

基于多波束偏振探测体制的星载云-气溶胶探测雷达 设计和仿真

李 飞¹, 赵一鸣¹, 张鹏飞², 李 静¹, 魏祥通¹, 王丽东¹, 于 勇¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 上海卫星工程研究所 上海 201100)

摘要: 星载激光探测载荷具有云、气溶胶垂直廓线的探测能力。国内外已有的载荷, 例如美国 Calipso 卫星的 Calip radar、国内“句芒号”卫星的多波束激光雷达和大气污染监测卫星的大气探测激光雷达, 为单波束云-气溶胶探测, 单次探测区域较窄。提出了多波束云-气溶胶探测激光雷达系统, 该系统工作于 800 km 卫星轨道, 采用多波束探测体制, 扩展雷达的探测幅宽到 30 km, 中心波束采用双波长偏振探测获取大气气溶胶、云的垂直廓线和粒子种类, 边缘波束采用单波长探测获取云垂直廓线, 可极大地提高数据获取效率。采用单光子探测和模拟探测结合的探测方式, 模拟探测保证探测的动态范围, 单光子探测具有极高的探测灵敏度, 降低雷达所需的激光能量, 降低雷达的重量和功耗。最终通过模拟仿真, 验证了星载多波束云-气溶胶探测雷达对典型云、气溶胶的探测效果。

关键词: 多波束; 模拟探测; 单光子探测; 激光雷达

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2024)03-0091-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240312001

引用格式: 李飞, 赵一鸣, 张鹏飞, 等. 基于多波束偏振探测体制的星载云-气溶胶探测雷达设计和仿真[J]. 遥测遥控, 2024, 45(3): 91-101.

Design and Simulation of Cloud-aerosol Detection LiDAR Based on Multi Beam Polarization Detection System

LI Fei¹, ZHAO Yiming¹, ZHANG Pengfei², LI Jing¹, WEI Xiangtong¹, WANG Lidong¹, YU Yong¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100, China)

Abstract: The space-borne laser detection system has the capability to detect the vertical profile of clouds and aerosols. Existing payloads, such as the Calip radar on the US Calipso satellite, the multi-beam LiDAR on the domestic "Goumang" satellite, and the atmospheric detection LiDAR on air pollution monitoring satellites, are limited to single-beam cloud-aerosol detection with a narrow detection area. A proposed solution is a multi-beam cloud-aerosol detection LiDAR system that operates in a satellite orbit of 800 km and utilizes a multi-beam detection system to extend radar coverage to 30 km. The central beam employs dual-wavelength polarization detection for obtaining vertical profiles and particle species of atmospheric aerosols and clouds, while the edge beam uses single-wavelength detection for cloud profiling. This approach significantly improves data acquisition efficiency through simulation-based verification of dynamic range and high sensitivity single photon detections which reduce laser energy requirements, as well as radar weight and power consumption. Finally, through simulation, the detection effect of space-borne multi-beam cloud-aerosol detection radar on typical clouds and aerosols is verified.

Keywords: Multi beam; Analog detection; Single photon detection; LiDAR

Citation: LI Fei, ZHAO Yiming, ZHANG Pengfei, et al. Design and Simulation of Cloud-aerosol Detection LiDAR Based on Multi Beam Polarization Detection System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(3): 91-101.

0 引言

云、气溶胶是地球大气系统的重要组成, 云-气溶胶辐射强迫效应包括直接辐射气候效应和间接辐射气候效应^[1], 其中, 直接辐射气候效应是云、气溶胶反射和吸收太阳辐射直接影响地气系统的辐射平衡, 间接辐射气候效应是气溶胶作为云凝结核改变云的反照率、寿命等性质, 进而影响云的生消过程和降水效应。云、气溶胶来源广泛并且具有较强的时空变化特征, 难以实现全球范围内精确、实时的探测, 使得间接辐射强迫估计的不确定性很大。为了研究大气中云和气溶胶的相互作用机理, 全面了解气溶胶-云-辐射间的相互作用, 降低气候研究和预测的不确定性^[2,3], 全球尺度下精确的大气云和气溶胶垂直分布探测数据的高效获取至关重要。

考虑到星载探测距离远, 目前在轨的载荷除云-气溶胶传输系统(Cloud-Aerosol Transport System, CATS)外均选用大能量激光作为探测光源, 用于提高接收能量、满足雷达信噪比探测要求。受限于卫星平台的承载能力, 星载激光雷达, 例如 Calipso 卫星的 Calipso 载荷^[3,4]、“句芒号”卫星多波束激光雷达载荷的大气探测功能以及大气环境监测卫星的大气探测激光雷达^[5], 为单波束激光输出探测, 激光光斑足印通常小于 100 m, 探测范围十分有限。CATS 携带了两台激光器, 两台激光器呈 0.5° 夹角输出, 雷达探测幅宽达到 3.5 km, 探测范围和数据获取效率显著提高。为使激光雷达输出更多激光波束, 提高雷达的探测范围和数据获取效率, 对研究大气中云和气溶胶的相互作用机理、了解气溶胶-云-辐射间的相互作用具有重要意义。从探测的角度分析, 国内外星载激光雷达包括模拟探测和单光子探测, 模拟探测具有大动态范围, 约为 30 dB, 可以获取散射系数差异大的云、气溶胶信息, 探测信息丰富, 单光子探测具有高探测灵敏度, 降低了对输出激光能量的要求, 但探测动态范围通常不超过 20 dB, 可探测的云、气溶胶种类较少。

本文设计了一种多波束混合探测体制的云-气溶胶探测激光雷达。多波束探测用于扩展激光雷达的探测幅宽, 要求激光雷达输出多束激光, 为了降低对激光能量的需求, 同时兼顾多种类的大气、云探测, 提出了中心波束的大能量模拟探测

云、气溶胶与两侧波束高重频单光探测云的设计方法。基于对单波束激光器能量需求的下降, 提出衍射分光元件对激光器输出激光分束达到多波束激光输出要求, 从而减少激光器数量, 实现系统的高度集成, 最终开展模拟仿真, 验证雷达方案的正确性。

1 混合探测体制雷达设计

大气探测激光雷达通过发射激光与大气物质相互作用, 产生散射回波, 雷达接收散射回波信号获取强度、色比、偏振比等信息, 通过反演获取大气物质的后向散射系数、消光系数和相态^[6,7]。激光雷达主要的数据采集形式包括模拟采集和光子计数采集。模拟采集能够实现高采样率, 通过优化采样位数实现大动态范围, 但探测电路的电噪声较大, 导致探测灵敏度不高。光子计数采集能够实现单光子量级的信号探测, 探测电路输出噪声小, 探测灵敏度极高, 对回波能量的要求大大降低, 但受死时间的约束, 光子计数率一般为数百兆赫兹, 探测动态范围小。本文设计了光子计数采集和模拟采集结合的多波束云-气溶胶探测激光雷达系统, 激光雷达输出 7 波束激光, 中心波束采用模拟采集探测, 基于模拟采集探测的大动态特性, 获取丰富的云、气溶胶探测数据, 其余 6 波束采用光子计数采集探测。光子计数采集对回波强度需求低, 设计采用单台激光器输出激光经过衍射分光元件对激光分束产生多波束小能量激光, 减少激光器使用数量, 提高系统集成度。

1.1 大气探测原理

激光雷达发射激光, 经过大气物质散射产生退偏和衰减, 同时会反射回波信号, 激光雷达获取回波信号, 并分离出两个正交的偏振态分量。回波信号功率^[8]可表示为

$$P(\lambda, z) = P\Delta Z \frac{A_r}{z^2} T_{\text{sys}} \beta(\lambda, z) \exp\left(-2 \int \alpha(\lambda, z) dz'\right) \quad (1)$$

$$P^{\parallel}(\lambda, z) = P\Delta Z \frac{A_r}{z^2} T_{\text{sys}} \beta^{\parallel}(\lambda, z) \exp\left(-2 \int \alpha(\lambda, z) dz'\right) \quad (2)$$

$$P^{\perp}(\lambda, z) = P\Delta Z \frac{A_r}{z^2} T_{\text{sys}} \beta^{\perp}(\lambda, z) \exp\left(-2 \int \alpha(\lambda, z) dz'\right) \quad (3)$$

式中, $P(\lambda, z)$ 为总回波功率; $P^{\parallel}(\lambda, z)$ 为平行偏振回波功率; $P^{\perp}(\lambda, z)$ 为垂直偏振回波功率; P 为激光发射功率; ΔZ 为距离分辨率; A_r 为望远镜有效接收面积; z 为探测距离, 表示为卫星轨道高度与

探测目标大气距离地面高度的差值； T_{sys} 为雷达系统光学效率； $\beta(\lambda, z)$ 为总后向散射系数； $\beta^{\parallel}(\lambda, z)$ 为平行后向散射系数； $\beta^{\perp}(\lambda, z)$ 为垂直后向散射系数； $\alpha(\lambda, z)$ 为总消光系数； $\beta(\lambda, z)$ 和 $\alpha(\lambda, z)$ 表示探测距离 z 处的后向散射系数和消光系数。

激光雷达的噪声主要来源于太阳和探测器的电噪声。其中，太阳产生的背景光噪声功率强度^[9]为

$$P_B = P_s A_r T_A^2(r/\Omega) R_\phi T_{\text{sys}} F_B \quad (4)$$

其中， P_s 为天空背景光强度； T_A 为单程大气透过率； r/Ω 为地球表面对太阳辐射的双向反射分布函数，通常取 $0.8/\pi$ ； R_ϕ 为接收视场角立体角； F_B 为滤波带宽。

大气探测激光雷达工作波段一般为可见光和近红外波段，选用的探测器主要为PMT(光电倍增管)探测器和APD(雪崩光电二极管)探测器。对于模拟探测，探测器的噪声主要来源于回波信号、太阳背景和探测器暗电流引起的散粒噪声，噪声表示如下：

$$n_s = \sqrt{2eF \cdot BW \cdot P(\lambda, z) E M} \quad (5)$$

$$n_b = \sqrt{2eF \cdot BW \cdot P_B E M} \quad (6)$$

$$n_i = \sqrt{2eF \cdot BW \cdot i_d} \quad (7)$$

其中， n_s 为回波信号产生的散粒噪声； n_b 为太阳背景光产生的散粒噪声； n_i 为暗电流产生的散粒噪声； e 为电子电荷， $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ； F 为噪声因子； BW 为探测带宽； M 为电流增益； E 为探测器辐射响应； i_d 为暗电流。

对于PMT探测器， E 、 i_d 通过查产品手册获取；对于APD探测器， E 通过探测器的量子效率转化， i_d 通过等效噪声功率转化，表示如下：

$$E = \frac{\eta \lambda e}{hc} \quad (8)$$

$$i_d = NEP^2 \cdot \left(\frac{\eta \lambda e}{hc} \right)^2 \cdot M^2 \cdot \frac{1}{2eF} \quad (9)$$

模拟探测情况下，单脉冲激光对应探测器的信噪比表示为

$$SNR = \sqrt{\frac{(P(\lambda, z) E \cdot M)^2}{n_s^2 + n_b^2 + n_i^2}} \quad (10)$$

光子计数采集的激光雷达，信噪比表示为

$$SNR = \sqrt{\frac{(N_s)^2}{N_s + N_b + N_d}} \quad (11)$$

其中， N_s 、 N_b 和 N_d 分别为回波信号、太阳背景光和探测器暗电流对应的光子计数值。

$$N_s = P(\lambda, z) \cdot \Delta t_l \cdot \eta \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (12)$$

$$N_b = P_B \cdot \frac{2\Delta Z}{c} \cdot \eta \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (13)$$

$$N_d = f_d \cdot \frac{2\Delta Z}{c} \quad (14)$$

其中， Δt_l 为激光脉冲宽度， f_d 为探测器暗计数率。

1.2 雷达系统设计

多波束云-气溶胶探测激光雷达系统由大能量双波长激光器、高重频单波长激光器、衍射分光元件、望远镜、光子计数探测模块、分光组件、3个模拟探测模块组成，如图1所示。多波束云-气溶胶探测激光雷达系统使用了两个激光器，其中大能量双波长激光器输出激光不分束，回波信号由望远镜接收传输给分光组件后进入模拟探测模块，高重频单波长激光器输出激光经过衍射分光元件分为6束等强度激光，回波信号与双波长激光回波共望远镜口径接收，通过视场分离6束激光的回波信号进入对应的光子计数探测模块。

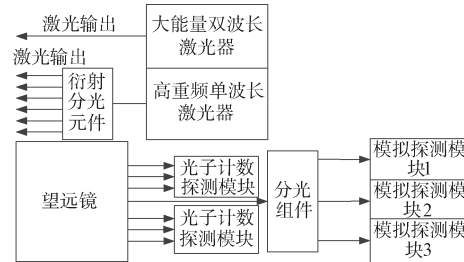


图1 多波束云-气溶胶探测激光雷达系统框图

Fig. 1 Block diagram of multi beam cloud and aerosol detection lidar system

大能量双波长激光器采用直接放大方案，单频光纤种子模块^[10]采用全光纤主振荡功率放大(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)结构^[11]的输出能量 $15 \mu\text{J}$ ，50 Hz重频激光，经过多级放大^[12]实现激光输出能量300 mJ，重频激光50 Hz，最后通过激光倍频晶体(LBO)将1 064 nm波长激光倍频获取双波长532 nm、1 064 nm激光输出，倍频效率50%。输出的激光经过扩束镜压缩发散角至 $110 \mu\text{rad}$ ^[9]。

高重频单波长激光器采用全固态激光器MOPA^[12]的方式实现大能量高光束质量的激光输出，其中，振荡器采用LD(激光二极管)泵浦腔主动调Q方案^[13]，输出激光为1 064 nm波长，脉冲能

量 5 mJ, 重频 1 kHz, 脉冲宽度 30 ns。经过两级放大和倍频, 输出 14 mJ 的 532 nm 激光, 输出的激光经过扩束和一维衍射光学元件^[14]分束, 获取 6 束间隔角为 0.4° 的等能量激光。

接收望远镜采用折反射设计, 卡塞格林式两反结构作为望远镜的主光路, 通过 3 片透镜优化边缘视场的像差, 使望远镜视场达到 2°, 望远镜总口径为 1 m, 焦距为 5 m。望远镜光路如图 2 所示。

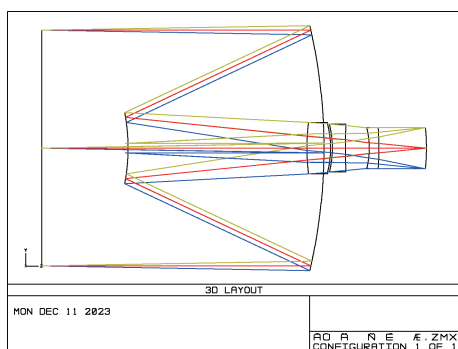


图 2 望远镜的光路图

Fig. 2 Optical path of the telescope

光子计数探测模块通过光纤连接到望远镜焦面处, 光纤的位置与边缘波束激光在望远镜焦面上成像的像点重合, 采用 0.4 nm 带宽的干涉滤光片完成滤波, 滤波后的信号由光子计数型 PMT 探测^[15]接收。

分光组件和模拟探测模块通过二向分色镜分离 532 nm 回波信号和 1 064 nm 回波信号, 通过偏振分光片分离 532 nm 垂直偏振回波信号和 532 nm 平行偏振回波信号, 通过 FP 标准具和干涉滤光片分别对 532 nm 回波信号和 1 064 nm 回波信号滤波, 最后 3 路回波信号进入对应的模拟探测模块, 其中, 532 nm 回波信号由 PMT 探测器接收, 1 064 nm 回波信号由 APD 探测器接收^[9]。

多波束云-气溶胶探测激光雷达系统参数见表 1。

2 模拟仿真

根据云层底部的高度将云划分为高、中、低三个云族^[16], 其中, 高云族的云底高度在 6 km 以上, 低云族云底的高度小于 2 km, 中云族介于两者之间。在模拟仿真过程中选取高云族的不可见卷云、中云族的高层云和低云族的层云进行仿真。

表 1 激光雷达硬件指标

Table 1 Values of the lidar

序号	物理量	数值
1	轨道高度	800 km
2	望远镜口径	1 m
3	望远镜焦距	5 m
4	望远镜单波束视场	200 μ rad
模拟探测通道		
5	工作波长	532 nm, 1 064 nm
6	波束	1
7	脉冲能量	150 mJ
8	脉宽	20 ns
9	重频	50 Hz
10	滤波带宽	0.04 nm@532 nm 0.4 nm@1 064 nm
11	光学效率	0.6
光子计数探测通道		
12	工作波长	532 nm
13	波束	6
14	脉冲能量	3.5 mJ
15	脉宽	20 ns
16	重频	1 000 Hz
17	滤波带宽	0.4 nm@532 nm
18	光学效率	0.8
模拟探测 PMT 探测器		
19	辐射灵敏度	130 mA/W
20	电流增益	2.6×10^5
21	噪声因子	2
22	探测带宽	3 MHz
23	暗电流	10 nA
模拟探测 APD 探测器		
24	量子效率	2%
25	电流增益	100
26	噪声因子	5
27	探测带宽	5 MHz
28	等效噪声功率	0.2 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
光子计数 PMT 探测器		
29	量子效率	30%
30	暗计数率	100 Hz
31	计数率	300 MHz

大气气溶胶根据应用模式主要划分为大陆洁净型气溶胶、大陆污染型气溶胶、沙尘型气溶胶、海洋型气溶胶和极地型气溶胶。其中, 大陆污染型气溶胶是指受到人类的影响相当大的区域的气溶胶, 含有大量的烟尘, 与人类活动和城市分布具有紧密关联。本文对气溶胶探测的仿真采用该气溶胶模型。

2.1 雷达对不可见卷云的探测模拟

建立不可见卷云大气模型,不可见卷云的云厚度一般不超过 2 km,设置不可见卷云的中心厚度为 3 km,边缘厚度为 1 km,云底高度 9 km,后向散射系数为 $2.9 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$,消光系数 0.04 km^{-1} ,退偏比为 0.1。累计共 14 个激光脉冲,分别仿真模拟探测的 532 nm 垂直偏振回波探测通道、532 nm 平行偏振回波探测通道、1 064 nm 回波探测通道,

以及光子计数探测通道的回波信号强度和信噪比。

532 nm 平行偏振回波探测通道回波强度如图 3 所示。不可见卷云的回波强度为 $5.5 \times 10^{-10} \sim 7.1 \times 10^{-10} \text{ W}$,雷达探测信噪比为 21.6 ~ 24.8,可以看到 532 nm 激光能够穿透不可见卷云,获取整层不可见卷云的内部结构,且回波激光功率衰减不大,雷达对不可见卷云的探测效果良好。

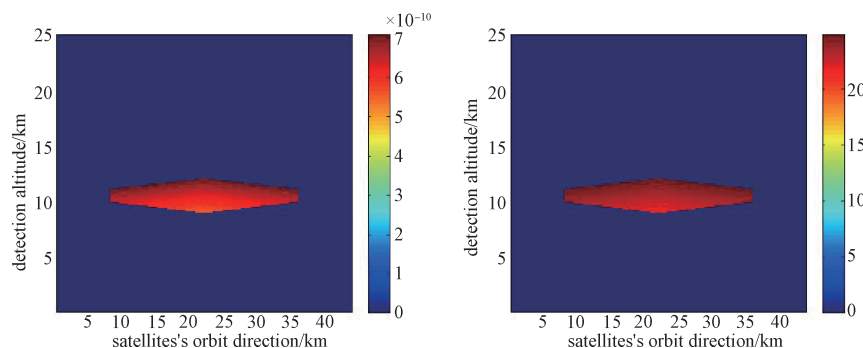


图 3 532 nm 平行偏振回波探测通道不可见卷云信号功率和信噪比

Fig. 3 The power and SNR ratio of the signal generated by invisible cirrus obtained from 532 nm parallel polarization echo detection channel

532 nm 垂直偏振回波探测通道回波强度如图 4 所示。不可见卷云的回波强度为 $5.5 \times 10^{-11} \text{ W} \sim$

$7.1 \times 10^{-11} \text{ W}$,雷达探测信噪比为 4.7 ~ 5.7,探测信噪比良好,能够实现对不可见卷云的探测。

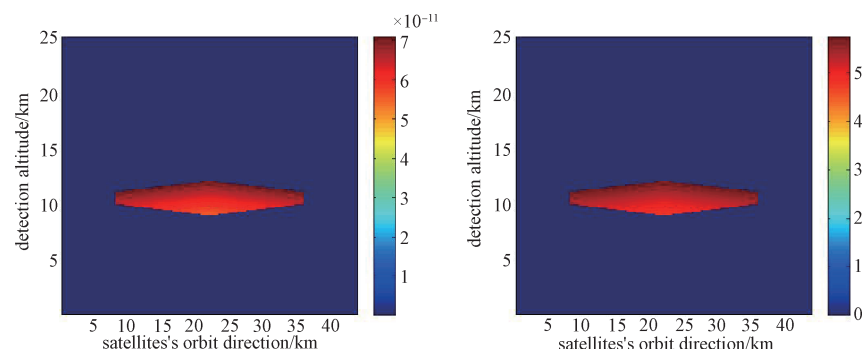


图 4 532 nm 垂直偏振回波探测通道不可见卷云信号功率和信噪比

Fig. 4 The power and SNR ratio of the signal generated by invisible cirrus obtained from 532nm vertical polarization echo detection channel

1 064 nm 回波探测通道回波强度如图 5 所示。不可见卷云的回波强度为 $6.44 \times 10^{-10} \sim 8.24 \times 10^{-10} \text{ W}$,探测信噪比为 2.62 ~ 3.20,可以看到 1 064 nm 激光对不可见卷云的探测能力与 532 nm 激光比相对较弱,探测信噪比依然满足探测需求。

根据光子计数采集激光雷达的信噪比公式,仿真光子计数探测通道对不可见卷云探测的信噪比约为 0.23 ~ 0.32,累计脉冲个数需进一步增加至约 3 万个脉冲,信噪比达到 2 ~ 3,能够实现对不可

见卷云的探测,但水平分辨率将变大,失去探测的意义。此处,光子计数探测通道仿真对薄卷云进行探测能力,建立薄卷云大气模型,中心厚度为 3 km,边缘厚度为 1 km,云底高度 9 km,后向散射系数为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$,消光系数 0.2 km^{-1} 。光子计数探测通道回波光子数为 0.4 ~ 1.4 个,探测信噪比为 0.4 ~ 1.5,如图 6 所示,光子计数探测通道对 3 km 厚度的薄卷云穿透能力大约为 2 km,剩余 1 km 的探测信噪比差,需提高激光脉冲累计数量

实现 3 km 正常云的探测。

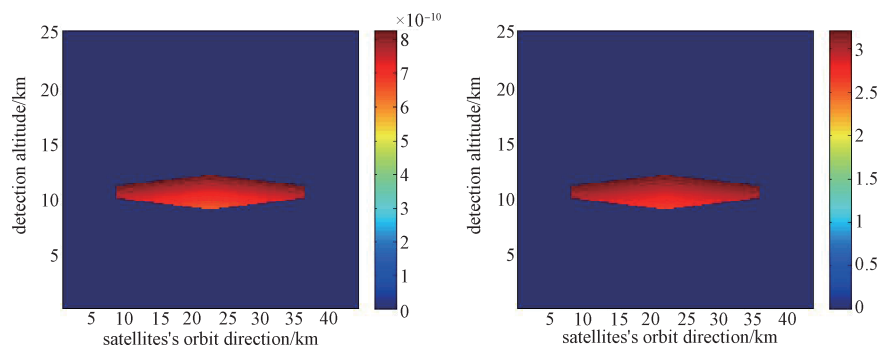


图 5 1 064 nm 回波探测通道不可见卷云信号功率和信噪比

Fig. 5 The power and SNR ratio of the signal generated by invisible cirrus obtained from 1 064 nm echo detection channel

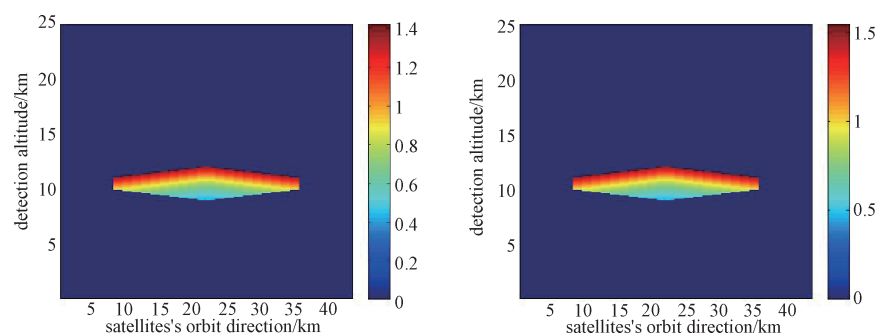


图 6 光子计数探测通道薄卷云信号功率和信噪比

Fig. 6 The power and SNR ratio of the signal generated by thin cirrus obtained from photon counting detection channel

2.2 雷达对高层云的探测模拟

建立高层云大气模型, 高层云的厚度一般在 5 km 以下。设置高层云的中心厚度为 6 km, 边缘厚度为 1 km, 云底高度 4 km, 后向散射系数为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 消光系数为 18 km^{-1} , 退偏比为 0.1。

532 nm 平行偏振回波探测通道回波强度如图 7

所示, 高层云的回波强度最大为 $2.1 \times 10^{-7} \text{ W}$, 最大信噪比为 453.6。随着激光对云层的深入, 回波强度和信噪比均快速下降, 根据图 8 所示的局部信噪比图可知, 激光深入云层约 220 m, 激光能够刻画高层云的云顶起伏, 但对高层云的穿透能力不佳。

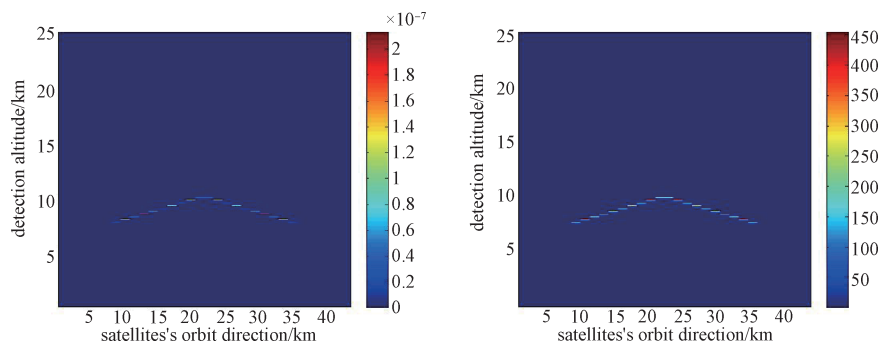


图 7 532 nm 平行偏振回波探测通道高层云信号功率和信噪比

Fig. 7 The power and SNR ratio of the signal generated by altostratus obtained from 532 nm parallel polarization echo detection channel

532 nm 垂直偏振回波探测通道回波强度如图 9 所示。高层云的回波强度最大为 $2.2 \times 10^{-8} \text{ W}$, 最大

信噪比为 147.4。回波强度和信噪比随激光进入云层的深度快速下降, 根据图 10 所示的局部信噪比

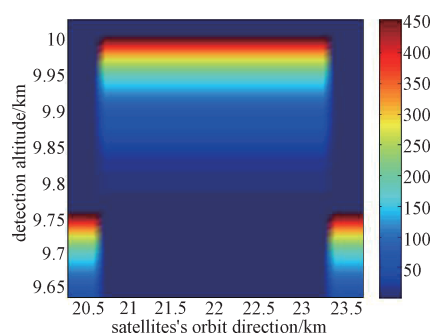


图 8 532 nm 平行偏振回波探测通道高层云局部信噪比
Fig. 8 The partial view of SNR of the signal generated by altostratus obtained from 532 nm parallel polarization echo detection channel

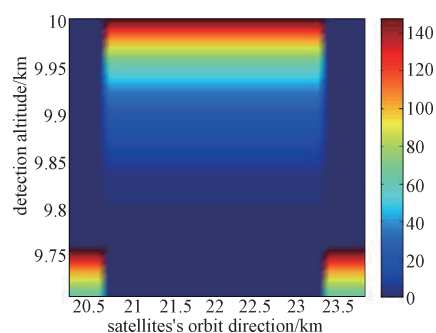


图 10 532 nm 垂直偏振回波探测通道高层云局部信噪比
Fig. 10 The partial view of SNR of the signal generated by altostratus obtained from 532 nm vertical polarization echo detection channel

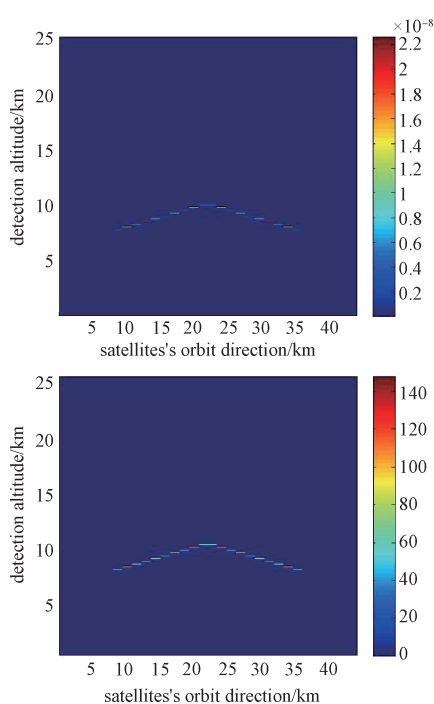


图 9 532 nm 垂直偏振回波探测通道高层云信号功率和信噪比
Fig. 9 The power and SNR ratio of the signal generated by altostratus obtained from 532 nm vertical polarization echo detection channel

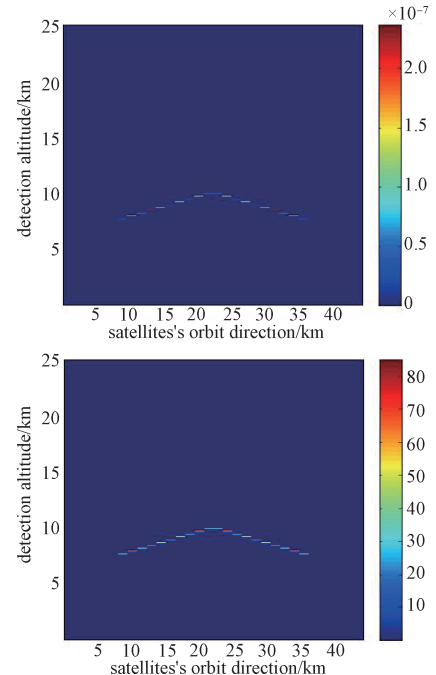


图 11 1 064 nm 回波探测通道高层云信号功率和信噪比
Fig. 11 The power and SNR ratio of the signal generated by altostratus obtained from 1 064 nm echo detection channel

图, 激光深入云层约 200 m, 结论与 532 nm 平行偏振回波探测通道基本一致。

1 064 nm 回波探测通道回波强度如图 11 所示, 高层云的回波强度最大为 2.3×10^{-7} W, 最大信噪比为 84.8。通过观察图 12 所示的局部信噪比, 当 1 064 nm 激光深入云层约 180 m 时, 信噪比接近 0, 在对高层云的探测上与 532 nm 激光探测能力相当。

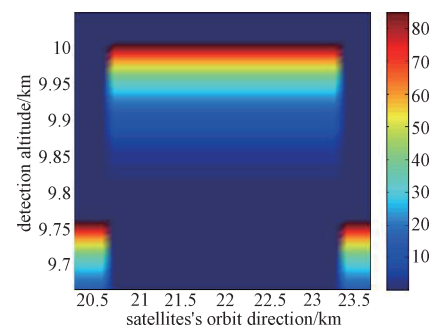


图 12 1 064 nm 回波探测通道高层云局部信噪比
Fig. 12 The partial view of SNR of the signal generated by altostratus obtained from 1 064 nm echo detection channel

光子计数探测通道回波强度如图 13 所示, 高层云的回波光子数最大为 84, 最大信噪比为 79。从图 14 所示的信噪比局部放大图可知, 光子计数探测通道对云层的探测厚度约为 110 m, 与模拟探测通道相比, 光子计数探测对云的穿透能力有所下降。

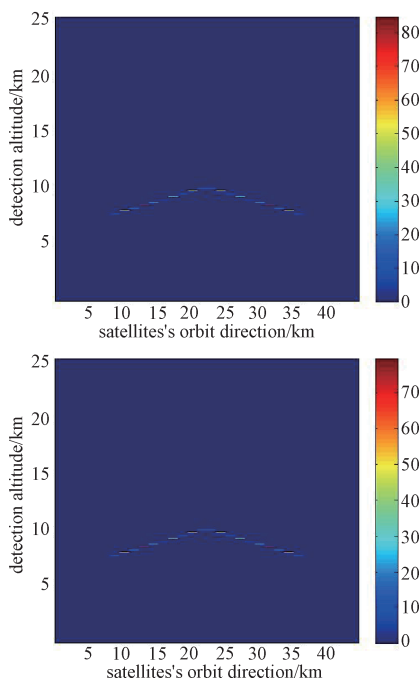


图 13 光子计数探测通道高层云回波光子数和信噪比
Fig. 13 The power and SNR ratio of the signal generated by altostratus obtained from photon counting detection channel

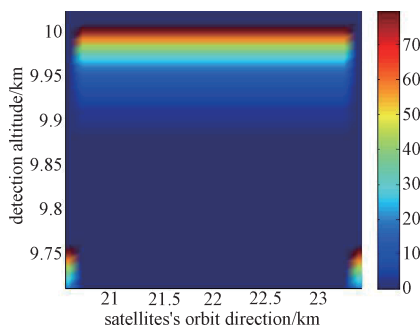


图 14 光子计数探测通道高层云回波信噪比局部放大图
Fig. 14 The partial view of SNR of the signal generated by altostratus obtained from photon counting detection channel

2.3 雷达对中层云的探测模拟

低云族中层云的厚度一般在 5 km 以下, 后向散射系数为 $3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 消光系数为 59.5 km^{-1} , 与高层云相比, 层云具有更高的消光比, 激光具备对层云顶顶部高度的刻画能力, 同时对层云的穿

透能力低于对高层云的穿透能力, 此处不再给出具体的仿真结果。

2.4 雷达对大陆污染型气溶胶的探测模拟

建立大陆污染型气溶胶大气模型^[17], 设置气溶胶层中心厚度为 3 km, 边缘厚度为 1 km, 分布于近地表, 后向散射系数为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 消光系数 0.3 km^{-1} , 退偏比为 0.2。分别仿真模拟探测的 532 nm 垂直偏振回波探测通道、532 nm 平行偏振回波探测通道、1 064 nm 回波探测通道的回波信号强度和信噪比。

532 nm 平行偏振回波探测通道回波强度如图 15 所示, 污染型气溶胶的回波强度为 $2 \times 10^{-10} \sim 1.3 \times 10^{-9} \text{ W}$, 雷达探测信噪比为 12 ~ 34。进一步通过观察图 16 给出的气溶胶局部信噪比图, 对于 3 km 中心厚度的污染型气溶胶层, 随着激光对气溶胶层的深入, 雷达的信噪比有明显的下降, 但临近地面处, 信噪比依然在 10 以上, 说明雷达对污染型气溶胶层的穿透能力良好, 能够实现整层探测。

532 nm 垂直偏振回波探测通道回波强度如图 17 所示, 污染型气溶胶的回波强度为 $5 \times 10^{-11} \sim 3.2 \times 10^{-10} \text{ W}$, 雷达探测信噪比为 4.5 ~ 15.7, 进一步

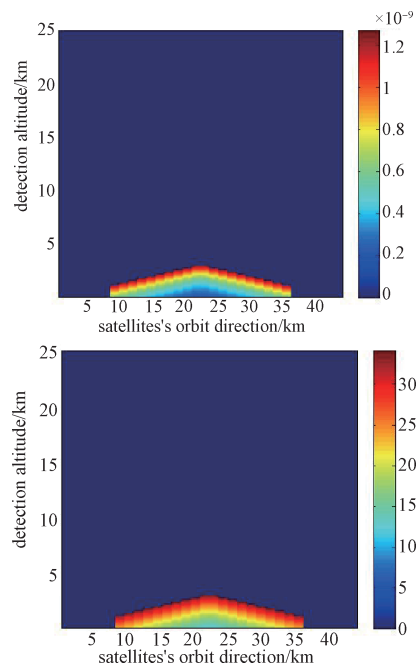


图 15 532 nm 平行偏振回波探测通道污染型气溶胶信号功率和信噪比

Fig. 15 The power and SNR ratio of the signal generated by polluting aerosols obtained from 532 nm parallel polarization echo detection channel

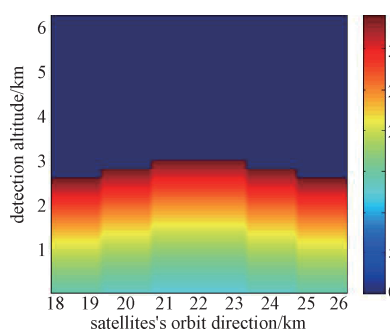


图 16 532 nm 平行偏振回波探测通道污染型气溶胶局部信噪比

Fig. 16 The partial view of SNR of the signal generated by polluting aerosols obtained from 532 nm parallel polarization echo detection channel

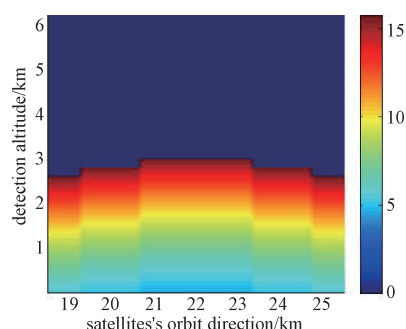


图 18 532 nm 垂直偏振回波探测通道污染型气溶胶局部信噪比

Fig. 18 The partial view of SNR of the signal generated by polluting aerosols obtained from 532 nm vertical polarization echo detection channel

通过观察图 18 给出的气溶胶局部信噪比图，对于 3 km 中心厚度的污染型气溶胶层，随着激光对气溶胶层的深入，雷达的信噪比有明显的下降，但临近地面处，信噪比依然在 5 以上，532 nm 垂直偏振回波探测通道对污染型气溶胶探测效果良好。

1 064 nm 回波探测通道回波强度如图 19 所示，

污染型气溶胶的回波强度为 $2.7 \times 10^{-10} \sim 1.6 \times 10^{-9} \text{ W}$ ，雷达探测信噪比为 1.2 ~ 5.4。图 20 所示的气溶胶局部信噪比图给出了 1 064 nm 激光深入气溶胶层的衰减情况，说明当该雷达探测相同厚度的气溶胶层时，532 nm 波长探测较 1 064 nm 波长探测略有优势。

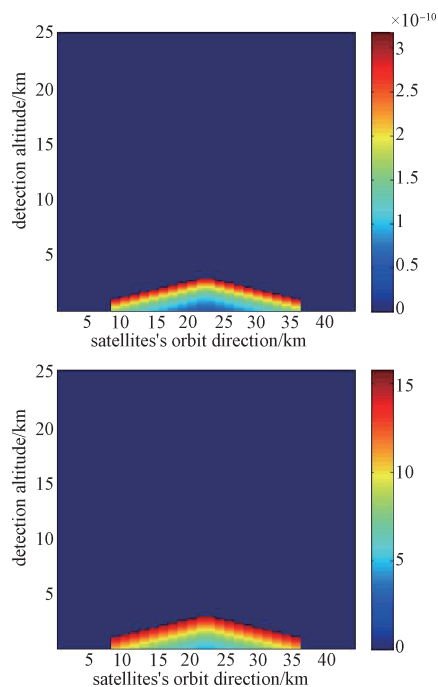


图 17 532 nm 垂直偏振回波探测通道污染型气溶胶信号功率和信噪比

Fig. 17 The power and SNR ratio of the signal generated by polluting aerosols obtained from 532 nm vertical polarization echo detection channel

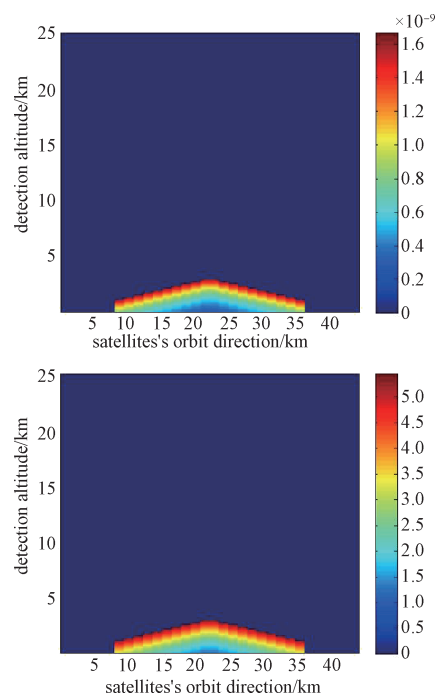


图 19 1 064 nm 回波探测通道污染型气溶胶信号功率和信噪比

Fig. 19 The power and SNR ratio of the signal generated by polluting aerosols obtained from 1 064 nm echo detection channel

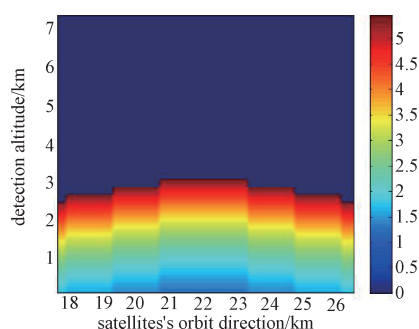


图 20 1 064 nm 回波探测通道污染型气溶胶局部信噪比

Fig. 20 The partial view of SNR of the signal generated by polluting aerosols obtained from 1 064 nm echo detection channel

3 结束语

本文设计了一种多波束云-气溶胶探测激光雷达, 共输出 7 个激光波束。其中, 中心波束具备 532 nm、1 064 nm 双波长偏振探测能力, 通过模拟探测体制获取云、气溶胶的垂直廓线, 边缘 6 波束激光由一个激光器分光获取, 通过单波长结合光子计数探测体制获取云的垂直廓线, 激光雷达幅宽可达到 30 km, 提高雷达单次数据获取效率。经过模拟仿真, 多波束云-气溶胶探测激光雷达可以实现对高空卷云、污染型气溶胶以及后向散射系数在二者之间的云、气溶胶层的有效穿透, 能够获取整层云、气溶胶的垂直廓线, 但对高层云、层云等消光系数大的云层, 虽然对其顶层探测具有极高的信噪比, 但激光对这些云层的穿透能力为百米量级, 可有效刻画云顶的起伏。对于光子计数探测, 本方案中考虑到小型化设计的要求, 光子计数探测的激光光源能量较低, 可实现对薄卷云以及后向散射系数大于薄卷云的云层的探测, 对高层云和层云等后向散射系数较大的云层的穿透能力略低于模拟探测, 最终通过仿真证明了所设计多波束云-气溶胶探测激光雷达在气溶胶和卷云整层的垂直廓线和高层云、层云的云顶高度的探测上具有良好的探测效果。

参考文献

[1] 段婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 252-261.
DUAN Jing, MAO Jietai. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 252-261.

[2] 周秀骥, 吴国雄. 中国气象事业发展战略研究重大科学技术问题卷[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
[3] 寇蕾蕾, 邵海阳, 林正健, 等. 星载主动遥感测云现状与展望[J]. 遥感学报, 2023, 27(9): 2041-2059.
KOU Leilei, GAO Haiyang, LIN Zhengjian, et al. Status and prospect of cloud measurement by satellite active remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(9): 2041-2059.
[4] HOLBEN B N, ECK T F, SLUTSKER I, et al. AERONET-A federal instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. Remote Sensing Environment, 1998, 66(1): 1-16.
[5] 陈卫标, 刘继桥, 侯霞, 等. 大气环境监测卫星激光雷达技术[J]. 上海航天, 2023, 40(3): 13-20.
CHEN Weibiao, LIU Jiqiao, HOU Xia, et al. Lidar technology for atmosphere environment monitoring satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2023, 40(3): 13-20.
[6] 康翔宇, 郭骥, 曾祥培, 等. 基于米散射激光雷达的大气气溶胶检测系统设计[J]. 光学仪器, 2021, 43(2): 66-71.
KANG Xiangyu, GUO Ji, ZENG Xiangyu, et al. Design of an atmospheric aerosol detection system based on a Mie scattering lidar[J]. Optical Instruments, 2021, 43(2): 66-71.
[7] 黄忠伟, 王雍恺, 闭建荣, 等. 气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望[J]. 遥感学报, 2022, 26(5): 834-851.
HUANG Weizhong, WANG Yongkai, BI Jianrong, et al. An overview of aerosol lidar: Progress and prospect[J]. National Remote sensing Bulletin, 2022, 26(5): 834-851.
[8] 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
[9] 赵一鸣, 李飞, 潘超, 等. 基于星载双波长偏振探测的大气探测激光雷达系统设计[J/OL]. 中国空间科学技术, 2023.
ZHAO Yiming, LI Fei, PAN Chao, et al. The design of space-borne atmospheric detection lidar based on dual-wavelength polarization detection[J/OL]. Chinese Space Science and Technology, 2023.
[10] 姚波, 陈群峰, 陈雨君, 等. 基于超稳腔 PDH 稳频的 280 MHz 线宽 DBR 光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 1-9.
[11] 张大勇, 张昆, 朱辰, 等. 63.2 W 高峰值功率窄脉宽全光纤脉冲光纤激光器[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 1234-1237.
[12] 孟俊清, 张鑫, 蒋静, 等. 高分七号卫星激光测高仪激

- 光器设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(3): 96-102.
- [13] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 刘文静, 庞辉, 曹阿秀, 等. 高衍射效率连续面形分束器的设计与制备[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 1-8.
- LIU Wenjing, PANG Hui, CAO Axiu, et al. Design and preparation of continuous surface beam splitter with high diffraction efficiency[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 1-8.
- [15] 李建新, 王应宗. 光电倍增管单光子探测器的噪声特性研究[J]. 延安大学学报, 2006, 25(1): 31-33.
- LI Jianxin, WANG Yingzong. On noise characteristics of monophoton detector of photomultiplier[J]. Journal of Yanan University, 2006, 25(1): 31-33.
- [16] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [17] 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 1-10.
- [作者简介]
- 李 飞 1991 年生, 硕士, 工程师。
- 赵一鸣 1990 年生, 博士, 研究员。
- 张鹏飞 1988 年生, 硕士, 工程师。
- 李 静 1985 年生, 博士, 研究员。
- 魏祥通 1992 年生, 硕士, 工程师。
- 王丽东 1987 年生, 硕士, 高级工程师。
- 于 勇 1971 年生, 博士, 研究员。
- (本文编辑: 杨秀丽)