曼激光雷达实现对三相态水的同步高信噪比探测, 为后续大气三相态水的拉曼激光雷达同步探测和反演提供了技术和理论支持.

关键词: 三相态水, 拉曼激光雷达, 精细分光, 仿真

PACS: 42.68.Wt, 42.15.Eq, 87.55.Gh, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.67.20180644

1 引言

水汽是惟一具有三相态的大气参数, 相态的变化在全球水循环过程中起着重要的作用. 水汽在云的演变、降水的发生以及变化中都起着重要的作用, 云中液态水不仅是大气水分收支平衡的重要组成部分, 也是人们了解云物理过程的重要微物理参量, 云中过冷水 (0 °C 以下还保持着液态) 更是衡量人工增雨潜力和增雨作业条件的最重要参量之一, 它的实时有效探测对于保障飞机安全及提高人工影响天气的效率更有迫切需求. 因此, 高精度、高时空分辨率水三相态分布的研究, 对于了解云和降水的形成过程、精细分析预测降水、判断人工播云催化条件等方面具有十分重要的意义^[1-4].

激光雷达遥感探测技术是以大气分子及悬浮颗粒物气溶胶为媒介, 可以探测地表到高度 100 km 以内的大气气象参数与光学物理及环境参数. 并且由于具有时空分辨率高、探测灵敏度高和高稳定性等优点, 已成为近些年大气遥感探测的重要技术和手段^[5-7]. 利用拉曼激光雷达探测特定的散射回波信号可反演获得大气水汽、温度和气溶胶的时空分布^[8,9]. 一般的水拉曼激光雷达主要探测频移为 3657 cm⁻¹ 的水汽拉曼信号, 探测水汽和氮气分析的拉曼散射回波信号强度可反演获得大气水汽的垂直分布^[10-13]. 近年来, 有少数的科研院所开展了有关三相态水的研究工作^[14-16]. 2000 年, Veselovski 等^[17] 利用 Nd:YAG 激光器的拉曼激光雷达系统开展了对流层水汽和液态水的探测, 着重讨论了不同大气条件下的相对强度. 2004

* 国家自然科学基金 (批准号: U1733202, 41575027, 41627807, 41027004) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangyufeng@xaut.edu.cn

年, Wang等^[18]采用固水拉曼激光雷达探测了卷云中的固水含量,提出了固水混合比的反演方法,并对比了不同算法得到的固水含量的时序分布. 2012年,武汉大学 Yi等^[19]利用32通道光栅光谱仪获得了三相态水的完整拉曼光谱,并探测得到了0—6 km高度范围内大气水汽和液态水的回波信号强度. 上述研究工作主要聚焦在液态水和水汽的拉曼探测或者固水的拉曼偏振探测,对三相态水的同步探测和精确反演等方面还有待深入研究^[20–22].

为了实现三相态水的高精细探测,减小探测误差,对三相态水的光谱串扰和信噪比的仿真分析尤为重要. 考虑到三相态水的光谱特性,本文对三相态水的光谱重叠特性和信噪比进行了理论仿真,详细讨论了不同滤光片选型参数对三相态水光谱重叠度的影响,并结合通道探测信噪比的仿真结果,利用多目标规划问题的评价函数法,以最小的光谱重叠度和最高的探测信噪比为目标,获得了各通道最优的滤光片参数以及对应的光谱重叠度信息,从而实现了三相态水同步探测拉曼分光系统的优化设计,并为三相态水的同步精细探测和反演提供了可靠的数据支撑.

2 三相态水的拉曼激光雷达系统与反演方法

2.1 三相态水同步探测拉曼激光雷达系统

本文提出的三相态水同步探测拉曼激光雷达系统结构如图1所示. 系统激励光源采用 Nd:YAG

脉冲激光器的三倍频输出,激光波长354.7 nm,激光能量300 mJ,重复频率10 Hz. 脉冲激光经扩束准直后射入大气,大气回波信号经直径600 mm的牛顿式望远镜接收,并耦合进多模光纤,经透镜准直后进入由二向色镜DM (dichroic mirrors)、分束镜BS (beam splitter) 和窄带滤光片 IF (narrow-band interference filters) 构成的拉曼分光系统,形成独立的5个通道,其中通道1为Mie-Rayleigh 散射通道,通道2为氮气拉曼散射通道,通道3—5分别为固态水、液态水和水汽拉曼散射通道,实现对大气三相态水的同步探测. 各通道回波信号由光电倍增管(PMT)接收. 具体分光思路为: 首先散射信号经二向色镜DM1反射,再经由中心波长为354.7 nm、带宽为0.5 nm的窄带宽滤光片IF1,构成米-瑞利探测通道1; 由DM1透射的光被DM2反射,再经由中心波长为386.7 nm、带宽为0.5 nm的窄带宽滤光片IF2,作为氮气拉曼散射通道2; 由DM2透射的光再经BS1和BS2以及IF3-5的组合,分别实现对不同中心波长和带宽的三相态水回波信号的精细分光,分别构成固态水、液态水和水汽拉曼散射通道. 其中二向色镜DM1对波长小于365 nm的光具有极高的反射率(> 99%),而对波长大于380 nm的光具有很高的透射率(> 90%). 二向色镜DM2对波长小于390 nm的光具有极高的反射率(> 99%),对波长大于395 nm的光具有很好的透射率(> 90%). 各相态水通道中窄带干涉滤光片的设计和选型参数是本文讨论的主要内容.

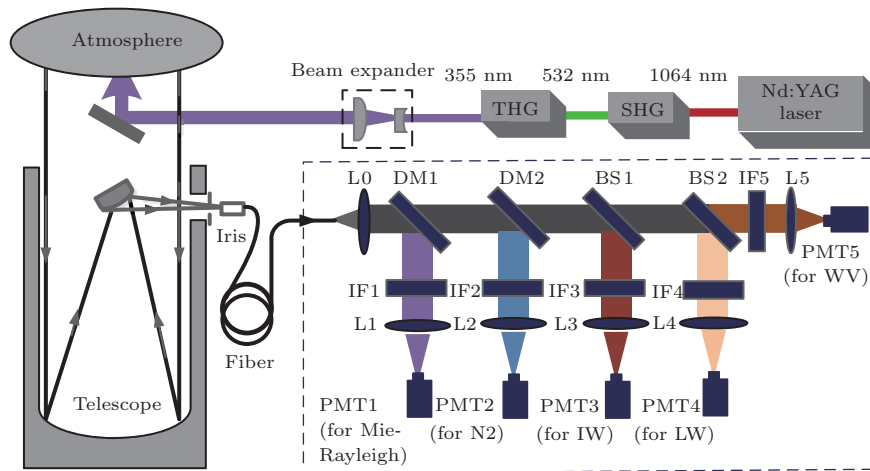


图1 三相态水同步探测拉曼激光雷达系统示意图

Fig. 1. Diagram of Raman lidar for synchronous three-phase water detection.

2.2 大气三相态水的反演方法

大气三相态水混合比可分别利用各相态水的拉曼散射回波信号强度与氮气分子的拉曼散射回波信号强度做归一化处理. 水汽混合比廓线 $W_{WV}(z)$ 可表示为^[23]

$$W_{WV}(z) = \frac{P_{WV}(z)}{P_N(z)} \cdot \frac{k_N}{k_{WV}} \cdot \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_{WV}(\pi)} \times \exp \left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_{WV}(z') - \alpha_N(z')] dz' \right\}, \quad (1)$$

式中 P 为回波信号强度; k 为各通道常数; σ 为后向散射截面; 指数项为大气透过率修正函数, 与消光系数 α 有关. 液态水混合比 $W_{LW}(z)$ 可表示为^[16]

$$W_{LW}(z) = \frac{P_{LW}(z) - C_{LW}P_{WV}(z) - C_{LI}P_{IW}(z)}{P_N(z)} \cdot \frac{k_N\sigma_N(\pi)}{k_{LW}\sigma_{LW}(\pi)} \times \exp \left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_{LW}(z') - \alpha_N(z')] dz' \right\} - f_{AE} \frac{1}{\Delta Z_{CB}} \int_{z_{CB}-\Delta z}^{z_{CB}} \frac{P_{LW}(z') - C_{LW}P_{WV}(z')}{P_N(z')} \times \exp \left\{ \int_{z_{CB}-\Delta z}^{z_{CB}} [\alpha_{LW}(z') - \alpha_N(z')] dz' \right\} dz', \quad (2)$$

式中各下标表示液态 (LW)、气态 (WV)、固态 (IW) 和氮气 (N); 第一项中考虑了在液态水通道中水汽和固态水的影响, C_{LW} 和 C_{LI} 分别代表在液态水通道中液态水和水汽以及液态水和固态水的光谱重叠度; 第二项代表了荧光的影响, 在本文的分析中暂不考虑. 同理, 固态水混合比廓线 $W_{IW}(z)$ 表示为^[16]

$$W_{IW}(z) = \frac{P_{IW}(z) - C_{IL}P_{LW}(z)}{P_N(z)} \cdot \frac{k_N\sigma_N(\pi)}{k_{IW}\sigma_{IW}(\pi)} \times \exp \left\{ \int_{z_0}^z [\alpha_{IW}(z') - \alpha_N(z')] dz' \right\}, \quad (3)$$

式中考虑了在固态水通道中的液态水影响, C_{LW} 表示在固态水通道中固态水和液态水的光谱重叠度. 可见, 在实现对三相态水的同步精细反演技术中, 在获得各通道相态水的拉曼散射回波信号强度的同时, 应解决三相态水的光谱重叠信息.

3 理论仿真与分析

液态水、固态水和水汽的拉曼散射谱线部分重叠特性给三相态水的高精细探测和精确反演带来

了较大的困难, 同时也造成了对大气温湿度探测的误差. 为了确保后续理论仿真的可靠性, 首先利用拉曼光谱仪对液态水和固态水的拉曼光谱曲线进行了实验测量, 结果如图 2 所示, 图中同时给出了水汽拉曼散射光谱. 从图中可以看出, 液态水和固态水拉曼光谱与水汽有很大不同, 其光谱信息在 395—408 nm 波长范围内连续, 且有明显重叠区, 中心波长较为接近, 其中液态水和固态水的峰值波长分别位于 402.9 nm 和 398.7 nm 左右, 带宽均为 6—8 nm; 同时可以看到水汽和液态水拉曼光谱也存在部分重叠现象. 因此, 有必要深入分析三相态水光谱的重叠特性及其对拉曼激光雷达探测性能的影响. 由于各拉曼通道内滤光片选型直接决定了三相态水的拉曼光谱重叠度, 因此, 拉曼分光系统的优化设计首先应考虑各相态水拉曼通道中滤光片参数对信号和重叠度的影响.

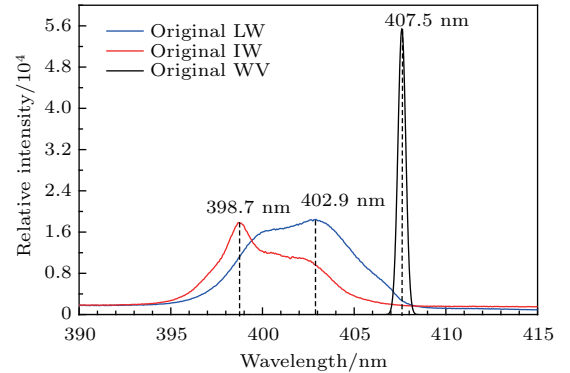


图 2 三相态水的拉曼光谱曲线

Fig. 2. Raman spectrum curve of three-phase water.

3.1 三相态水光谱重叠特性的讨论

首先详细讨论各拉曼通道中滤光片的选型参数对三相态水光谱重叠度的影响. 光谱重叠度定义为在某相态的水通道中包含其他相态水信号的比例. 假设各相态水的光谱函数为 G_x , 滤光片透过率函数为 $Tr_x(\lambda)$, 则经滤光片提取的光谱信号强度由两者的卷积实现, 表示为

$$H_x(\lambda, \Delta\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} G_x(\tau) \cdot Tr_x(\lambda, \Delta\lambda, \tau) d\tau; \quad (4)$$

在某相态水通道中, 所含其他相态水的重叠度 $C_{xx'}$ 可表示为

$$C_{xx'}(\lambda, \Delta\lambda) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_{x'}(\tau) \cdot Tr_x(\lambda, \Delta\lambda, \tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} G_x(\tau) \cdot Tr_x(\lambda, \Delta\lambda, \tau) d\tau}, \quad (5)$$

式中 λ 和 $\Delta\lambda$ 分别代表与波长和带宽相关的变量, τ 为积分变量, x 和 x' 分别表示固态水、液态水或水汽. 其中滤光片透过率函数 $T_x(\lambda)$ 可近似表述为高斯函数的形式,

$$\text{Tr}(\lambda, \Delta\lambda) = A \cdot \exp\left[\frac{-4 \times \ln 2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda^2}\right], \quad (6)$$

式中 λ_0 为滤光片中心波长; A 为峰值透过率, 在本文中取 0.5.

我们详细讨论了在固态水通道中滤光片的选取对光谱信号强度和重叠度的影响, 主要为滤光片中心波长 (central wavelength, CW) 和半高全带宽 (full width at half maximum, FWHM). 图 3(a) 给出了固态水光谱信号强度的变化情况, 可以看出, 选取不同参数的滤光片所提取的固态水光谱信

号强度差异较大. 为了统一和归一化表示, 图 3—图 5 均采用信号相对强度来表示各相态水光谱信号强度的变化趋势, 其最大值为 1. 在相同的中心波长下, 固态水信号相对强度将随着滤光片带宽的增大而增强, 如滤光片中心波长为 399 nm 时, 当带宽从 2 nm 增加至 10 nm, 信号相对强度由 0.3 左右增大至 0.9 以上. 图 3(b) 给出了滤光片选型对通道中液态水重叠度的影响. 当滤光片中心波长大于 400 nm 时, 固态水通道中的液态水重叠度将达到 95% 以上, 表明在这种情况下液态水光谱信号将完全覆盖固态水光谱信号, 不利于探测. 当滤光片中心波长小于 398 nm 且带宽小于 4 nm 时, 液态水重叠度可取得相对较小值, 小于 60% 左右. 要说明的是, 由于水汽的拉曼光谱距离固态水较远, 且水汽带宽很窄, 因此固态水通道中水汽的光谱重叠度在这里不做讨论.

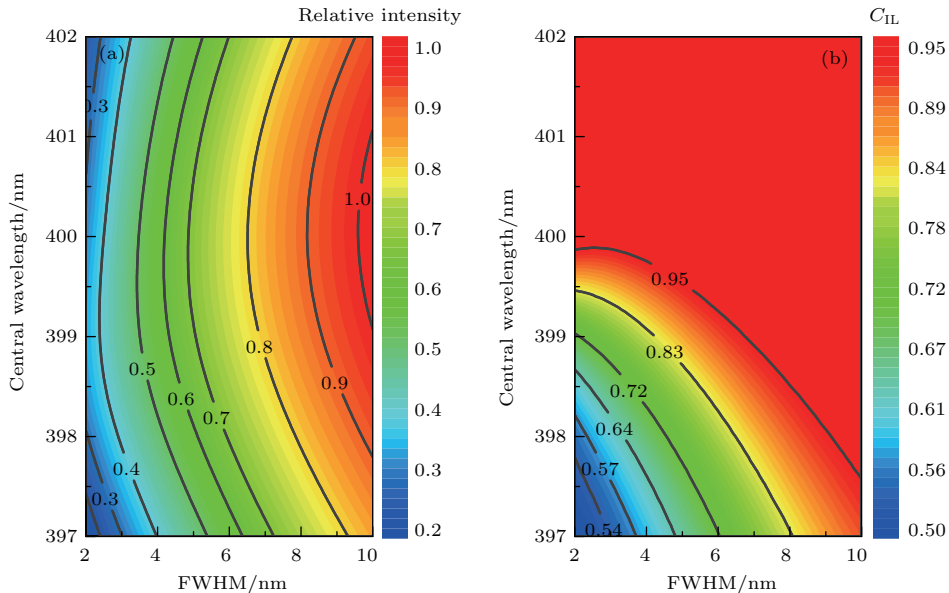


图 3 固态水拉曼通道中滤光片参数对信号相对强度和重叠度的影响 (a) 信号相对强度; (b) 液态水重叠度

Fig. 3. Influences of filter parameters on signal relative intensity and overlap in ice water Raman channel: (a) Signal relative intensity; (b) overlap for liquid water.

在液态水通道中, 需要同时考虑固态水和水汽的重叠度. 图 4 给出了在液态水拉曼通道中滤光片选取参数对信号相对强度和重叠度的影响. 图 4(a) 对应液态水信号相对强度随滤光片参数的变化情况. 在相同的中心波长下, 信号相对强度也随着滤光片带宽的增加而增强, 当滤光片中心波长为 403 nm 左右, 带宽从 3 nm 增加至 1 nm 时, 信号相对强度由 0.5 左右增大至 1. 可见滤光片带宽的增加有利于获得更高强度的信号, 但是, 随之

所带来的水汽与固态水的重叠度却呈现不同的分布. 图 4(b) 和图 4(c) 分别给出了液态水通道中液态水和水汽以及液态水和固态水的重叠度变化情况. 可以看出, 在相同的中心波长下, 水汽重叠度随着带宽的增加而明显增大, 如滤光片中心波长取 403 nm, 当带宽由 2 nm 增大到 10 nm 时, 水汽重叠度从 4% 增大至 2% 左右. 同时, 水汽重叠度随着滤光片中心波长的红移呈现增大的趋势, 如滤光片带宽固定为 6 nm、滤光片中心波长从 399 nm

红移至 405 nm 时, 水汽信号的重叠度也由 <10% 提高到 > 30%. 图 4(c) 则给出了固态水信号重叠度的变化情况: 当滤光片中心波长在 <400 nm 时, 对应的固态水重叠度将达到 88% 以上; 当滤光片中心波长在 400—403 nm 范围内, 固态水重叠度为 40%—80%; 当滤光片中心波长在 403—405 nm 范围内且带宽小于 6 nm 时, 固态水重叠度值明显降低, 在 30%—40% 范围内.

图 5 给出了水汽拉曼通道中滤光片参数对水汽信号相对强度和重叠度的影响. 当滤光片中心波长为 407.6 nm, 带宽小于 0.6 nm 时, 信号相对强度为 0.6 左右; 随着带宽从 0.6 nm 增大至 2 nm 时, 信号相对强度逐渐增强. 从图 5(b) 给出的水汽通道中液态水的重叠度分布情况来看, 滤光片中心波长和带宽对该通道中水汽和液态水光谱信号的占比呈现较为复杂的变化关系. 当滤光片中心波长为

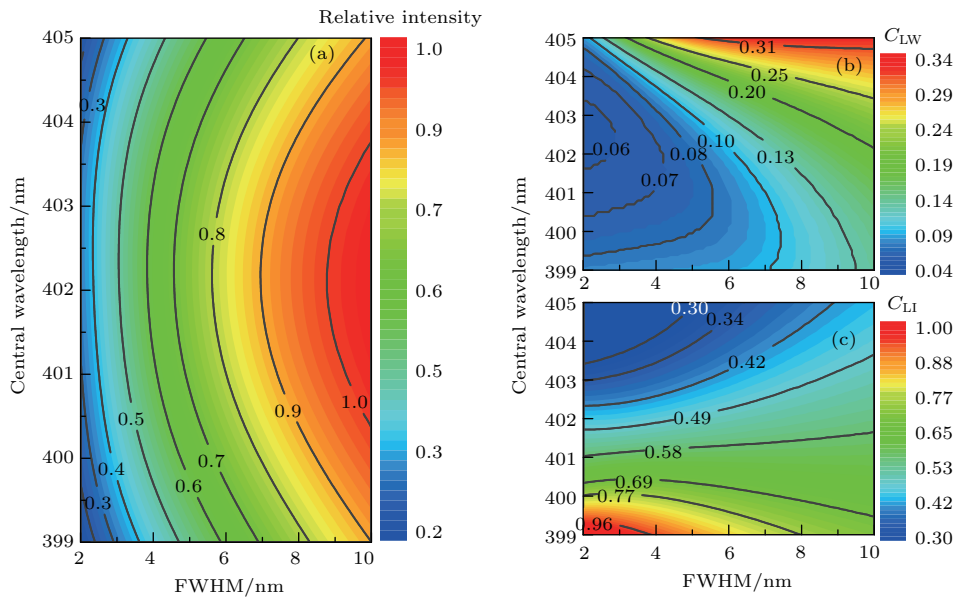


图 4 液态水拉曼通道中滤光片参数对信号相对强度和重叠度的影响 (a) 信号相对强度; (b) 水汽重叠度; (c) 固水重叠度
Fig. 4. Influence of filter parameters on signal relative intensity and overlap in liquid water Raman channel: (a) Signal relative intensity; (b) overlap for water vapor; (c) overlap for ice water.

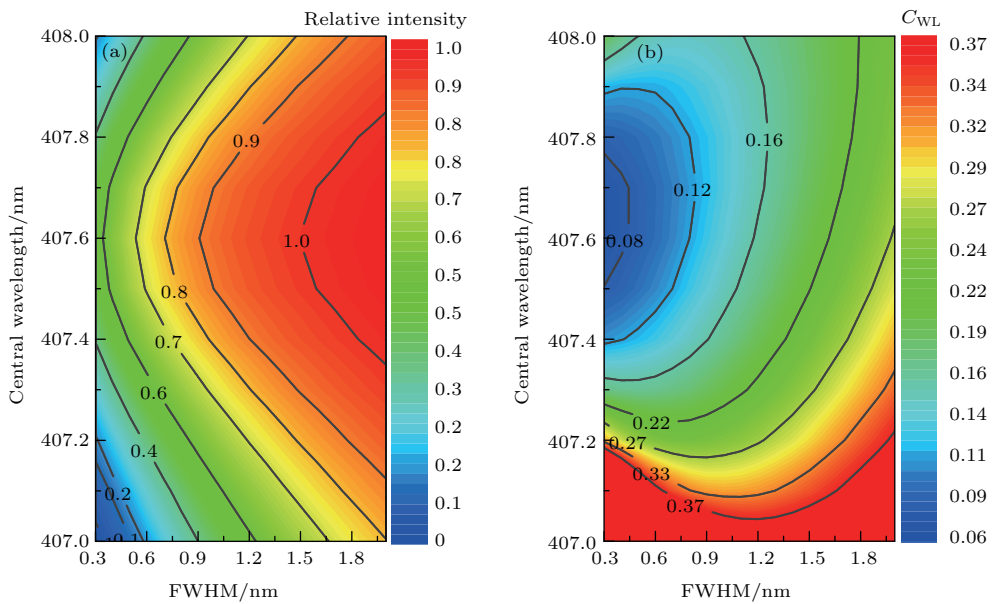


图 5 水汽拉曼通道中滤光片参数对信号相对强度和重叠度的影响 (a) 信号相对强度; (b) 液态水重叠度
Fig. 5. Influence of filter parameters on signal relative intensity and overlap in water vapor Raman channel: (a) Signal relative intensity; (b) overlap for liquid water.

407—407.2 nm左右时, 液态水的重叠度将达到30%以上, 反映出液态水信号对水汽信号的干扰作用. 当滤光片中心波长407.4—407.8 nm和带宽<1 nm时, 液态水的重叠度取值较低<10%, 且重叠度取值将随着带宽的减小而降低, 最低为<6%. 因此, 各拉曼通道中的滤光片选取参数对各相态水光谱信号强度和其他相态的重叠度有着重要的影响, 即如何选取滤光片会直接影响光谱信号强度以及其他相态水的串扰, 在增强光谱信号强度的同时, 尽可能地降低混入该通道中的其余相态水信号, 即减小重叠度问题, 对于三相态水的拉曼精细分光 and 反演是极为关键的.

3.2 各通道探测信噪比的讨论

在白天探测时, 滤光片选取参数在一定程度上又直接决定了白天太阳背景光的强弱, 从而影响拉曼激光雷达的白天探测性能. 因此, 我们继续引入各拉曼通道的白天探测信噪比作为分析对象, 讨论滤光片选取参数对各相态水拉曼探测信噪比的影响. 根据激光雷达方程, 大气三相态水的拉曼散射

回波信号功率 P_x 可表示为

$$P_x(z) = k_x P_0 z^{-2} \sigma_x(\pi) N_x(z) T_0(z) T_x(z), \quad (7)$$

式中 k 为各拉曼散射通道因子; $N(z)$ 为随高度变化的分子数密度; T 为不同波长下的大气透过率, 与消光系数有关; $\sigma(\pi)$ 是拉曼后向散射截面, 在354.7 nm激发下, 固态水、液态水汽和水汽的拉曼散射截面分别约为 54×10^{-30} , 46×10^{-30} 和 $6.115 \times 10^{-30} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$. 进入激光雷达系统的太阳背景光强度为

$$E_b(\lambda) = K \cdot S_b(\lambda) \cdot A_r \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\pi}{4} \theta^2, \quad (8)$$

式中 $S_b(\lambda)$ 为太阳背景辐射照度, θ 为接收望远镜的视场角, A_r 是望远镜接收面积, $\Delta\lambda$ 为光谱透射窗口. 系统仿真参数具体为: 激光器能量300 mJ, 望远镜口径400 mm, 探测累计时间8 min的情况下, 在白天激光工作波长354.7 nm附近的太阳背景辐射照度约为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$. 本文中采用一组有云条件的大气散射作为模型, 如图6(a)所示, 并利用标准大气模型进行理论数值仿真, 获得进入望远镜接收系统的各通道大气回波信号强度分布, 如图6(b)所示.

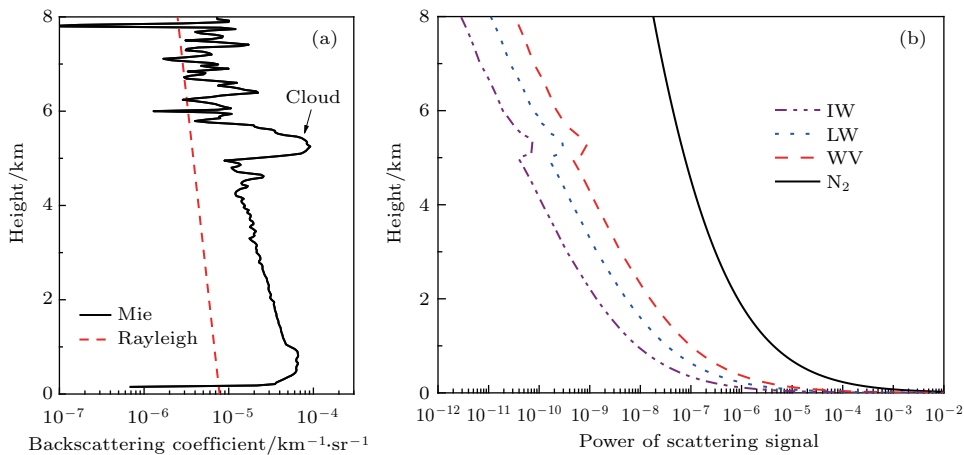


图6 激光雷达系统探测信噪比仿真模型 (a) 一组有云条件下的大气散射模型; (b) 各通道回波信号强度

Fig. 6. A model for system signal-to-noise ratio simulation: (a) Scattering model under cloud condition; (b) intensity distribution in each Raman channel.

进而讨论不同高度处各三相态水拉曼通道的探测信噪比随滤光片带宽和中心波长的变化趋势. 以3 km处为例, 获得的各通道信噪比随滤光片参数的变化趋势如图7所示. 其中图7(a)对应固态水拉曼通道的信噪比分布, 可以看出, 当滤光片带宽由2 nm增大至10 nm时, 通道信噪比呈现先逐渐增大后逐渐降低的变化趋势, 表明带宽逐渐增大时引起的信号增强, 随之信号逐渐被增强的太阳背景

噪声淹没. 图7(b)和图7(c)分别对应液态水通道和水汽通道的信噪比变化趋势. 同样可以看出, 滤光片中心波长和带宽明显影响了白天的探测信噪比, 当液态水通道滤光片中心波长和带宽分别在402—403.5 nm范围和4—7 nm时, 可获得较高的探测信噪比, 当水汽通道滤光片中心波长和带宽分别在407.5—407.7 nm范围和0.45—1.0 nm时, 可获得较高的探测信噪比.

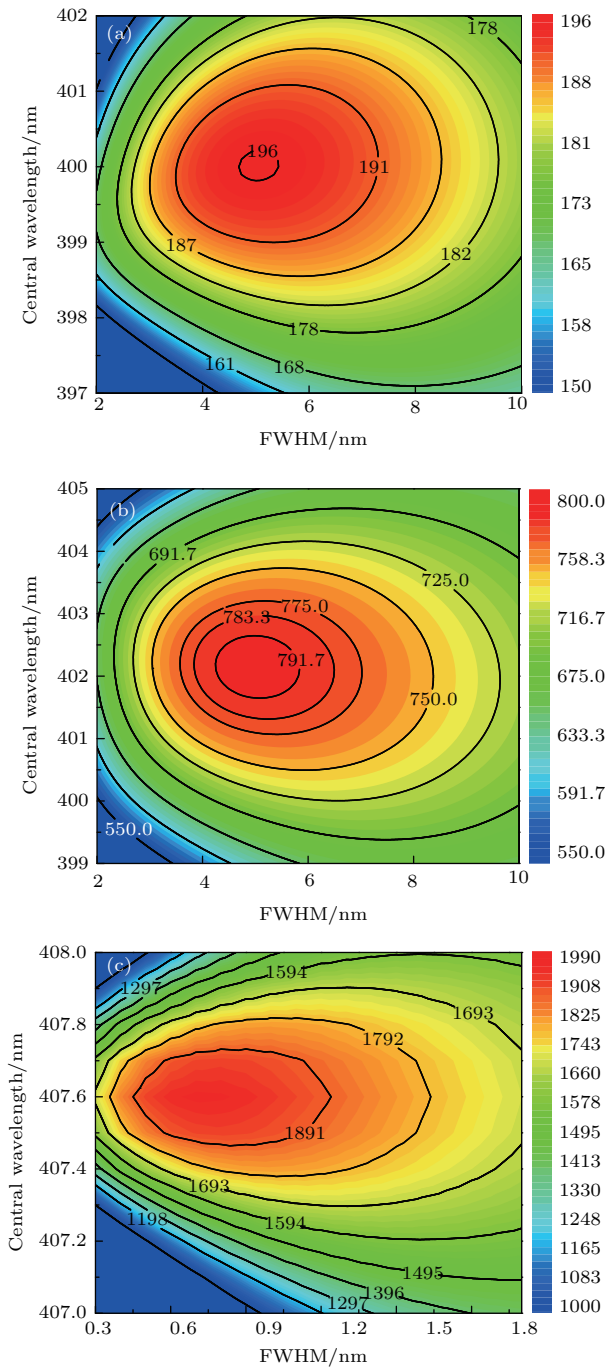


图7 滤光片参数对各拉曼通道探测信噪比的影响 (a) 固态水通道; (b) 液水通道; (c) 水汽通道

Fig. 7. Influence of filter parameters on SNR in each Raman channel: (a) Ice water Raman channel; (b) liquid water Raman channel; (c) water vapor Raman channel.

4 基于多目标规划问题的评价函数优化

上述分析表明, 某相态水通道的光谱信号强度、信噪比和重叠度通常无法同时取得最优解. 在实际探测中, 考虑到三相态水通道内的光谱信号强度和重叠度分布, 应满足通道总能量和信噪比尽可能大, 而其他信号的串扰即通道的重叠度尽可能小. 因此滤光片参数的优化选取涉及到求多目标规划问题的求解. 这里采用多目标规划问题的评价函数法, 其基本思想是根据所考察的问题的特点和决策意图来构造某类评价函数, 将求解多目标问题转化为单目标问题^[24].

首先将某通道内的光谱信号强度定义为目标函数一, 表示为

$$\max U_1 = I(\lambda, \Delta\lambda); \quad (9)$$

将通道内的重叠度定义为目标函数二,

$$\min U_2 = C(\lambda, \Delta\lambda); \quad (10)$$

将某高度处通道探测信噪比定义为目标函数三,

$$\min U_3 = SNR(\lambda, \Delta\lambda). \quad (11)$$

自变量分别为滤光片中心波长和带宽. 将上述多目标函数归一化后转化为求最大值的单目标函数,

$$\max U = \frac{U_1}{\max(I)} - \frac{U_2}{\max(C)} + \frac{U_3}{\max(SNR)}. \quad (12)$$

求解此约束非线性规划, 可分别得到固态水、液态水和水汽三个通道对应的评价函数与滤光片参数的变化关系, 如图8所示, 红色区域对应的横坐标和纵坐标分别为滤光片带宽和中心波长的最优解范围. 其中图8(a)是固态水通道的评价结果, 得到中心波长的最优解在398 nm左右, 带宽的取值在3—5 nm范围内; 图8(b)为液态水通道的评价结果, 当中心波长取403 nm左右, 带宽取值在4—7 nm之间时, 评价函数有最优解范围; 图8(c)表示水汽通道的评价结果, 当中心波长取407.6 nm左右, 带宽取值在0.3—1 nm之间时, 评价函数可取得最优解.

表1 优化后的各通道滤光片参数及重叠度

Table 1. Filter parameters and relative overlap after optimized.

Raman channel	Ice water	Liquid water	Water vapor
Central wavelength/nm	397.9	403.5	407.6
Full width at half maximum/nm	3.1	5.0	0.6
Overlap	$C_{IL} = 0.513$	$C_{LI} = 0.37$ $C_{LW} = 0.128$	$C_{WL} = 0.095$

进而, 根据最优范围可求得各相态水通道中滤光片的最优参数, 具体参数见表 1. 当固态水、液态水和水汽通道中窄带滤光片的中心波长和带宽分别为 397.9 nm (3.1 nm), 403.5 nm (5.0 nm) 和 407.6 nm (0.6 nm) 时, 可获得各通道评价函数的最大值, 此时保证了各拉曼通道将同时具有通道间最

低的光谱重叠度值和较高的探测信噪比, 从而实现了三相态水同步探测拉曼分光系统的优化设计, 也为三相态水的同步拉曼精细分光 and 反演提供了理论依据.

同时, 进一步仿真获得了各三相态水通道的白天探测性能. 主要讨论系统参数对大气三相态水探

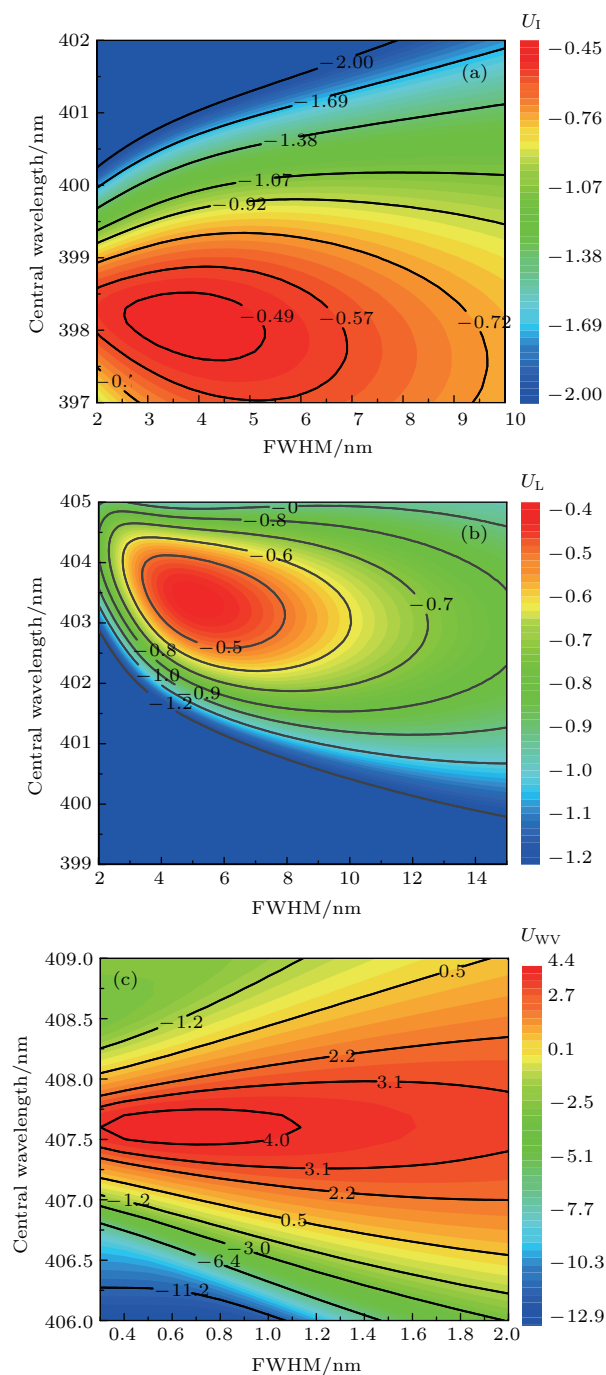


图 8 各相态水通道评价函数结果 (a) 固水通道; (b) 液水通道; (c) 水汽通道

Fig. 8. Evaluation results in each phase-state water channel: (a) Ice water channel; (b) liquid water channel; (c) water vapor channel.

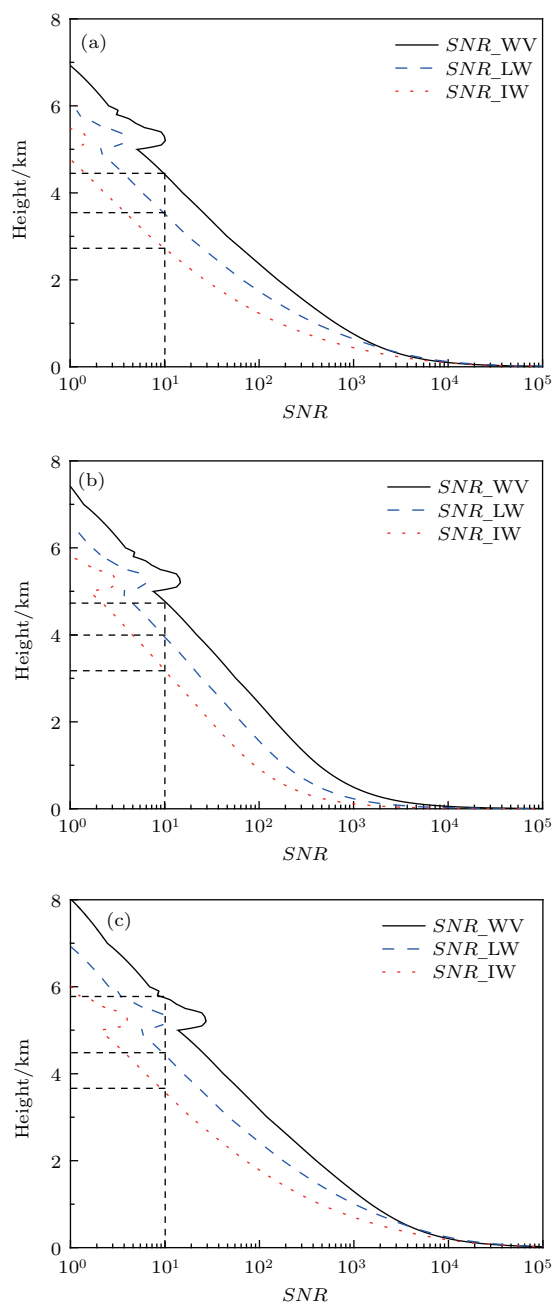


图 9 有云模型下不同探测效率因子的拉曼激光雷达系统白天探测信噪比比较 (a) 640 J·mm·min; (b) 960 J·mm·min; (c) 1800 J·mm·min

Fig. 9. Influences of different efficiency factor on SNR curves for three-phase water daytime measurement of Raman lidar under cloudy model: (a) 640 J·mm·min; (b) 960 J·mm·min; (c) 1800 J·mm·min.

测信噪比的影响,在此采用激光能量、望远镜口径和积分时间的乘积作为激光雷达探测效率因子 γ ,分别讨论不同探测效率因子对白天三相态水探测性能的影响.图9分别给出了当探测效率因子 γ 分别为640, 960和1800 J·mm·min时的结果比较.随着探测效率因子的增大,系统探测信噪比明显增强.当 γ 由640 J·mm·min增大至1800 J·mm·min时,水汽通道的有效探测距离由小于4.5 km增加

至约6 km,液态水和固态水通道的探测性能也由3.68 km延伸至4.5 km,从2.75 km延伸至3.6 km.同时,对无云模型下的探测信噪比也进行了比较,结果如图10所示.可以看出,在无云条件下也得到同样的结论.当 γ 由640 J·mm·min增大至1800 J·mm·min时,水汽通道的有效探测距离可达到7 km,同时可获得5 km和4 km高度范围内的液态水和固态水有效探测.

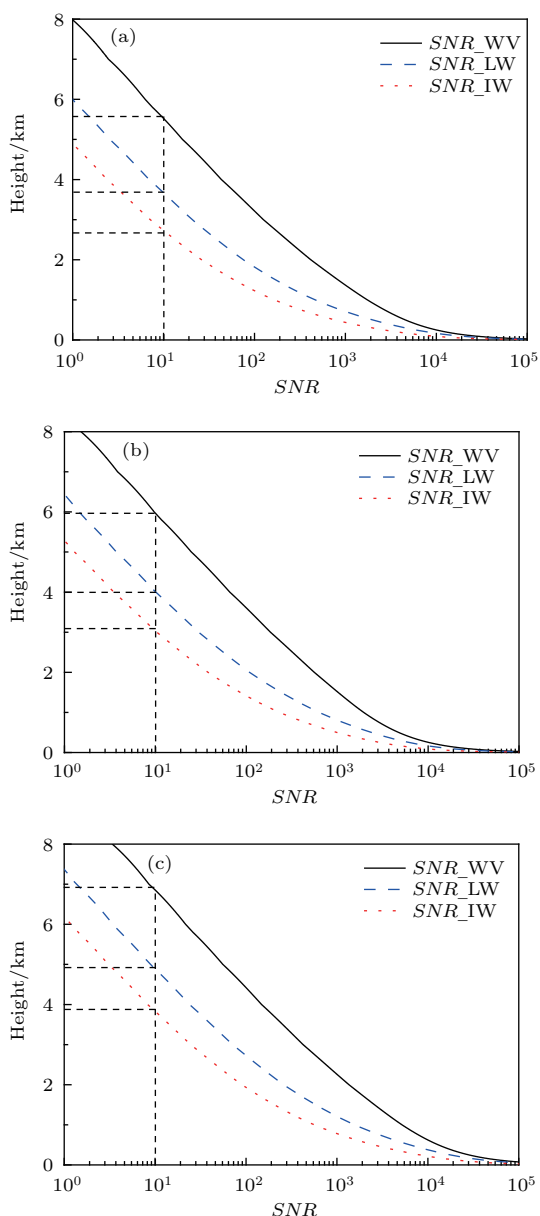


图10 晴天条件不同探测效率因子的拉曼激光雷达系统白天探测信噪比比较 (a) 640 J·mm·min; (b) 960 J·mm·min; (c) 1800 J·mm·min
 Fig. 10. Influences of different efficiency factor on SNR curves for three-phase water daytime measurement of Raman lidar under clear model: (a) 640 J·mm·min; (b) 960 J·mm·min; (c) 1800 J·mm·min.

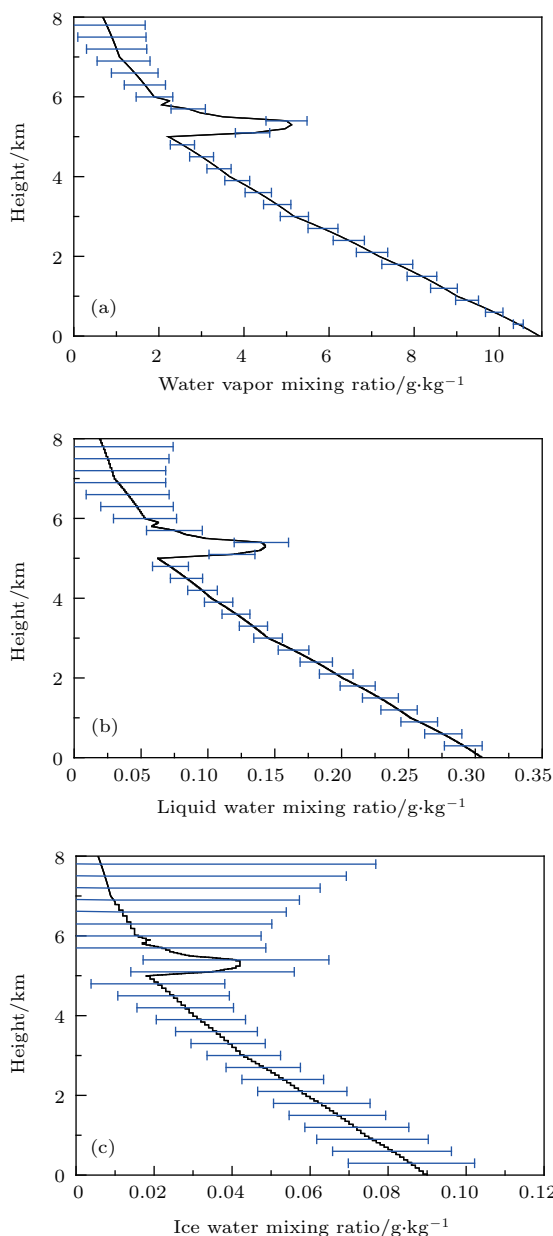


图11 三相态水混合比的反演廓线和探测误差 (a) 水汽混合比; (b) 液态水混合比; (c) 固态水混合比
 Fig. 11. Retrieved mixing ratio profiles of three-phase water and measurement errors and measurement error: (a) Water vapor mixing ratio; (b) liquid water mixing ratio and (c) ice water mixing ratio.

5 大气三相态水混合比廓线的仿真

本文提出的拉曼激光雷达系统的最终目标是获得大气三相态水的垂直分布. 利用仿真的激光雷达三相态水回波信号强度, 根据大气三相态水的同步反演方法, 即(1)—(3)式, 反演获得了各相态水混合比廓线, 结果如图11所示. 其中各相态水光谱重叠度值见表1. 图11(a)给出了反演获得的大气水汽混合比廓线, 大气底层的水汽混合比达到11 g/kg, 随着高度的增加水汽含量逐渐下降, 在5—6 km的云层内水汽含量急剧增强, 表明云层内丰富的大气水汽含量. 图11(b)和图11(c)分别对应液态水和固态水含量随高度的变化, 同样呈现了随高度逐渐下降且在云层内增强的趋势. 同时, 从数值上比较, 大气中液态水混合比和固态水混合比明显低于水汽含量, 在大气底层液态水混合比为0.3 g/kg, 而固态水混合比仅为0.09 g/kg. 另外, 图中误差棒显示各相态水探测误差, 可观察到随着探测高度的升高, 各相态水混合比的探测误差逐渐增大, 而固态水的探测误差明显大于液态水以及水汽的探测误差. 这主要是由于固态水回波信号较弱, 探测信噪比低造成的, 这也从侧面反映了必须提高拉曼激光雷达的探测信噪比, 以保证实现对大气三相态水的同步精细探测技术.

6 结 论

大气三相态水的同步研究对于认识云微物理、云降水物理以及人工影响天气过程具有重要的科学意义. 利用拉曼激光雷达探测技术可实现对大气三相态水的同步精细探测, 但是三相态水的高光谱分光技术是首要解决的关键技术之一. 考虑到三相态水的光谱特性, 本文对三相态水的光谱重叠特性和信噪比进行了理论仿真, 详细讨论了不同滤光片选型参数对三相态水光谱重叠度以及探测信噪比的影响. 并利用多目标规划问题的评价函数法, 以最小的光谱重叠度和最高的探测信噪比为目标, 获得了各拉曼通道最优的滤光片参数. 仿真结果表明, 当固态水、液态水和水汽通道窄带滤光片中心波长和带宽分别为397.9 nm (3.1 nm), 403 nm (5 nm)和407.6 nm (0.6 nm)时, 可获得各通道间最低的光谱重叠度值和最佳探测信噪比, 从而实现了三相态水同步精细探测拉曼分光系统的优化设

计, 解决了对所需回波信号的精细提取和高信噪比探测问题.

利用标准大气模型和大气散射模型, 对优化后的拉曼激光雷达系统进行了系统探测信噪比的仿真分析. 结果表明: 当激光雷达探测效率因子为1800 J·mm·min时, 在有云条件下系统可获得白天3.6 km以上和晴天条件下4 km以上的三相态水有效探测, 保证了利用拉曼激光雷达实现对三相态水的同步高信噪比探测, 为后续大气三相态水的拉曼激光雷达同步探测提供技术和理论支持.

同时, 三相态水的精确反演理论也需要严格剔除不同相态水的相互干扰, 因此, 本文所展开的光谱重叠性分析也可为三相态水的反演提供了进一步的理论依据. 依据上述三相态水激光雷达回波信号强度和光谱重叠度信息, 根据三相态水的同步反演方法, 我们进一步获得了各相态水混合比廓线的仿真结果, 得到了在云层内大气水汽、液态水和固态水含量的同步增长以及探测误差的大小, 从侧面反映了固态水通道的低探测信噪比以及拉曼激光雷达探测的难点所在. 另外, 液态水含量的精确探测和反演可为大气水汽密度和相对湿度的反演和校正提供有力的证据, 对于研究中小尺度气候变化, 了解云的形成和降水天气的预测具有重大意义.

参考文献

- [1] Jacobson M Z, Pruppacher H R, Klett J D 1998 *Clim. Change* **38** 497
- [2] Plakhotnik T, Reichardt J 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. **194** 58
- [3] Zhang Z H, Zhou Y Q 2010 *Meteorol. Mon.* **36** 83 (in Chinese) [张志红, 周毓荃 2010 气象 **36** 83]
- [4] Su T, Feng G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 249201 (in Chinese) [苏涛, 封国林 2014 物理学报 **63** 249201]
- [5] Ge Y, Shu R, Hu Y H, Liu H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 204301 (in Chinese) [葛焯, 舒嵘, 胡以华, 刘豪 2014 物理学报 **63** 204301]
- [6] Li S C, Wang D L, Li Q M, Song Y H, Liu L J, Hua D X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 143301 (in Chinese) [李仕春, 王大龙, 李启蒙, 宋跃辉, 刘丽娟, 华灯鑫 2016 物理学报 **65** 143301]
- [7] Sun G D, Qin L A, Zhang S L, He F, Tan F F, Jing X, Hou Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 054205 (in Chinese) [孙国栋, 秦来安, 张巳龙, 何枫, 谭逢富, 靖旭, 侯再红 2018 物理学报 **67** 054205]
- [8] Foth A, Pospichal B 2017 *Atmos. Meas. Tech.* **9** 1
- [9] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, He T Y, Hua D X 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0328004 (in Chinese) [王玉峰, 高飞, 朱承炫, 何廷尧, 华灯鑫 2015 光学学报 **35** 0328004]

- [10] Wang Y F, Fu Q, Zhao M N, Gao F, Di H G, Song Y H, Hua D X 2018 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **205** 114
- [11] Stachlewska I S, Costa-Surós M 2017 *Atmos. Res.* **194** 258
- [12] Wang H W, Hua D X, Wang Y F, Gao P, Zhao H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120701 (in Chinese) [王红伟, 华灯鑫, 王玉峰, 高朋, 赵虎 2013 物理学报 **62** 120701]
- [13] Yabuki M, Matsuda M, Nakamura T, Hayashi T, Tsuda T 2016 *J. Atmos. Sol-Terr Phys.* **150** 21
- [14] Veselovskii I A, Cha H K, Kim D H, Choi S C, Lee J M 2001 *Appl. Phys. B* **73** 739
- [15] Bühl J, Seifert P, Myagkov A, Ansmann A 2016 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **16** 1
- [16] Sakai T, Whiteman D N, Russo F, Turner David D, Veselovskii I A, Melfi S H, Nagai T, Mano Y 2013 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **30** 1337
- [17] Veselovskii I A, Cha H K, Kim D H, Choi S C, Lee J M 2000 *Appl. Phys. B* **71** 113
- [18] Wang Z, Whiteman D N, Demoz B B, Veselovskii I A 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** 121
- [19] Liu F C, Yi F, Jia J Y, Zhang Y P, Zhang S D, Yu C M, Tan Y 2012 *Chin. Technol. Sci.* **55** 1224
- [20] Reichardt J 2014 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **31** 1946
- [21] Stillwell R A, Iii R R N, Thayer J P, Shupe M D, Turner D D 2018 *Atmos. Meas. Tech.* **11** 1
- [22] Donovan D P, Klein Baltink H, Henzing J S, de Roode S R, Siebesma A P 2015 *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **8** 237
- [23] Whiteman D N 2003 *Appl. Opt.* **42** 2593
- [24] Wang K R 2012 *Optimization Method* (Beijing: Science Press) p156 (in Chinese) [王开荣 2012 最优化方法 (北京: 科学出版社) 第 156 页]

Design and simulation analysis of spectroscopic system for synchronous atmospheric three-phase water detection based on Raman lidar*

Wang Yu-Feng[†] Zhang Jing Tang Liu Wang Qing Gao Tian-Le Song Yue-Hui
Di Hui-Ge Li Bo Hua Deng-Xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 10 April 2018; revised manuscript received 13 September 2018)

Abstract

Water is the only atmospheric parameter with three-phase states. The study on distribution and variation in three-phase water is of great scientific significance for understanding cloud microphysics, cloud precipitation physics, and water circulation, especially in the fields of artificial weather process. In the Raman lidar detection technology of three-phase water, it is necessary to solve the problem of high-spectral spectroscopic technique to ensure fine extraction of the echo signal and the detection with high signal-to-noise ratio (SNR). Considering the Raman spectrum characteristics of three-phase water, the influences of filter parameters in the Raman channels on the overlapping characteristics are theoretical simulated and discussed in detail, and the SNR is investigated as well. Regarding the fact that optimal solution can be obtained for neither overlapping nor SNR at the same time, an evaluation function method based on the multi-objective programming problem is proposed to analyze the optimal filter parameters. The results show that the minimum overlapping value and the higher system SNR can be obtained when the central wavelength and bandwidth of the filters are determined to be 397.9 nm and 3.1 nm, 403 nm and 5 nm, 407.6 nm and 0.6 nm in solid water, liquid water and water vapor channel, respectively, and thus the optimal design can be realized for synchronous detection Raman spectroscopic system for three-phase water. Further simulation results show that effective detection can reach above 3.6 km in the daytime and over 4 km on sunny days under a system factor of 1800 J-mm-min for three-phase water Raman measurement in the daytime. Furthermore, the obtained overlapping values are applied to accurate retrieval theory for three-phase water profiles. The simulated profiles of atmospheric water vapor, liquid water and ice water indicate that the water vapor, liquid water and solid water content can be increased synchronously in the cloud layer, and their content, distribution characteristics and the corresponding error are also discussed. The above results validate the feasibility of highspectral spectroscopic technique for detecting the synchronous atmospheric three-phase water, and will provide technical and theoretical support for synchronous retrieval of three-phase water by Raman lidar.

Keywords: three-phase water, Raman lidar, fine detection, simulation

PACS: 42.68.Wt, 42.15.Eq, 87.55.Gh, 78.30.-j

DOI: 10.7498/aps.67.20180644

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1733202, 41575027, 41627807, 41027004).

[†] Corresponding author. E-mail: wangyufeng@xaut.edu.cn