

阵列光束棱镜扫描光束指向及点云精度分析

杨 峰^{1,2}, 石振东^{2*}, 姜 勇², 冷 杰², 王雅兰², 陈德章², 徐 林²,
宋 昭², 徐诗月², 贾 凯², 高剑波², 白 杨², 周寿桓¹

(1. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065;
2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 在面阵扫描成像激光雷达中, 阵列光束照明与棱镜扫描相结合实现了高能量利用率、高分辨率和宽探测视场, 但阵列子光束倾斜入射棱镜, 破坏了光束传输的旋转对称性, 棱镜对子光束偏转能力存在差异, 规则光束阵列产生了形状畸变, 导致光束指向误差, 影响点云位置精度。首先, 将阵列光束与棱镜结合的圆锥扫描方式分解为多角度入射多波束并行扫描, 通过所有子光束的传输特征来综合表征阵列光束传输特征; 然后, 采用三维矢量光学方法推导了阵列光束在棱镜中的传输过程, 建立了子光束指向变化与棱镜扫描角度的关系; 最后, 通过对机载激光雷达棱镜扫描成像过程的数值仿真, 建立了光束指向变化与点云数据质量的联系。仿真结果表明: 阵列光束 (3×3) 棱镜扫描系统在航高 0.5 km 时, 光束阵列畸变导致平面误差 RMS 约为 5 cm, 并随航高呈线性变化; 斜率约为 0.1 m/km, 并随着阵列光束规模和子光束角间距增加点云平面精度随之下降。通过对棱镜扫描过程中光束阵列畸变规律掌握, 为后续机载飞行试验数据的校正、阵列光束结合多棱镜扫描系统的设计提供了基础。

关键词: 机载激光成像雷达; 阵列光束; 棱镜扫描; 指向误差; 点云精度

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220689

0 引 言

棱镜扫描系统通过光束指向控制实现光束指向调整用于扩大扫描探测视场, 或改变成像视轴实现大视场和高分辨率兼顾的光学成像, 在光学侦察、激光通信、激光雷达等设备中有着广泛的应用^[1-2]。在机载激光成像雷达中, 棱镜扫描系统作为透射式扫描结构, 光学利用率高, 可有效减小系统的体积, 具有功耗低、精度高、自身稳定性能好等优点^[3]。其圆锥型扫描方式可实现目标多视角观测, 减少目标因光线直线传播导致的三维成像阴影区域; 在激光测深应用方面, 由于其保持与水面入射角度一致, 可有效减少水体镜面反射, 减小回波动态范围。

激光雷达工作方式分为单点扫描和面阵扫描。在单点扫描中, 采用单波束结合棱镜扫描的激光雷达

有 Seahawk^[4], Teledyne Geospatial CZMIL system^[5], 大疆 Livox^[6] 等。采用面阵探测与棱镜扫描结合的激光雷达有 Geiger-Mode lidar^[7], Leica SPL100^[8] 等。面阵扫描激光雷达一般采用衍射光学元件 (Diffractive Optical Element, DOE), 将单波束转换多波束阵列, 子光束与探测器象元视场一一对应, 提高探测器占空比, 即提升激光能量利用率。

在被动光学系统中, 棱镜引起焦平面上光学影像畸变^[9-10]。而在主动光学系统中, 激光光束在收发过程中往返棱镜, 根据光路可逆棱镜畸变相互抵消, 不影响探测器能量接收, 但是棱镜对激光束有光斑压缩作用, 激光远距离传输后, 目标处光斑形状发生变形, 导致能量扩散、目标回波强度降低, 影响远场指向精度^[11]。

文中主要针对阵列光束与棱镜结合的圆锥扫

收稿日期: 2023-01-10; 修订日期: 2023-02-20

基金项目: 国家高分专项; 山东省重大科技创新工程专项 (2018SDKJ0102-6)

作者简介: 杨峰, 男, 研究员, 硕士, 主要从事激光器及激光雷达方面的研究。

通讯作者: 石振东, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事机载激光雷达方面的研究。

描导致激光雷达光束指向误差问题,其来源于多角度(正射和斜射)、多波束并行入射棱镜时,棱镜对各个子光束偏转能力的差异性。当阵列子光束正射棱镜时,其出射光束不随扫描角度而改变,具有光束传输的旋转对称性。而阵列子光束斜射棱镜,破坏了光束传输的旋转对称性,不同扫描位置对光束偏转能力存在差异,而阵列子光束位于不同扫描位置。因此,规则阵列光束经过棱镜后将产生形状畸变,导致光束指向误差,影响点云位置精度。采用三维矢量光学方法推导了阵列光束在棱镜中的传输过程,建立了子光束指向变化与棱镜扫描角度的关系,通过所有子光束的传输特征来综合表征阵列光束传输特征。通过建立三维数字仿真场景,模拟机载激光雷达棱镜对地扫描成像过程,建立了光束指向变化与空间位置误差的联系,通过模拟原始数据解算,获取数字场景点云数据,提取屋顶和道路平面数据;以平面拟合 RMS 值作为点云位置精数量化指标^[12],评估了阵列光束畸变对点云数据质量影响,以及在不同航高下位置精度的变化情况,最后分析了阵列光束规模和子光束角间距增加对点云数据质量的影响。通过对棱镜扫描过程中光束阵列畸变规律掌握,为后续机载飞行试验数据的校正奠定了基础。

1 激光雷达系统

激光雷达系统组成如图 1 所示,激光器发射激光光束通过准直镜后,单束激光被衍射光学元件分为 $N \times N$ 子光束,经过双 45° 反射镜后,多波束激光入射到棱镜上表面,该棱镜采用菲涅耳结构 (Fresnel-type

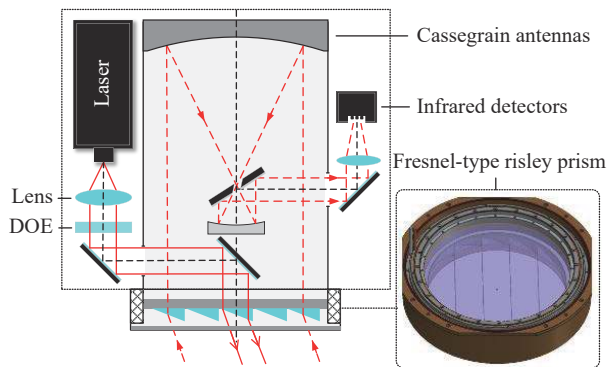


图 1 激光雷达系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of lidar system

Risley Prism), 如图 1 虚线框所示,通过棱镜的旋转实现光束的指向偏转和大视场扫描,目标回波再次经过棱镜,通过天线聚焦于面阵探测器(像元: $N \times N$, 阵列光束与探测器象元一一对应),即完成激光探测过程。

2 光束在棱镜中传输过程

阵列光束与棱镜结合的圆锥扫描方式可分解为不同入射角度子光束同时通过棱镜进行多波束并行扫描,将多波束问题简化为单波束问题,通过分析所有子光束的传输特征综合表征阵列光束传输特征。阵列光束在棱镜旋转过程中的传输过程,如图 2 所示,菲涅耳棱镜采用多面子棱镜组合而成^[5],入射光束仅经过中心子棱镜,因此菲涅耳棱镜结构简化为单片子棱镜进行光束传输分析。入射平面 (Σ_1) 上,棱镜旋转轴与平面 Σ_1 垂直,并与光束阵列中心点位置重合,入射阵列光束在平面 Σ_1 上的光斑分布不变,在棱镜旋转过程中,两者发生相对运动,以旋转轴或者光束阵列中心为原点,在同一半径 ($R_1, R_2 \dots$) 上的子光束具有相同周视光束扫描轨迹以及光束指向变化规律,但位于不同扫描位置的子光束存在固定相位差,其在棱镜内部周视光束扫描轨迹如图 2(a) 中绿色部分的外包络面所示,红色部分的外包络面为出射平面 (Σ_2) 入射点法线旋转剖面。

图 2(b) 和图 2(c) 为经过旋转轴并与棱镜棱线垂直的剖面图 (Σ_4),在入射平面 Σ_1 上,入射光束和入射点法线 (N_1) 方向不变,因此其入射角 (α) 和折射角 (β) 保持不变,如图 2(b) 所示。在出射平面 Σ_2 上,从法线 N_2 角度看,入射光束,即平面 Σ_1 的折射光束,倾斜入射到出射平面 Σ_2 上,其光束入射角 (γ 或 γ') 随棱镜旋转而改变,因此其折射角 (δ 或 δ') 也随棱镜旋转而改变,如图 2(c) 所示。总得来说,阵列子光束倾斜入射棱镜,破坏了光束传输的旋转对称性,在同一旋转半径 (R) 上的子光束位于棱镜周视光束扫描轨迹不同位置,不同扫描位置对光束偏转能力存在差异,具有不同折射角度 (δ' 和 δ),规则阵列光束经过棱镜后将产生形状畸变,导致光束指向误差。

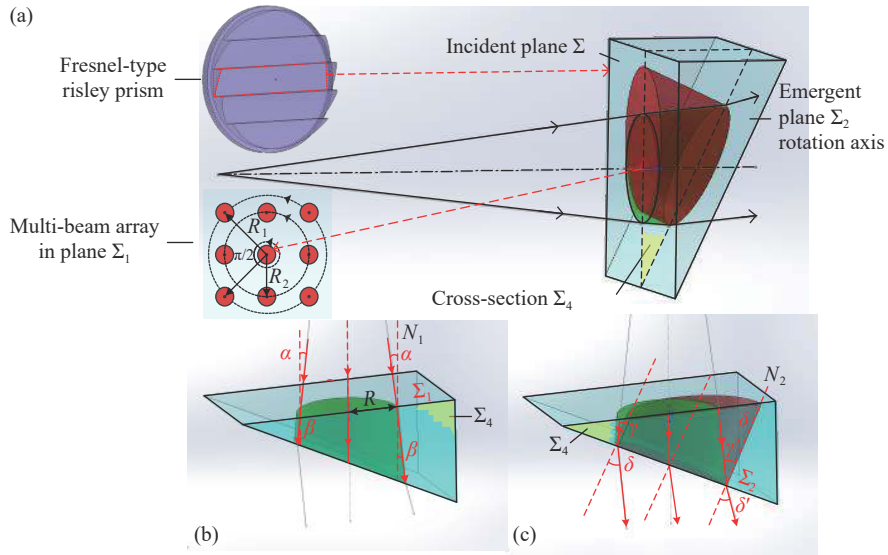


图 2 (a) 阵列光束在棱镜旋转过程中的传输过程; (b) 入射平面传输过程; (c) 出射平面传输过程

Fig.2 (a) Propagation process of array beam during prism rotation; (b) Transmission process of incidence plane; (c) Transmission process of output plane

3 阵列光束经棱镜扫描三维成像数学模型

棱镜出射光束方向矢量和目标处的空间坐标采用三维矢量光学方法求解,从棱镜出射光束角度和目标空间坐标两个方面去量化分析畸变影响。阵列光束通过菲涅耳棱镜光束扫描过程,如图 3 所示,以 DOE 位置为光束分束的起点 M_0 ,子光束方向向量 $S_{1,i-j}$ 与入射平面 Σ_1 交点为 $M_{1,i-j}$,经棱镜表面折射,在棱镜内部的方向向量为 $S_{2,i-j}$,与出射平面 Σ_2 交点为 $M_{2,i-j}$,经棱镜出射斜面折射后的出射方向为 $S_{3,i-j}$,经过空间传输后,光束与目标平面 Σ_3 的交点为 $M_{3,i-j}$,其中, d_0 为 M_0 到平面 Σ_1 垂直距离, d_1 为棱镜中心位置与平面 Σ_1 的垂直距离,与 d_2 为目标平面 Σ_3 与入射平面 Σ_1 之间的距离。

基于三维矢量光学方法的阵列光束通过菲涅耳棱镜光束扫描三维成像数值仿真流程,如图 4 所示。

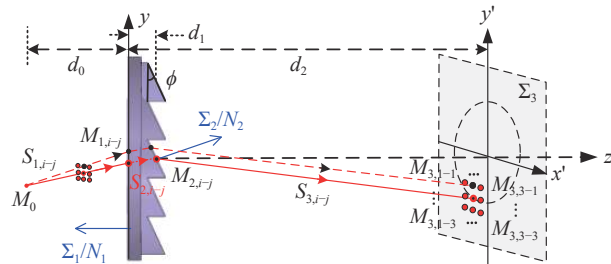


图 3 阵列光束通过菲涅耳棱镜光束扫描过程

Fig.3 Scanning process of array beam through Fresnel-type risley prism

三维矢量光线传输 3 个要素: 起点位置 M_i , 光线方向向量 S_i , 入射平面方程 Σ_i ; 然后求解光线与平面 Σ_i 交点 M_{i+1} , 折射光束 S_{i+1} , 结合下一个平面方程 Σ_{i+1} , 求解 M_{i+2} 和 S_{i+2} ; 串行求解到最后一个表面。

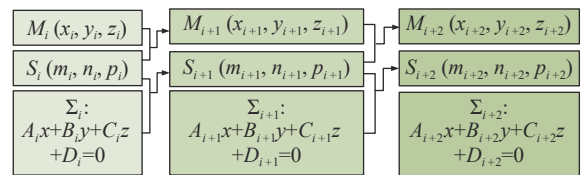


图 4 基于三维矢量光学方法光束传输流程图

Fig.4 Flow chart of beam transmission based on three-dimensional vector optics

入射光线起点 $M_i(x_i, y_i, z_i)$ 和方向向量 $S_i(m_i, n_i, p_i)$, 则直线上任意一点 $M(x, y, z)$ 满足直线参数 (t_i) 方程:

$$\frac{x-x_i}{m_i} = \frac{y-y_i}{n_i} = \frac{z-z_i}{p_i} = t_i \quad (1)$$

光线入射平面 Σ_i 方程:

$$A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0 \quad (2)$$

当直线与平面 Σ_i 相交, $M(x, y, z)$ 也满足 Σ_i 平面方程, 联合公式 (1)、(2) 得到参数 t_i 和 M_{i+1} :

$$t_i = \frac{A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i + D_i}{A_i m_i + B_i n_i + C_i p_i} \quad (3)$$

$$M_{i+1} = [m_i t_i + x_i, n_i t_i + y_i, p_i t_i + z_i] \quad (4)$$

基于 Snell 公式矢量形式^[10], 入射光束 S_i 经过平面 Σ_i 后, 折射光束方向 S_{i+1} :

$$S_{i+1} = \mu S_i + N_i \sqrt{1 - \mu^2 [1 - (N_i \cdot S_i)^2] - \mu N_i (N_i \cdot S_i)} \quad (5)$$

式中: $\mu = n_1/n_2$; 平面 Σ_i 法向量 $N_i = [A_i, B_i, C_i]$; n_1 为入射光空间介质折射率; n_2 为折射光空间折射率; $N_i \cdot S_i$ 为法向量 N_i 和入射光束向量 S_i 的点积, 即 $N_i \cdot S_i = A_i m_i + B_i n_i + C_i p_i$.

其中, 入射棱镜前表面 $\Sigma_1: z=0$, 目标表面 $\Sigma_3: z=d_2$, 棱镜后表面 Σ_2 的法向量为:

$$N_2 = [\sin(\phi)\cos(\varphi), \sin(\phi)\sin(\varphi), \cos(\phi)] \quad (6)$$

以及平面 Σ_2 上棱镜中心坐标 $(0,0,d_1)$, 根据平面的点法式方程可得 Σ_2 平面方程为:

$$\Sigma_2: \sin(\phi)\cos(\varphi)x + \sin(\phi)\sin(\varphi)y + \cos(\phi)(z - d_1) = 0 \quad (7)$$

式中: ϕ 为棱镜顶角; φ 为棱镜扫描角度。

依次类推, 目标处激光脚点空间位置坐标为:

$$M_{i+1} = t_i \cdot S_i + M_i \quad (8)$$

根据阵列子光束入射方向向量 $S_{1,i-j}(i,j=1,2,3 \dots)$ (含正射和斜射), 分别求解棱镜出射光束方向向量 $S_{3,i-j}(i,j=1,2,3 \dots)$ 和目标处的空间坐标 $M_{3,i-j}(i,j=1,2,3 \dots)$ 通过确定所有子光束的出射光束的角度和目标处的空间位置来综合表征阵列光束传输特征。

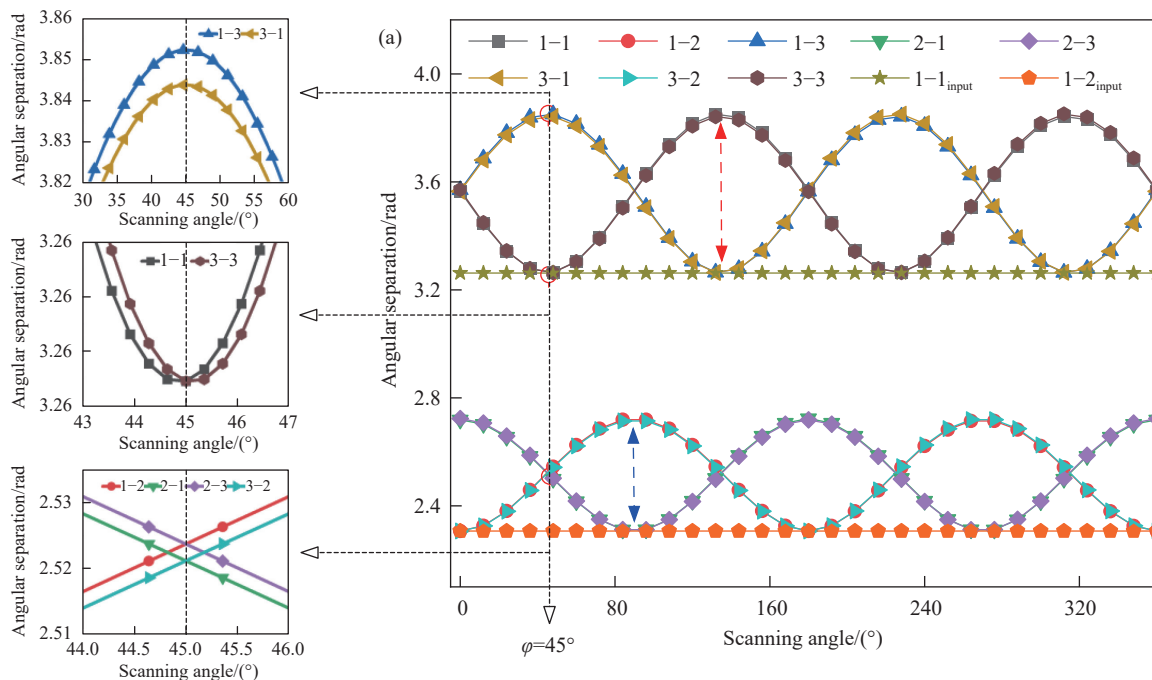
4 阵列光束畸变分析

4.1 阵列光束空间角度畸变分析

阵列光束通过棱镜后的出射光束方向矢量由公式 (5) 求解获得, 子光束阵列规模设定为 3×3 , 相邻子光束角间距为 0.133° 。其中中心子光束 A_{2-2} 垂直入射平面 Σ_1 (正射情况), 在平面 Σ_2 中入射、折射角度为定值, 不随棱镜旋转而改变, 因此阵列光束空间形状畸变分析以出射子光束 A_{i-j} 与中心光束 A_{2-2} 之间空间角度差值 ΔA_{i-j} 为标准。

图 5(a) 展示了棱镜出射光束角度差值 $\Delta A_{i,j}$ 与扫描角度 φ 变化关系, 其中 A_{1-1} 、 A_{3-3} 、 A_{1-3} 、 A_{3-1} 和 A_{1-2} 、 A_{3-2} 、 A_{2-1} 、 A_{2-3} 在平面 Σ_1 上分别具有相同的旋转半径 R_1 和 R_2 , 同一旋转半径 (R) 上子光束具有相同的光束指向变化规律, 分别对应图 5(a) 上、下部分曲线。 A_{1-1} 与 A_{3-3} 和 A_{1-3} 与 A_{3-1} 各自的连线呈垂直分布, 因此在图 5(a) 上部曲线中两者相差 $\pi/2$ 相位。

图 5(b) 展示了在旋转半径 R_1 的周视光束扫描轨迹上, 在平面 Σ_2 中入射角与棱镜旋转角度 φ 变化关系。从平面 Σ_2 入射角度变化情况分析出射光束变化规律, A_{1-1} 与 A_{3-3} 之间相差相位 π , 它们在平面 Σ_2 上入射角与 A_{2-2} 的入射角差值的绝对值变化趋势一致, 由于相邻子光束角间距小, 两条曲线差值也小 (见图 5(a)), 近似重合。



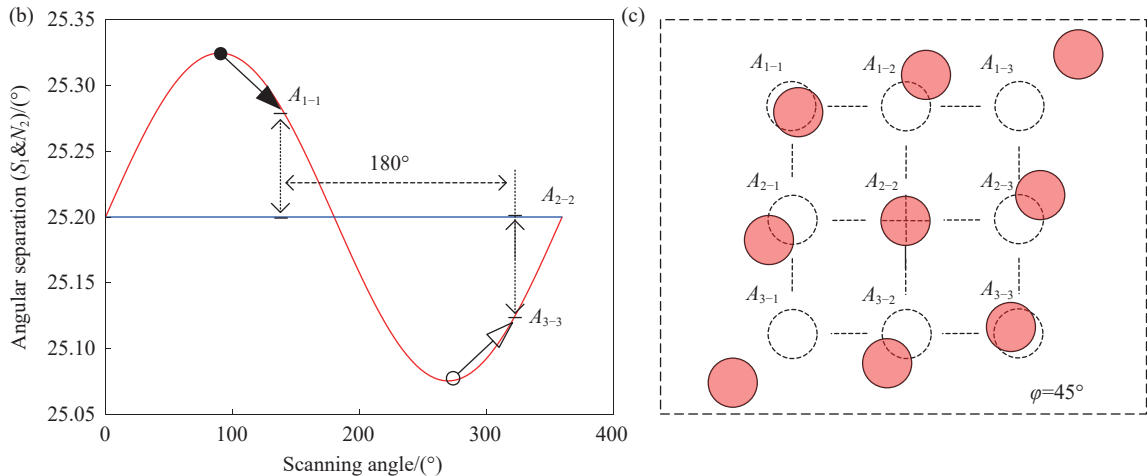


图 5 (a) 出射子光束与中心光束空间角度差值 $\Delta A_{i,j}$ 和棱镜旋转角度 ϕ 关系, 虚线框中展示了曲线细节部分 ($\phi=45^\circ$); (b) 在平面 Σ_2 上, 入射角 γ 与棱镜旋转角度 ϕ 关系; (c) 出射阵列光束空间分布情况 ($\phi=45^\circ$)

Fig.5 (a) Relationship between angle difference $\Delta A_{i,j}$ between the emergent subbeam and center beam and scanning angle ϕ , the details of the curve in the dotted box; (b) Relationship between the incidence and angle γ scanning angle ϕ on the plane Σ_2 ; (c) Spatial distribution of outgoing array beams at $\phi=45^\circ$

为了更形象具体的展示阵列光束空间形状畸变情况, 选取扫描角度为 $\phi=45^\circ$, 其空间角度差值 $\Delta A_{i,j}$ 曲线细节部分, 如图 5(a) 虚线框所示, 其中 ΔA_{1-3} 比 ΔA_{3-1} 角度大(上); ΔA_{1-1} 与 ΔA_{3-3} 角度相同(中); ΔA_{1-2} 与 ΔA_{2-3} 角度相同, ΔA_{2-1} 与 ΔA_{2-3} 角度相同, 并且前者大于后者, 同一旋转半径 (R) 上子光束角度差值 $\Delta A_{i,j}$ 不一致表明其规则形状已发生畸变。为了整体、形象的表达子光束角度差值 $\Delta A_{i,j}$ 对阵列光束形状的影响, 在平行于平面 Σ_1 的任意平面上, 棱镜出射的阵列光束空间角度关系如图 5(c) 所示, 红色圆形代表出射阵列光束空间角度分布, 虚线圆环代表入射时阵列光束空间角度分布, 两者以 A_{2-2} 为共同中心点。

4.2 光束阵列畸变对点云平面精度分析

阵列光束与棱镜扫描结合的机载激光雷达对地工作原理, 如图 6(a) 所示, 其中 θ 为圆锥扫描半角, ϕ 为扫描角度。阵列光束通过棱镜后照射目标处的激光脚点三维空间位置信息由公式 (7) 解算获取, 图 6(b) 展示了在航高 0.5 km 时, 阵列光束在地面上激光脚点空间分布, 从圆锥扫描轨迹上选取 8 个位置, 其激光脚点的形状都不一致、随扫描角度而改变。将阵列光束畸变引起的角度误差转换为空间位置误差, 建立与点云数据质量评估的联系。采用数字仿真手段单独分析了光束阵列畸变带来的指向误差对激光雷达定位精度影响, 人为规避其他因素耦合对定位精度影

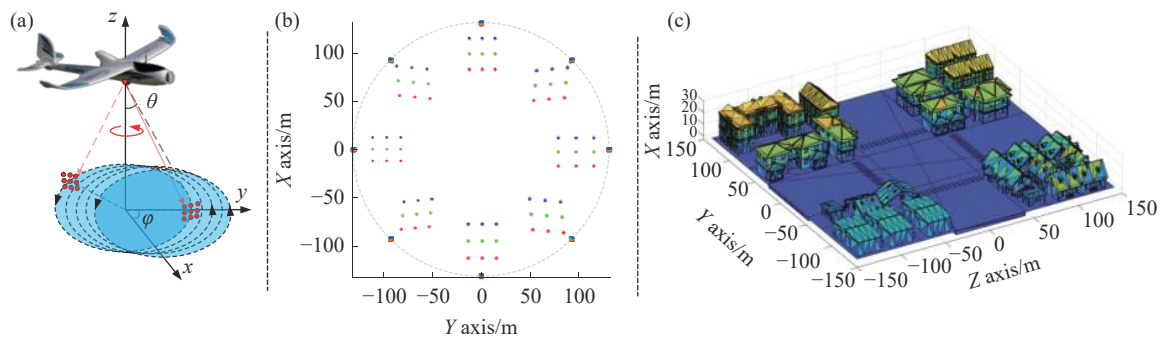


图 6 (a) 机载棱镜扫描过程示意图; (b) 阵列光束在地面上光斑空间分布 ($h=0.5$ km); (c) 数字仿真场景

Fig.6 (a) Schematic diagram of prism scanning process during airborne flight; (b) Spot distribution of array beam on the ground at $h=0.5$ km; (c) Digital simulation scene

响,如码盘角度误差,POS 定位、测姿误差等。通过模拟激光雷达机载飞行过程,解算获取数字场景点云数据,三维数字场景按机载飞行实验标定场场景设计^[13],如图 6(b)所示,场景内建筑物为人字型屋顶,涵盖各种朝向,不同高度,并包含两条相互垂直的道路。实验相关参数为:飞机速度 v 为 200 km/h,飞行高度 h 为 500~5000 m,激光脉冲重频 f 为 5 kHz,码盘转速 ω 为 20 Hz,扫描圆锥半角 θ 为 15°。

根据航迹数据、测距、棱镜扫描角度等信息,解算获取机载激光雷达模拟点云数据,如图 7 所示,虚线框中展示了编号 Plane1~Plane4 屋顶细节,其中白色点云为修正后数据,其他色彩点云为未修正数据,并针对 Plane1 和 Plane4 平面进行了局部放大,光束阵列畸变导致了平面点云数据离散。

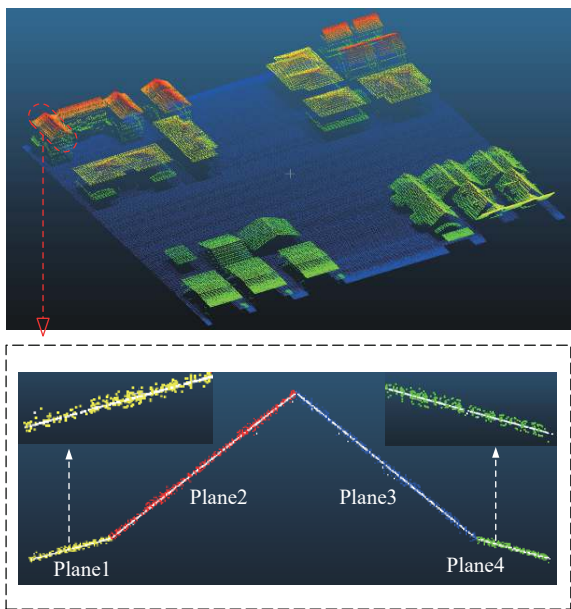


图 7 模拟机载飞行解算点云数据,虚线框中展示了屋顶平面细节

Fig.7 Point cloud data by airborne flight simulation, roof details in the dotted box

将场景中人字型屋顶和平直道路进行提取,然后进行平面拟合和计算拟合平面 RMS 值,以 RMS 值作为点云数据定位精度依据。在机载点云数据中提取 38 个平面,平面拟合 RMS 值,如图 8(a)所示。RMS 较大值出现在 Plane16~Plane33 位置,其分布在图 7(b)的右下方区域内,主要原因是房屋屋顶存在突出的窗户需做剔除处理,出现了一定孔洞,人为处理引入一定的误差。为了避免人为因素和数字仿真自身精度误差,利用校正(蓝线)与未校正(红线)曲线之差作为

评价曲线(灰线),在航高 0.5 km 情况下,两者之差平均值为 0.0498 m。即光束指向误差带来平面精度影响约为 5 cm @0.5 km。同时进一步分析了不同航高 0.5~5 km 条件下,子光束指向误差对平面精度的影响,场景设置为平面,不同航高拟合平面的 RMS 值,如图 8(b)所示,航高和 RMS 数据进行线性拟合,其直线斜率 $k \approx 0.1$ m/km,航高和 RMS 数据呈现线性相关。

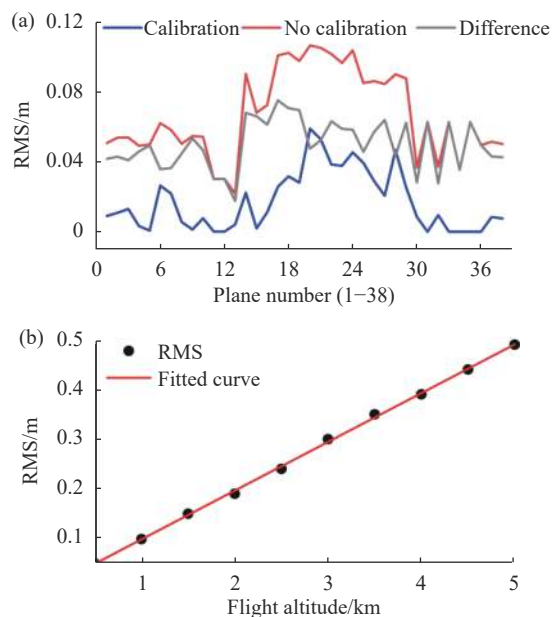


图 8 (a) 平面拟合平面 RMS 值,畸变未校正数据(红线),畸变校正数据(蓝线),两者之间的差值(灰线);(b) 航高与平面拟合 RMS 值之间关系

Fig.8 (a) Planar fit values RMS for planes used before (red line) and after (blue line) adjustment, difference between the two planar fit values (gray line); (b) Relationship between navigation height and RMS planar fit values for planes

为进一步分析阵列光束参数对平面精度的影响,首先从光束阵列规模出发,在子光束夹角不变的情况下,分别计算了 2×2、3×3、4×4、5×5、6×6 五种阵列规模条件下的平面精度 RMS 值,如图 9(a)所示,随着子光束规模的变大,平面精度 RMS 也随之变大,点云的数据质量变差;与此同时,提取了在扫描角度 45°时,地面激光脚点空间位置分布,如图 9(b)所示,其中,方形点代表 6×6 光束阵列,红色代表修正后的数据,灰色代表未修正数据,圆形点代表 3×3 光束阵列,蓝色代表修正后的数据,浅绿代表未修正数据;光束阵列边沿处于子光束位置畸变量大于其内部光束,光束阵列规模大的顶角处光束的位置畸变量大于光束阵列规

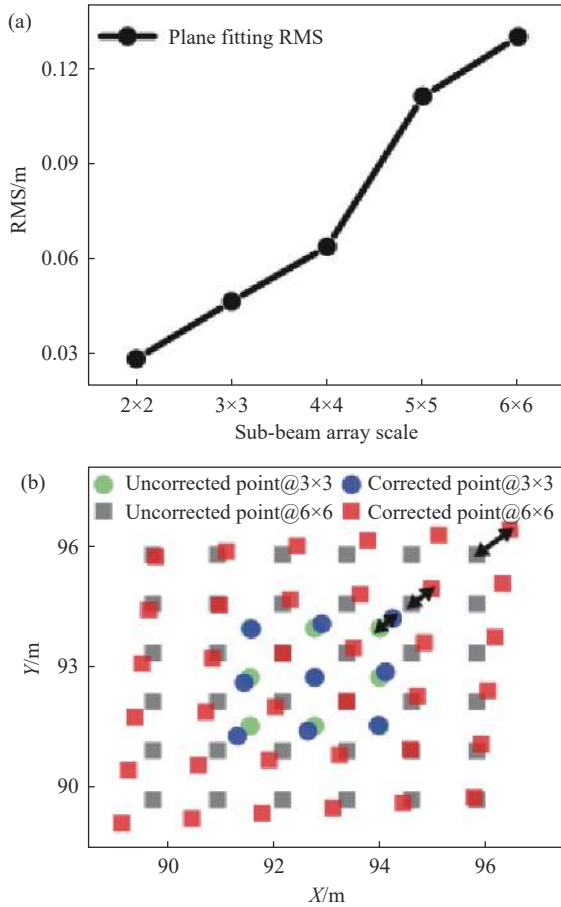


图 9 (a) 光束阵列规模与平面精度的关系; (b) 在扫描角度 45° 时, 地面激光脚点空间分布情况

Fig.9 (a) Relationship between beam array size and planar accuracy; (b) Spatial distribution of laser feet on the ground (@ $\varphi=45^\circ$)

模小的情况, 如图 9(b) 中黑色尖头所示。

其次, 分析了在子光束阵列规模 (3x3) 不变的情况下, 子光束夹角对平面精度影响, 如图 10(a) 所示, 以 $\Delta=2.314$ mrad 为基数, 按其整数倍进行空间夹角变化, 随着子光束夹角的变大, 平面精度 RMS 值随之变大。在扫描角度 $\varphi=45^\circ$ 时, 地面激光脚点空间位置分布, 如图 10(b) 所示, 其中, 方形点代表相邻角间距 Δ 光束阵列, 红色代表修正后的数据, 黑色代表未修正数据, 圆形点代表相邻角间距 $5\times\Delta$ 光束阵列, 红色代表修正后的数据, 灰色代表未修正数据; 子光束角间距大的阵列光束位置畸变量大于子光束角间距小的情况, 两者顶角处的子光束位置畸变量, 如图 10(b) 中黑色尖头所示。

光束阵列规模和子光束角间距变化都涉及到入射光束在棱镜 Σ_1 面上的入射角度问题, 图 5(a) 展示了两种角度入射时其扫描角度与光束偏转情况, 其上

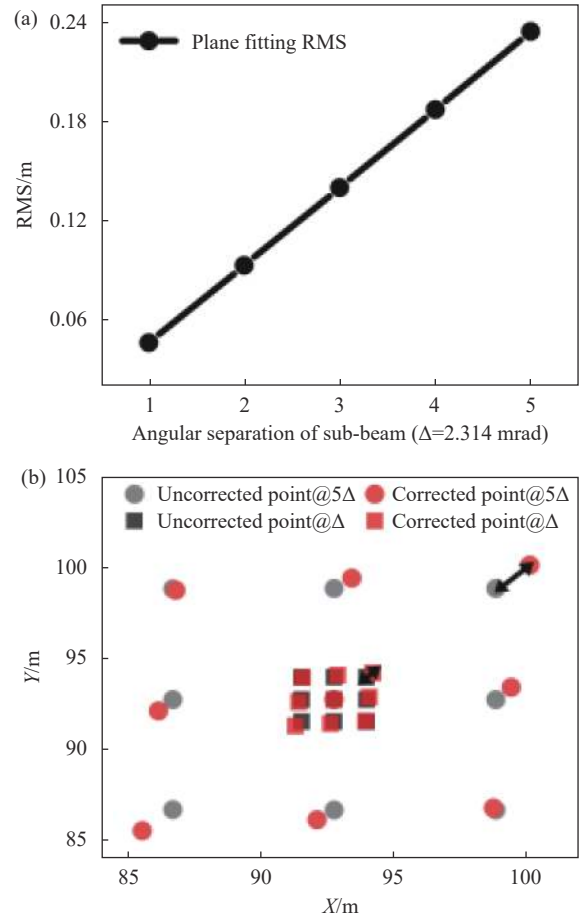


图 10 (a) 子光束角间距大小与平面精度关系; (b) 在扫描角度 45° 时, 地面激光脚点空间分布情况

Fig.10 (a) Relation between the angular separation of sub-beams and the plane accuracy; (b) Spatial distribution of laser feet on the ground (@ $\varphi=45^\circ$)

部分曲线代表矩形光束阵列四个顶角处入射子光束相对于中心光束的偏转量, 浅绿 (五角星) 直线代表入射时子光束角间距, 红色 (尖头) 直线代表了相对于入射时其最大的角度偏转量; 其下部分曲线代表矩形光束阵列边线中心处入射子光束相对于中心光束的偏转量, 橙色 (五边形) 直线代表入射时子光束角间距, 蓝色 (尖头) 直线代表了相对于入射时其最大的角度偏转量;

矩形光束阵列顶角处入射角度大于边线中心处入射角度, 棱镜对其子光束的偏转能力更强 (以中心激光束为参考)。子光束入射角度越大, 其相对于中心光束的偏转角也越大, 在指向角度变化方面, 如图 5(a) 中红、蓝 (尖头) 直线所示, 和在空间位置变化方面, 如图 9(b) 和图 10(b) 中黑色尖头所示, 都证明了

该点。所以在光束阵列规模和子光束角间距变大时,即大角度入射棱镜时,未做修正将引起更大平面精度误差。

5 结 论

阵列光束照明与棱镜扫描结合提升了机载激光雷达系统能量利用率、空间分辨率和探测视场,但是阵列光束形状畸变,导致光束指向误差,影响点云位置精度。(1)指向误差产生的原因,从多角度入射多波束并行扫描的视角分析,当入射角度相同时,斜射光束破坏了光束在棱镜中传输的旋转对称性,不同扫描位置对光束偏转能力存在差异;当入射角度不同时,入射角度越大棱镜对光束的偏转能力越强;两者共同作用,最终表现为规则阵列光束入射,时变阵列光束出射。(2)指向误差量化分析,采用三维矢量光学的方法,获取了子光束指向变化与棱镜扫描角度间近似正弦的关系。建立了光束指向误差和空间位置误差联系,子光束入射角度和航高的增加都将导致点云离散,数据质量下降。通过对棱镜扫描过程中光束阵列畸变规律掌握,为后续机载飞行试验数据的校正奠定了基础,特别对中、远距离机载激光雷达位置精度提升具有显著作用,另外为阵列光束结合多棱镜扫描系统设计提供了参考。

参考文献:

- [1] Hong Huajie, Zhou Yuan, Tao Zhong, et al. Application of risley prism on optical reconnaissance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 179-186. (in Chinese)
- [2] Fan Dapeng, Zhou Yuan, Lu Yafei, et al. Overview of beam

- steering technology based on rotational double prisms [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 136-150. (in Chinese)
- [3] Zhu Jingguo, Li Feng, Huang Qitai, et al. Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0502001. (in Chinese)
- [4] Brown E, Kim H, Carr D, et al. Seahawk lidar [C]//Proc of SPIE, 2019, 11005: 1100506.
- [5] Fuchs E, Mathur A. Utilizing circular scanning in the CZMIL system [C]//Proc of SPIE, 2010, 7695: 76950W.
- [6] Brazeal R G, Wilkinson B E, Hochmair H H. A rigorous observation model for the risley prism-based livox mid-40 lidar sensor [J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4722.
- [7] Clifton W, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system[C]//Proc of SPIE, 2015, 9465: 946506.
- [8] Degnan J J. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 958.
- [9] Lavigne V, Ricard B. Fast Risley prisms camera steering system: calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043201.
- [10] Huang F, Ren H, Shen Y, et al. Error analysis and optimization for Risley-prism imaging distortion correction [J]. *Appl Opt*, 2021, 60(9): 2574-2582.
- [11] Li A, Zuo Q, Sun W, et al. Beam distortion of rotation double prisms with an arbitrary incident angle [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(19): 5164-5171.
- [12] Pan Z, Hartzell P, Glennie C. Calibration of an airborne single-photon lidar system with a wedge scanner [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1418-1422.
- [13] Wang Qianghui. Method on quality assurance of airborne original lidar point cloud data [J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(5): 35-37. (in Chinese)

Analysis of point cloud accuracy and beam pointing of array beam through prism scanning

Yang Feng^{1,2}, Shi Zhendong^{2*}, Jiang Yong², Leng Jie², Wang Yalan², Chen Dezhong², Xu Lin²,
Song Zhao², Xu Shiyue², Jia Kai², Gao Jianbo², Bai Yang², Zhou Shouhuan¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract:

Objective The prism scanning system is used to achieve optical imaging with both large field of view and high resolution by adjusting the beam direction or optic axis. It is widely used in optical reconnaissance, laser communication, lidar, etc. In airborne laser imaging lidar, the prism scanning system, as a transmission scanning

structure, has high optical utilization, effectively reduces the volume of the system, and has the advantages of low power consumption, high precision and good stability. In array imaging lidar, high energy efficiency, high resolution, and broad field detection are all achieved by means of array beam illumination and Risley-prism scanning. However, when sub-beams are obliquely incident on the prism, the rotational symmetry of the traces of ray propagation is broken, the beam deflection of the sub-beams through the prism is different, and the regular beam array produces shape distortion, resulting in beam pointing error and affecting the position accuracy of the point cloud. Therefore, it is necessary to analyze the rules of beam array distortion to improve the accuracy of the point cloud.

Methods The conical scanning mode that combines the array beam and prism is broken down into multi-beam parallel scanning with numerous incident angles, and the propagation characteristics of the array beam are thoroughly described by the propagation characteristics of all sub-beams (Fig.2). The three-dimensional vector optical approach is used to establish the laser transmission process of the array beam through a Risley-prism (Fig.3), and the relationship between the pointing variation of the sub-beam and the scanning angle of the prism is obtained (Fig.4). The association between beam pointing variability and point cloud data quality is demonstrated by the numerical simulation of imaging process with prism scanning by flight experiment of airborne lidar (Fig.6-7).

Results and Discussions When the array beam is orthographically and obliquely incident into the prisms with different angles, the beam steering of the prism to each sub-beam is different at various scanning angles (Fig.5(a)). The spatial shape distortion analysis of the array beam is based on the spatial angle difference between the outgoing sub-beam and the central sub-beam. When the prism rotates one cycle, the spatial shape distortion of the array beam is shown (Fig.6(b)). The quality of point cloud data affected by the array beam distortion is evaluated by using plane fitting RMS value as the quantitative index of point cloud position accuracy (Fig.7). Simulation results of ground scanning imaging process of prism in airborne lidar indicate that the plane error RMS is approximately 5 cm at a navigation height of 0.5 km (Fig.8(a)), which varies linearly with navigation height, and slopes at a rate of around 0.1 m/km in prism scanning system with beam array (3×3) (Fig.8(b)) and the accuracy of point cloud plane decreases with the increase of array beam scale (Fig.9) and sub-beam angular separation (Fig.10).

Conclusions The combination of array beam illumination and prism scanning improves the energy utilization, spatial resolution and detection field of view of airborne lidar system. However, the shape distortion of array beam leads to beam pointing error and affects the accuracy of point cloud position. The array beam incidence prism includes orthographic and oblique incidence. The oblique sub-beam destroys the rotational symmetry of the beam propagating in the prism, and the beam steering ability is different at different scanning positions. Furthermore, the larger the oblique angle is, the stronger the steering ability of the prism to the beam is. Given that the above two work together, the time-varying array beam is emitted when the regular array beam is incident. The relationship between beam pointing error and spatial position error is obtained by using the three-dimensional vector optics method. The increase of the incident angle of the sub-beam and the altitude will lead to the dispersion of the point cloud and the decrease of the data quality. The law of beam array distortion during prism scanning lays a foundation for the correction of subsequent airborne flight test data, especially for the improvement of position accuracy of medium and long-distance airborne lidar. In addition, it provides a reference for the design of array beam combined with multi-prism scanning system.

Key words: airborne imaging lidar; array beam; prism scanning; pointing error; point cloud accuracy

Funding projects: Major Science and Technology Project of High Resolution Earth Observation System; Major Science and Technology Innovation Project of Shandong Province (2018SDKJ0102-6)