

地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达性能的影响

杨巨鑫¹, 朱亚丹², 王勤¹, 卜令兵^{1*}, 刘继桥², 陈卫标²

¹南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点实验室,
教育部气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044;

²中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 利用中分辨率成像光谱仪地表反射率产品和欧洲中期天气预报中心的气溶胶光学厚度产品, 分析了全球地表反射率及气溶胶光学厚度的分布特征, 分析了地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达系统回波功率、探测器输出信噪比、相对随机误差的影响。结果表明: 在给定的系统参数下, 得到的单脉冲回波功率范围为 0.299~321 nW, 对探测器动态范围的要求较高; 单脉冲回波探测器输出信噪比在 13.6 dB 以上, 累计 148 次(陆地)/296 次(海洋)脉冲的探测器输出信噪比在 26 dB 以上; 相对随机误差高值区出现在撒哈拉沙漠及阿拉伯半岛附近海域, 最大相对随机误差达到了 0.22% (0.88×10^{-6})。

关键词 遥感; 路径积分差分吸收激光雷达; 地表反射率; 气溶胶光学厚度; 信噪比; 相对随机误差

中图分类号 P407.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0910001

Influence of Surface Reflectance and Aerosol Optical Depth on Performance of Spaceborne Integral Path Differential Absorption Lidar

Yang Juxin¹, Zhu Yadan², Wang Qin¹, Bu Lingbing^{1*}, Liu Jiqiao², Chen Weibiao²

¹*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol and Cloud Precipitation of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;*

²*Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The distribution characteristics of global surface reflectance and aerosol optical depth are analyzed using a surface-reflectance product of moderate-resolution imaging spectroradiometer and an aerosol-optical-depth product of European centre for medium-range weather forecasts. The effects of surface reflectance and aerosol optical depth on the echo power, detector output signal-to-noise ratio, and relative random error of spaceborne integral path differential absorption lidar systems are analyzed. Results show that with the given system parameters, the single-pulse echo power range is approximately 0.299-321 nW, which requires the detector to have a high dynamic range. The output signal-to-noise ratio of single-pulse echo detector is greater than 13.6 dB, and the output signal-to-noise ratio of detector with an accumulative 148 times (land)/296 times (ocean) pulse is greater than 26 dB. The high values of relative random error appear in the sea near the Sahara Desert and Arabian Peninsula, and the maximum relative random error is 0.22% (0.88×10^{-6}).

Key words remote sensing; integral path differential absorption lidar; surface reflectance; aerosol optical depth; signal-to-noise ratio; relative random error

OCIS codes 280.1910; 280.3640

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-14; 录用日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(41675133)、国家重点研究计划(2017YFF0104605)、民用航天预研(D040103)

* E-mail: lingbingbu@nuist.edu.cn

1 引 言

从工业时代开始,大气中的温室气体浓度就呈现爆发式的增长,CO₂的体积分数从工业革命开始前的 2.8×10^{-4} 增长到了如今的 4.04×10^{-4} ,CO₂贡献了64%的辐射强迫^[1]。由于当下人们对于CO₂循环以及源与汇了解的欠缺,故需对全球CO₂浓度进行精确测量,卫星便成为了最为有效的手段。目前在轨运行的用于监测全球温室气体的卫星主要有日本于2009年1月发射的温室气体观测卫星GOSAT^[2]和2018年10月发射的GOSAT-2^[3]、美国于2014年7月发射的嗅碳卫星OCO-2^[4],以及中国于2016年12月发射的碳卫星Tansat^[5-6]、2017年11月发射的风云-3D(FY-3D)^[7]和2018年5月发射的GF-5卫星^[8]。然而上述几颗卫星都是基于被动遥感的方式,所以均存在无法进行夜间观测以及受云、气溶胶和大气影响大的问题;同时,被动遥感方式监测CO₂体积分数的精度为 4×10^{-6} (1%)左右,而每年全球CO₂体积分数增长只有大约 2×10^{-6} ,所以需要精度更高的观测方式。

星载路径积分差分吸收(IPDA)激光雷达被认为是监测全球CO₂浓度变化的最有效方式之一。IPDA激光雷达通过测量激光束在激光雷达与硬目标之间往返路径上产生的吸收差异来确定目标气体的浓度,而不探测路径上大气、云和气溶胶对激光的后向散射,因此,具有较高的信噪比,受云、大气、气溶胶的影响小。同时,主动遥感不受太阳光的影响,可以进行全天候、全季节、不间断的全球监测。中美等国分别对利用星载IPDA激光雷达监测温室气体并对其机载验证进行了部署和实施。美国国家航空航天局(NASA)提出了ASCENDS(active sensing of CO₂ emission over nights, days, and seasons)计划^[9],选取 $1.6 \mu\text{m}$ 处CO₂的弱吸收峰和 $0.765 \mu\text{m}$ 处O₂的A-band进行观测,希望将CO₂探测精度提高至 1×10^{-6} (0.25%)以下。戈达德航天中心^[10-12]和兰利研究中心^[13-15]等单位对该星载雷达进行了机载验证,激光雷达计算得到XCO₂(CO₂与空气混合比)平均值与原位测量仪计算的XCO₂平均值的误差优于 1×10^{-6} 。欧洲航天局(ESA)部署了A-SCOPE(advanced space carbon and climate observation of Planet Earth)计划^[16],选取 $1.6 \mu\text{m}$ 或 $2.05 \mu\text{m}$ 的CO₂吸收带对CO₂进行探测^[17-18],经机载验证得到了精度优于 1×10^{-6} 的结果^[19]。

中国科学院上海光学精密机械研究所正在积极

研制全球首个测量CO₂浓度的星载IPDA激光雷达。刘继桥等^[20]研究了用IPDA激光雷达实现双波长脉冲激光的技术方法,实现了1572 nm波段单脉冲能量高于50 mJ的激光输出。谢杨易等^[21]对星载激光雷达波长等激光器参数进行了优化,以降低CO₂的测量误差,选定激光雷达on-line波数为 $6361.2250 \text{ cm}^{-1}$ (1572.024 nm),off-line波数为 6360.99 cm^{-1} (1572.082 nm)。史成龙^[22]对机载激光雷达测量CO₂浓度进行了误差分析,选定激光雷达on-line波数为 $6361.2250 \text{ cm}^{-1}$ (1572.024 nm),off-line波数为 6360.979 cm^{-1} (1572.085 nm),并对on-line进行误差评估,综合系统误差为 0.78×10^{-6} 。杜鹃^[23]研制了一套用以探测CO₂浓度的地基IPDA激光雷达,该系统的测量精度达到了0.56%(2.42×10^{-6})。穆永吉等^[24]对星载激光雷达系统的杂散光进行了分析,并设计了一种位于激光雷达后光学系统的杂散光抑制系统,该方法可以有效降低系统内因杂散光引入的误差。陈晓等^[25]搭建了一套光谱纯度测量装置,并采用该装置对1572 nm种子注入光参量振荡器(OPO)输出的脉冲激光光谱纯度进行了测量,测得光谱纯度为 $(99.996 \pm 0.0005)\%$,这表明研制的种子注入OPO激光源具有很高的光谱纯度,能有效降低系统误差。目前,中科院上海光机所已经研制成功了星载激光雷达的缩比模型,并完成了机载验证。

王俊洋^[26]和马晖^[27]对星载IPDA激光雷达系统进行了仿真,初步分析了地表反射率(ρ)和气溶胶光学厚度(AOD)这两个激光雷达方程中变化最大的参数对系统的影响,并假设一些技术参数进行仿真。本文重点分析了全球地表反射率和气溶胶光学厚度对星载激光雷达回波信号功率、信噪比和相对随机误差的影响。

2 基本原理

2.1 IPDA 激光雷达原理

IPDA激光雷达交替发射两束波长相近的激光,分别称为on-line与off-line。其中on-line位于CO₂吸收峰附近,CO₂分子对该波长激光的吸收截面较大;off-line偏离CO₂吸收峰,CO₂分子对该波长激光的吸收截面较小。对于一对on-line和off-line激光脉冲,它们的波长非常接近,脉冲发出时间接近(相差几百微秒),两束激光在穿过大气时除了CO₂吸收系数不同,其他因素对大气透过率的影响可以忽略不计。根据文献^[22]对IPDA激光雷达波

长的优化结果,选用 CO₂ 位于 R-18 吸收线上的波长为优选波长, on-line 优选波长 $\lambda_{on} = 1572.024$ nm (波数为 6361.255 cm⁻¹), off-line 优选波长 $\lambda_{off} = 1572.085$ nm (波数为 6360.979 cm⁻¹)。

IPDA 激光雷达接收的回波信号是硬目标的散射信号。相较于传统的差分吸收激光雷达, IPDA 激光雷达丢失了廓线信息,但是由于接收的是来自硬目标的强回波信号,这提高了信噪比和灵敏度,同时也避免了利用大气后向散射信号反演 CO₂ 浓度对更大口径望远镜的需求。由于两束激光脉冲间隔非常短(约 200 μ s),可以认为这两束激光穿过的大气的参数是相同的,且激光足印的重叠率较高,地表反射率变化不大。

为简便起见,假设地球表面为理想的朗伯面,则地表回波信号为^[26]

$$P_{on} = \frac{\rho}{\pi} \frac{E_{on}}{\Delta t_{eff}} \frac{A}{R_G^2} T_{opt} T_{atm} \cdot \exp\left[-2 \int_{R_{sur}}^{R_f} \sigma_{on}(r) \cdot n_{CO_2}(r) dr\right], \quad (1)$$

$$P_{off} = \frac{\rho}{\pi} \frac{E_{off}}{\Delta t_{eff}} \frac{A}{R_G^2} T_{opt} T_{atm} \cdot \exp\left[-2 \int_{R_{sur}}^{R_f} \sigma_{off}(r) \cdot n_{CO_2}(r) dr\right], \quad (2)$$

式中: P_{on} 与 P_{off} 分别为 on-line 与 off-line 对应的激光脉冲回波信号功率(W); E_{on} 和 E_{off} 分别为 on-line 和 off-line 激光单脉冲能量; A 为接收望远镜的面积(m²); R_{sur} 为地表海拔高度(m); R_f 为平台海拔高度(m); R_G 为激光传输的路径长度, $R_G = R_f - R_{sur}$; T_{opt} 为激光雷达的系统光学效率; T_{atm} 为大气气溶胶与除 CO₂ 分子以外的大气分子的透过率总和; σ_{on} 和 σ_{off} 分别为 on-line 与 off-line 在高度 r 处的大气 CO₂ 吸收截面(cm²·molecule⁻¹); $n_{CO_2}(r)$ 为高度 r 处 CO₂ 的分子数密度(molecule·m⁻³); Δt_{eff} 为激光有效脉冲宽度。则 $\sigma_{on}(r) \cdot n_{CO_2}(r)$ 、 $\sigma_{off}(r) \cdot n_{CO_2}(r)$ 分别为在高度 r 处 CO₂ 对 on-line/off-line 的吸收系数。

Δt_{eff} 可以表示为^[22]

$$\Delta t_{eff} = \sqrt{\Delta\tau_L^2 + \left(\frac{1}{3B}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta h}{c}\right)^2}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau_L$ 为激光脉冲宽度(s); B 为探测器电子带宽(Hz); Δh 为激光光斑照射地面时的地形变化高度差(m); c 为光速(m·s⁻¹)。

2.2 地表反射率和气溶胶光学厚度

1572 nm 的地表反射率可以通过利用(4)式对

中分辨率成像光谱仪(MODIS)波段 6(1628~1652 nm)和波段 7(2105~2155 nm)的数值进行插值获得^[28-29]。波段 6 的中心波长为 1640 nm, 波段 7 的中心波长为 2130 nm。则 1572 nm 的地表反射率为

$$\rho_{1572\text{ nm}} = 0.727\rho_{1640\text{ nm}} + 0.309\rho_{2130\text{ nm}}, \quad (4)$$

式中: $\rho_{1640\text{ nm}}$ 和 $\rho_{2130\text{ nm}}$ 分别为 1640 nm 和 2130 nm 处的地表反射率。

Ångström^[30] 提出的整层大气气溶胶光学厚度的表达式为

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (5)$$

式中: β 为浑浊度系数,反映气溶胶浓度; α 为波长指数,反映气溶胶的粒子谱分布; λ 为波长; $\tau(\lambda)$ 为波长 λ 下的气溶胶光学厚度。根据(4)式和(5)式可得

$$\alpha = \frac{\ln(\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2})}{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}, \quad (6)$$

$$\tau_{\lambda_3} = \tau_{\lambda_2} \cdot (\lambda_3/\lambda_2)^{-\alpha}, \quad (7)$$

式中: τ_{λ_1} 和 τ_{λ_2} 分别为已知的波长 λ_1 和 λ_2 下的气溶胶光学厚度; τ_{λ_3} 为待求的波长 λ_3 下的气溶胶光学厚度。根据(6)式和(7)式,利用两个波长下的气溶胶光学厚度可获取其他波长下的气溶胶光学厚度。

2.3 信噪比和相对随机误差

雪崩光电二极管(APD)的输出信噪比为^[31]

$$R_{SN} = \frac{MRP}{\sqrt{2eM^2\Delta f(RFP + i_d) + 4k_B T_{dw}\Delta f/R_L}}, \quad (8)$$

式中: M 为 APD 内部增益因子; $R = \frac{e\eta}{h\nu}$ 为未经放大的 APD 探测器的响应度(e 为单电子电量, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C, η 为量子效率, h 为普朗克常量, $\nu = 1.91 \times 10^{14}$ Hz 为入射光频率); P 为入射光的平均功率; R_L 为反馈电阻; Δf 为电子带宽; F 为过量噪声因子; i_d 为暗电流; k_B 为玻尔兹曼常数, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹; T_{dw} 为 APD 内部工作温度; R_{SN} 为单脉冲信噪比。

在约 7 s 的脉冲累计时间内,对应的水平分辨率为 50 km,发射脉冲(重复频率 20 Hz)约为 148 对,在累计一定数量脉冲对之后的回波信号的信噪比为

$$R_{SN}(\text{int}) = 10\lg(R_{SN} \sqrt{N_{shots}}), \quad (9)$$

式中: N_{shots} 为发射脉冲对的数量; $R_{SN}(\text{int})$ 为累计 N_{shots} 个脉冲的信噪比(dB)。

差分吸收激光雷达接收信号信噪比对反演浓度

结果的影响是系统随机误差造成的结果, on-line 与 off-line 信噪比与相对随机误差 E_{RRE} 的关系可以表示为^[32]

$$E_{RRE} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{SNon}^2} + \frac{1}{R_{SNoFF}^2} \right) \frac{1}{N_{shots}}}, \quad (10)$$

式中 R_{SNon} 、 R_{SNoFF} 分别为 on-line 与 off-line 单脉冲回波信号的信噪比, 即由(8)式获得的信噪比。

3 分析与讨论

3.1 全球地表反射率及气溶胶光学厚度分布

地表反射率 ρ 和气溶胶光学厚度的变化较大, 对接收功率、信噪比和系统误差的影响最大。本研究选用 MODIS 地表反射率三级产品 MOD09CMG (MODIS surface reflectance climate modeling grid) 进行分析。MOD09CMG 产品来自于 Terra MODIS(由 Aqua MODIS 提供的 MYD09CMG 由于波段 6 的数据存在问题而未采用), Terra 每天于当地时间上午 10:00 自北向南经过赤道。MOD09CMG 产品的空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ($5600 \text{ m} \times 5600 \text{ m}$), 对于系统要求的 50 km 的水平分辨率已足够, 可以修正大气和气溶胶的影响, 但 MODIS 作为被动遥感仪器, 无法在夜间进行观测, 并且受云、气溶胶和大气的影响大。MODIS 地表反射率产品提供了 7 个波段的地表反射率, 本研究利用了波段 6 (1628 ~ 1652 nm) 和波段 7 (2105 ~ 2155 nm) 的数据。

利用 MOD09CMG 提供的质量控制数据, 去除有云、数据质量差的数据。本研究对 2017 年 12 月—2018 年 12 月的数据进行处理, 根据(4)式对波段 6 和波段 7 的数据进行插值, 得到了 1572 nm 的地表反射率, 并进行了年度平均。考虑到季节变化导致的地表植被类型等的变化会使地表反射率发生变化, 分别对各个季节的地表反射率进行了平均。但 MODIS 属于被动遥感, 这会造成极地地区冬季无数据, 且年平均的数据不能很好地代表全年的平均水平。

图 1 所示为 2017 年 12 月—2018 年 12 月 1572 nm 全球季节平均和年平均的地表反射率, 其中图 1(e) 为 2018 年年平均的地表反射率, 图 1(a)~(d) 为季节平均的结果。可见, 1572 nm 全球地表反射率普遍分布在 0~0.8, 水陆地表反射率差异明显, 海洋的反射率在 0.05 以下, 以 0.05 为阈值可以较好地区分陆地和海洋。对比分析图 1 所示的 5 幅图可以看出, 沙漠地区的地表反射率最强, 最大可达 0.8 以上, 裸地的地表反射率比植被茂密

地区高。从图 1(a)~(d) 可以看出, 对于极地地区来说, 夏天的地表反射率最低, 积雪和冰川的融化造成了地表反射率的降低。而相较于其他沙漠, 撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠的地表反射率要高很多。

对于气溶胶光学厚度, Levy 等^[33] 指出根据 MODIS 提供的气溶胶光学厚度计算得到的波长指数与地面站测得的相差较远。本研究选用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 CAMS-NRT 数据集, 该数据集由卫星数据和全球地面站数据同化获得, 提供了 469, 550, 670, 865, 1240 nm 波长下的总气溶胶光学厚度, 时间分辨率为 6 h, 最高水平分辨率可达 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。对 2017 年 12 月—2018 年 12 月的数据进行处理, 根据(6)和(7)式对 550 nm 和 1240 nm 波长下的气溶胶光学厚度数据进行换算, 得到 1572 nm 波长下的气溶胶光学厚度, 并进行了年度平均和季节平均。

图 2 所示为 2017 年 12 月—2018 年 12 月季节平均和年平均的 1572 nm 波长下的气溶胶光学厚度分布。从地域上看, 1572 nm 波长下的气溶胶光学厚度高值区分布在中国西北、撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛及附近地区, 其他地区的气溶胶光学厚度普遍分布在 0.2 以下, 海洋略高于陆地, 极地地区最低。从季节上看, 中国西北地区在北半球, 春季气溶胶光学厚度最高; 撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛在北半球, 夏季气溶胶光学厚度最高, 而此时中国西北地区依旧处于气溶胶光学厚度的高值区; 极地和高原地区冬季的气溶胶光学厚度最低, 春秋季节略高, 夏天达到最高。

3.2 地表反射率和气溶胶光学厚度对激光雷达接收地表回波功率和信噪比的影响

仿真所用的星载激光雷达参数如表 1 所示。为简化计算, 选取激光光斑照射地面时地形变化高度差 $\Delta h = 3 \text{ m}$, 根据(3)式可知接收到的回波有效脉冲宽度将展宽到 71 ns。卫星速度约为 $6.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 空间数据分辨率为 50 km, 脉冲累计时间为 7.4 s, 激光脉冲重复频率为 20 Hz, 则累计脉冲个数为 148 次。通过 HITRAN 数据库^[34] 获取 CO_2 分子和水汽分子在不同温度和压强下对激光的吸收截面 σ_{on} 和 σ_{off} , 再根据美国标准大气模型 (USSA76) 和理想气体状态方程获得不同海拔高度下的温度、湿度、压强和空气分子数密度, 忽略 30 km 以上大气的影响, 假设整层大气中 CO_2 的体积分数为 4×10^{-4} , 获取 CO_2 分子对激光的吸收系数, 并消除水汽分子的影响。

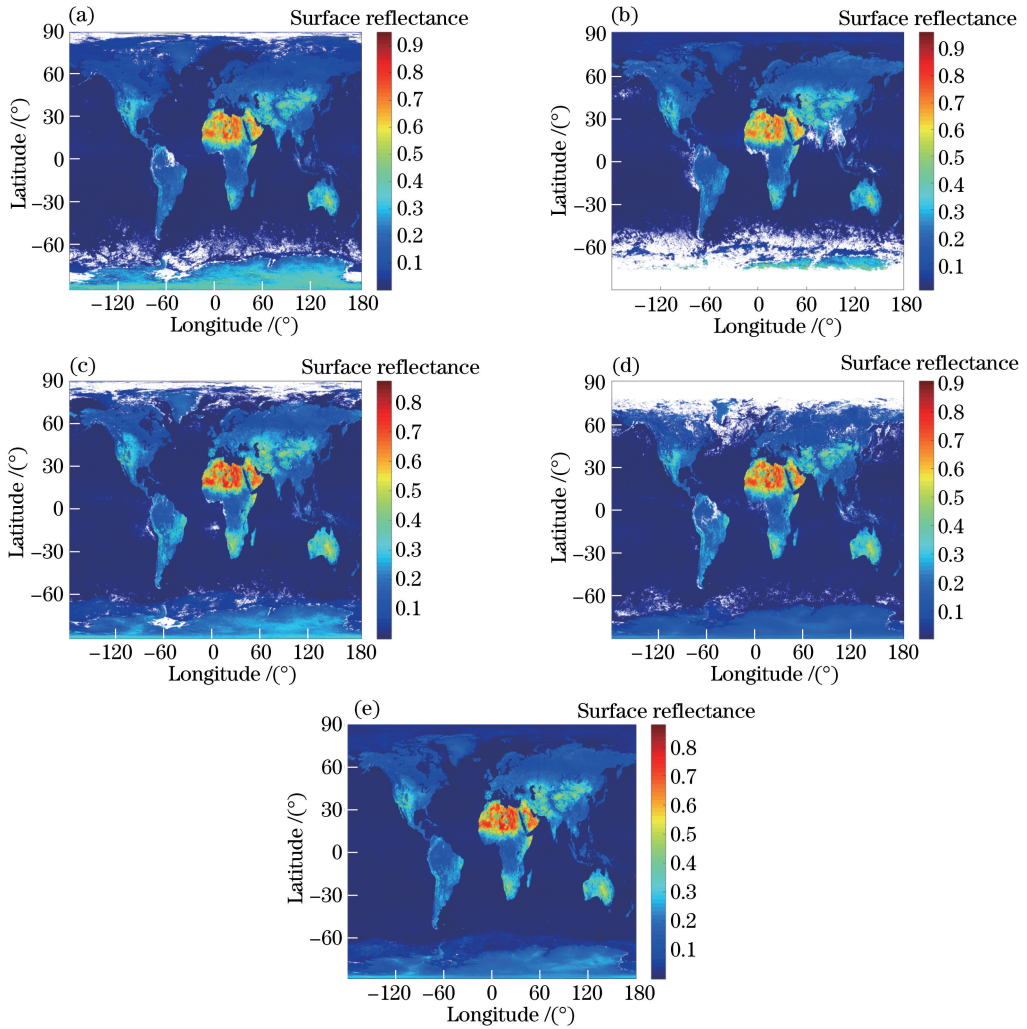


图 1 1572 nm 波长下全球各季节平均和年平均地表反射率。(a)春季平均;(b)夏季平均;
(c)秋季平均;(d)冬季平均;(e)年平均

Fig. 1 Global seasonal average and annual average surface reflectance of 1572 nm. (a) Average surface reflectance of 1572 nm in spring; (b) average surface reflectance of 1572 nm in summer; (c) average surface reflectance of 1572 nm in autumn; (d) average surface reflectance of 1572 nm in winter; (e) annual average surface reflectance of 1572 nm

根据(1)~(2)式以及表 1 的参数,并将 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 分辨率的地表反射率和 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 分辨率的气溶胶光学厚度插值到相同的分辨率,仿真得到回波信号功率的全球分布图,如图 3 所示。结果显示,海陆差异明显,对于信号衰减更强的 on-line 回波信号,海洋地区单脉冲最小功率为 0.754 nW。对于信号衰减较小的 off-line 回波信号,单脉冲最大功率为 281.6 nW,动态范围较大,极大值出现在沙漠地区。

根据(8)~(9)式得到了累计 148 次(陆地)/296 次(海洋)脉冲回波信号的输出信噪比,如图 4 所示。On-line 的回波信噪比为 29.26~39.6 dB,off-line 的回波信噪比为 33.23~42.65 dB。

由(10)式得到了累计 148 次(陆地)/296 次(海洋)脉冲年平均的系统随机误差,如图 5 所示。由图 5 可以看出:全球范围内相对随机误差分布在 $0.00795\% \sim 0.0995\% [(0.032 \sim 0.398) \times 10^{-6}]$ 范围内;陆地的相对随机误差明显低于海洋,而撒哈拉沙漠及阿拉伯半岛附近海域,由于具有较高的气溶胶光学厚度及很低的地表反射率,贡献了最大的相对随机误差。

针对不同季节的地表反射率和气溶胶光学厚度,分别获取了不同季节的激光雷达单脉冲回波功率、探测器输出信噪比和相对随机误差的分布范围,如表 2 所示。

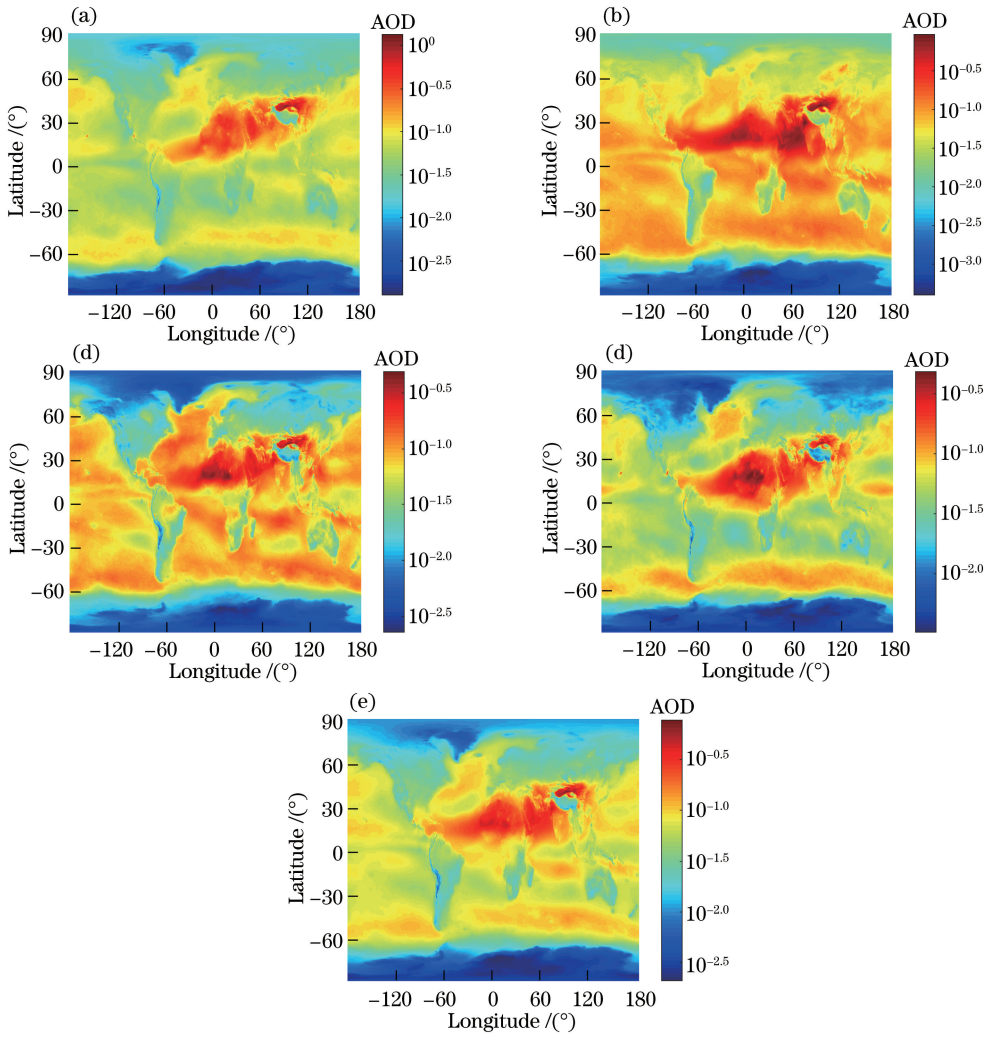


图 2 1572 nm 波长下的全球各季节平均和年平均气溶胶光学厚度。

(a)春季平均;(b)夏季平均;(c)秋季平均;(d)冬季平均;(e)年平均

Fig. 2 Global seasonal average and annual average AOD of 1572 nm. (a) Average AOD of 1572 nm in spring; (b) average AOD of 1572 nm in summer; (c) average AOD of 1572 nm in autumn; (d) average AOD of 1572 nm in winter; (e) annual average AOD of 1572 nm

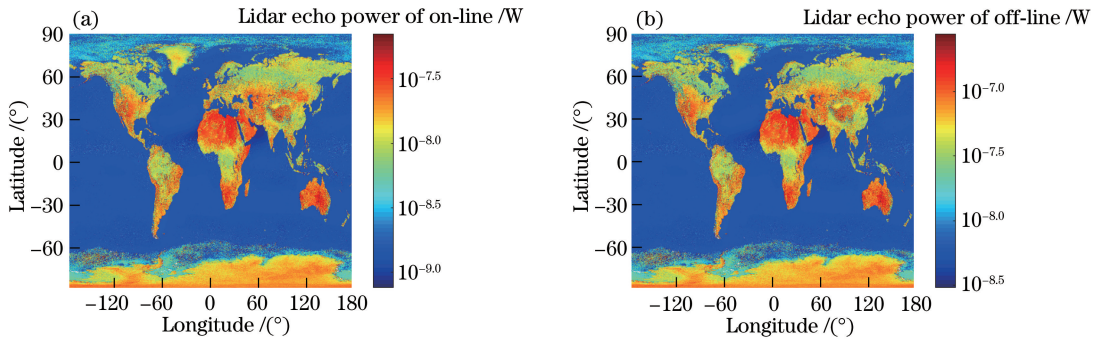


图 3 on-line 与 off-line 回波信号功率的全球分布。(a)on-line 单脉冲回波信号功率;(b)off-line 单脉冲回波信号功率

Fig. 3 Global distributions of on-line and off-line echo power. (a) On-line single-pulse echo power; (b) off-line single-pulse echo power

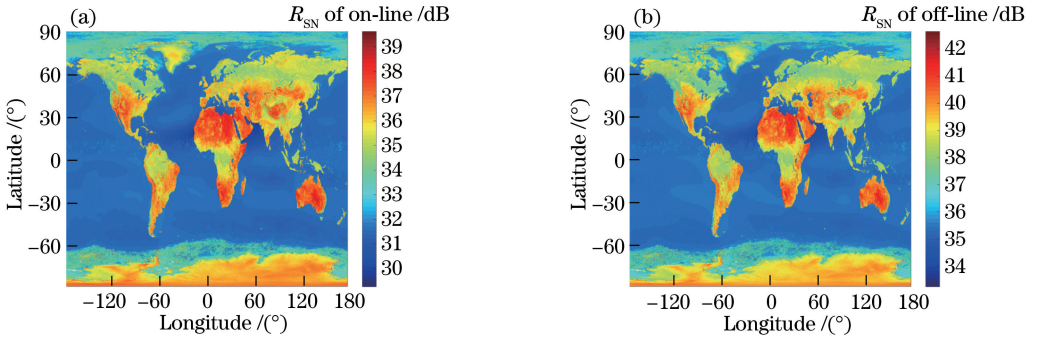


图 4 全球分布的激光雷达输出信噪比。(a) on-line 回波信号输出信噪比; (b) off-line 回波信号输出信噪比

Fig. 4 Global distributions of lidar signal-to-noise ratio. (a) On-line output signal-to-noise ratio; (b) off-line output signal-to-noise ratio

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters used in simulation

Parameter	Value
On-line wavenumber / cm^{-1}	6361.225
Off-line wavenumber / cm^{-1}	6360.979
Laser pulse energy / mJ	75
Pulse length / ns	15
Laser divergence angle / mrad	0.1
Telescope diameter / m	1
System optical efficiency / %	69
Height of satellite platform / km	700
Laser pulse repetition frequency / Hz	20
Pulse accumulative times	148(land) / 296(ocean)
Quantum efficiency	0.75
Electronic bandwidth of APD / MHz	2
Internal gain factor of APD	10
Dark current of APD / nA	8
Excess noise factor (F)	5.5
Bandwidth / MHz	5
Topographic variation height difference / m	3

由表 2 可知, P_{off} 的最大值为 321 nW, P_{on} 最小值为 0.299 nW, 前者约为后者的 1000 倍, 这对探测器的灵敏度和动态范围提出了很高的要求, 要求探测器灵敏度要足够高。为了降低探测器动态范围的

表 2 不同季节主要参数的变化范围

Table 2 Variation range of main parameters in different seasons

Parameter	Spring		Summer		Autumn		Winter		Annual average	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
P_{on}/nW	0.299	79.6	0.370	80.6	0.800	72.7	0.814	73.4	0.754	70.7
P_{off}/nW	1.19	317	1.49	321	3.19	290	3.24	292	3	282
$R_{\text{SN}}(\text{int})_{\text{on}}/\text{dB}$	26.01	39.88	26.86	39.91	29.60	39.69	29.66	39.71	29.26	39.60
$R_{\text{SN}}(\text{int})_{\text{off}}/\text{dB}$	30.91	42.91	31.61	42.93	33.81	42.71	33.86	42.73	33.23	42.65
E_{RRE}	7.5×10^{-5}	2.2×10^{-3}	7.2×10^{-5}	1.7×10^{-3}	7.8×10^{-5}	9.5×10^{-4}	7.8×10^{-5}	9.4×10^{-4}	8.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}

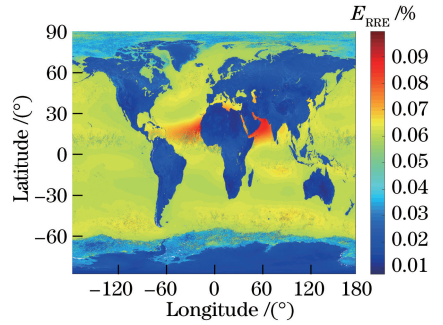


图 5 相对随机误差的全球分布

Fig. 5 Global distribution of relative random error

要求, 在海洋上空和陆地上空有必要设置不同的放大增益, 也可根据仿真得到的单脉冲回波功率, 设置不同的阈值, 在不同回波功率大小的地区设置不同的放大增益。 $R_{\text{SN}}(\text{int})_{\text{on}}$ 和 $R_{\text{SN}}(\text{int})_{\text{off}}$ 分别为累计 148 次(陆地)/296 次(海洋)脉冲后 on-line 和 off-line 的信噪比(int 表示累计一定的脉冲次数), 探测器输出信噪比在 26 dB 以上, 而单脉冲回波信噪比也在 13.6 dB 以上。4 个季节的相对随机误差分别为 0.0075%~0.22% ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.88 \times 10^{-6}$)、0.0072%~0.17% ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.68 \times 10^{-6}$)、0.0078%~0.095% ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.38 \times 10^{-6}$) 和 0.0078%~0.094% ($0.03 \times 10^{-6} \sim 0.376 \times 10^{-6}$), 能够满足全球测量随机误差最大为 1×10^{-6} 的需求。

4 结 论

本文分析了全球地表反射率和气溶胶光学厚度分布及其对星载 IPDA 激光雷达回波功率、探测器输出信噪比、相对随机误差的影响。结果表明:在给定的星载激光雷达系统参数下,得到的单脉冲回波功率范围为 0.299~321 nW,单脉冲回波探测器输出信噪比在 13.6 dB 以上,而累计 148 次(陆地)/296 次(海洋)脉冲的探测器输出信噪比在 26 dB 以上;撒哈拉沙漠及阿拉伯半岛附近海域由于低的地表反射率和较高的气溶胶光学厚度贡献了最大的相对随机误差;从季节上看,北半球春季的最大相对随机误差最大,达到了 0.22%(0.88×10^{-6}),满足 1×10^{-6} 最大随机误差的探测需求。初步评估了给出的激光雷达系统参数在全球范围的测量性能,为开展相关研究提供了参考数据。

参 考 文 献

- [1] Jefferson M. IPCC fifth assessment synthesis report: "Climate change 2014: longer report": Critical analysis [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2015, 92: 362-363.
- [2] Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, *et al.* Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the greenhouse gases observing satellite[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2010, 3(6): 4791-4833.
- [3] Kimura T. Overview of Japanese earth observation programs (conference presentation) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10785: 107850M.
- [4] Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, *et al.* The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(1): 59-81.
- [5] Chen W, Zhang Y, Yin Z, *et al.* In the TanSat mission: global CO₂ observation and monitoring[C] //63rd International Astronautical Congress, October 1-5, 2012, Naples, Italy. [S.l.: s.n.], 2012: 1-5.
- [6] Zhang L, Yue T, Wilson J, *et al.* Modelling of XCO₂ surfaces based on flight tests of TanSat instruments[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1818.
- [7] Tang S F, Lu Z J, Wang W G, *et al.* Brief description of space hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303003.
唐绍凡, 鲁之君, 王伟刚, 等. 航天高光谱成像仪简
- [8] Xiong W. Greenhouse gases monitoring instrument (GMI) on GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303002.
熊伟. "高分五号"卫星大气主要温室气体监测仪 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0303002.
- [9] Kawa S R, Abshire J B, Baker D F, *et al.* Active sensing of CO₂ emissions over nights, days, and seasons (ASCENDS): final report of the ASCENDS ad hoc science definition team[R/OL]. (2018-11-28) [2019-03-02]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190000855>
- [10] Abshire J B, Riris H, Allan G R, *et al.* Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO₂ column absorption [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62(5): 770-783.
- [11] Abshire J B, Riris H, Weaver C J, *et al.* Airborne measurements of CO₂ column absorption and range using a pulsed direct-detection integrated path differential absorption lidar [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4446-4461.
- [12] Abshire J B, Ramanathan A K, Riris H, *et al.* Airborne measurements of CO₂ column concentrations made with a pulsed IPDA lidar using a multiple-wavelength-locked laser and HgCdTe APD detector[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(4): 2001-2025.
- [13] Campbell J F, Lin B, Nehrir A R. Advanced sine wave modulation of continuous wave laser system for atmospheric CO₂ differential absorption measurements[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 816-829.
- [14] Campbell J F, Lin B, Nehrir A R, *et al.* Binary phase shift keying on orthogonal carriers for multi-channel CO₂ absorption measurements in the presence of thin clouds[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S6): A1634-A1640.
- [15] Lin B, Nehrir A R, Harrison F W, *et al.* Atmospheric CO₂ column measurements in cloudy conditions using intensity-modulated continuous-wave lidar at 1.57 micron[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): A582-A593.
- [16] Bézy J L, Bensi P, Lin C C, *et al.* ESA future earth observation explorer missions [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7081: 70810S.
- [17] Durand Y, Caron J, Hélicière A, *et al.* LIDAR technology developments in support of ESA earth observation missions[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10566: 105661F.
- [18] Durand Y, Caron J, Bensi P, *et al.* A-SCOPE: concepts for an ESA mission to measure CO₂ from

- space with a lidar[C]//8th International Symposium on Tropospheric Profiling, October, 2009, The Netherlands. [S.l.: s.n.], 2009.
- [19] Amediek A, Fix A, Ehret G, *et al.* Airborne lidar reflectance measurements at 1.57 μm in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO₂ [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(2): 755-772.
- [20] Liu J Q, Xie Y Y, Li S G, *et al.* Research on spaceborne lidar for global atmospheric greenhouse gases detection[J]. *Infrared*, 2013, 34(2): 22-26, 34.
刘继桥, 谢杨易, 李世光, 等. 用于全球大气温室气体探测的星载激光雷达研究[J]. *红外*, 2013, 34(2): 22-26, 34.
- [21] Xie Y Y, Liu J Q, Jiang J X, *et al.* Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO₂ concentration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88-93.
谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使 CO₂ 浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 88-93.
- [22] Shi C L. Research on air-borne IPDA lidar carbon dioxide column concentrations measurement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 17-26.
史成龙. 机载积分路径差分吸收 (IPDA) 激光雷达测量大气 CO₂ 浓度研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 17-26.
- [23] Du J. Study of precise laser frequency control technology applied in spaceborne lidar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 106-114.
杜鹃. 星载激光雷达激光频率精密控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 106-114.
- [24] Mu Y J, Li R, Wan Y, *et al.* Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510005.
穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510005.
- [25] Chen X, Li S G, Zhu X L, *et al.* Spectral purity measurement of single-frequency nanosecond laser pulse based on long path absorption cell[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204006.
陈晓, 李世光, 朱小磊, 等. 基于长程气体吸收池的单频纳秒脉冲激光光谱纯度测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204006.
- [26] Wang J Y. Research on performance simulation and retrieval algorithm of space-borne lidar for measuring CO₂ concentration [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015: 17-25.
王俊洋. 星载激光雷达探测大气二氧化碳浓度的模拟与反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 17-25.
- [27] Ma H. Reliability demonstrating of space-borne greenhouse gases measurement using IPDA lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 39-48.
马晖. 星载温室气体探测 IPDA 激光雷达指标论证[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 39-48.
- [28] Disney M I, Lewis P E, Bouvet M, *et al.* Quantifying surface reflectivity for spaceborne lidar via two independent methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3262-3271.
- [29] Roy D P, Jin Y, Lewis P E, *et al.* Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 137-162.
- [30] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air[J]. *Geografiska Annaler*, 1929, 11: 156-166.
- [31] Jiang W J, Shi J H, Xie W K. Electrooptical technology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014: 89-91.
江文杰, 施建华, 谢文科. 光电技术[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2014: 89-91.
- [32] Grant W B. Effect of differential spectral reflectance on DIAL measurements using topographic targets [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(13): 2390-2394.
- [33] Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, *et al.* Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(21): 10399-10420.
- [34] Hill C, Gordon I E, Kochanov R V, *et al.* HITRANonline: an online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 177: 4-14.