

一种直接应用灰度叠加提高面阵激光雷达测距精度的方法

方 毅^{1,2} 张秀达^{1,2} 胡 剑^{1,2} 王鹏鹏^{1,2} 严惠民^{1,2}

(¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(²浙江大学国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 相比传统的点扫描激光雷达,基于距离选通和增益调制测距原理的面阵成像激光雷达,具有测距速度快的优点,但同时会引起单帧图像信噪比降低。根据成像激光雷达的原理,建立了其在散粒噪声影响下的测距精度模型,基于该精度模型和机载面阵激光雷达成像的特点,提出了一种应用灰度图像配准叠加提高测距精度的方法。对飞机姿态、光源均匀性、叠加帧数等因素在采用该方法时是否对测距精度有影响进行了分析。分析结果表明,图像完全匹配后,飞机姿态对测距精度没有影响,光源均匀性优于 40% 时对测距精度影响可以忽略,一定叠加帧数内时灰度叠加不会影响目标之间的相对距离。进行了地面动态实验和机载航拍实验,并将此方法应用于图像的校正,实验结果验证了该方法的有效性。

关键词 图像处理;灰度叠加;面阵激光雷达;测距精度;散粒噪声

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0114002

A Method Applying Gray Image Superposition to Improve Ranging Accuracy in Planar Array Laser Radar

Fang Yi^{1,2} Zhang Xiuda^{1,2} Hu Jian^{1,2} Wang Pengpeng^{1,2} Yan Huimin^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² National Engineering and Technology Research Center for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Compared with traditional point-scanning laser radar, the imaging laser radar based on range gating and gain-modulation ranging principles has faster ranging speed, but at the same time, signal noise ratio (SNR) of single-frame image is lower. According to principles of imaging laser radar, the ranging accuracy model under the influence of shot noise is built. Based on the model and the characteristics of airborne imaging laser radar, a new method which employs the techniques of gray image registration and superposition to improve ranging accuracy is put forward. Then the factors, such as the flight attitude, light uniformity and superposition frame number that influence the application of gray registration and superposition, are analyzed theoretically. The results show that flight attitude has no effect on the method and the light uniformity's effect is small when the uniformity is better than 40%. There will not be other errors between the targets when superposition frame number is within a certain range. A ground of dynamic experiments and aerial experiment are conducted to verify the validity of the method.

Key words image processing; gray image superposition; planar array laser radar; ranging accuracy; shot noise

OCIS codes 040.1520; 040.3060; 100.2000; 110.2970

收稿日期: 2012-08-16; 收到修改稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400404)和国家 863 计划(2009AA12Z142)资助课题。

作者简介: 方 毅(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达图像与数据处理等方面的研究。

E-mail: mapleaf.yfang@gmail.com

导师简介: 严惠民(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测、图像处理、激光雷达等方面的研究。

E-mail: yhm@zju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

为突破传统点扫描激光雷达^[1]测距速度难以提高的限制,很多科研机构投入到了新型三维成像激光雷达技术的研究当中。当前,成像雷达技术的发展主要有两个分支:一种是采用雪崩光电二极管(APD)阵列测量光脉冲往返时间获得目标距离^[2,3],如美国林肯实验室,其 APD 阵列像素已经达到 128 pixel×128 pixel,但由于工艺限制,像素数很难再提升;另一种是采用时间切片技术将时间信息调制进回波光强^[4],如瑞典国防研究机构,此方法测距精度高,但需要大量强度图来计算一张距离图,成像速度慢。从 2008 年开始,浙江大学现代光学仪器国家重点实验室雷达小组开展了增益调制原理激光雷达模型研究并完成了样机制作。该模型采用时间距离选通原理,具有成像像素多、测距速度快的优势^[5]。此方法在距离 1 km,1000 pixel×1000 pixel 分辨率下,测距标准差在 1 m 左右。

在激光雷达机载应用时,一方面,机载平台的随机运动等因素决定雷达系统成像的曝光时间的上限^[6,7],并且由于供电、体积等原因激光器的功率受到限制,导致单帧图像的信号强度受到影响。但在另一方面,在高帧率下,机载航拍图像的帧与帧之间会有大量的重合区域。如果将这些重合区域的信号利用起来,就可以提高这些区域的信号强度,从而提

高信噪比(SNR)。不同于将单帧计算的距离图配准叠加^[8],灰度叠加方法不会引入单帧距离图可能会出现奇异值,计算方法更加简单。本文基于以上分析,研究灰度图像配准叠加的可行性及影响因素。

2 面阵激光雷达测距原理

面阵激光雷达的基本构成如图 1(a)所示。计算机发出同步控制信号给激光器和像增强器[由光电阴极、微通道板(MCP)、荧光屏组成],激光器发出激光脉冲照射到视场内三维目标上。从目标反射回来的激光,先后经透镜和像增强器的增益调制后,由 CCD 探测成像。为消除目标反射率、大气散射和外界光等其他因素影响,需要对三维目标以两种增益方式来成像^[5]。两次成像得到的灰度图可以解调出三维目标距离信息。

如图 1(b)所示,通过控制激光器发射脉冲与像增强器开始工作的时间间隔,可以控制选通距离 z_0 。通过控制像增强器的持续工作时间长短,可以控制选通宽度 z_g 。恒定增益成像的灰度为 E_1 ,线性增益成像的灰度为 E_2 ,解调出来的三维目标距离为

$$z = z_0 + \alpha(E_2/E_1 - \beta), \quad (1)$$

式中 α 和 β 为与选通宽度和增益方式有关的两个常数。

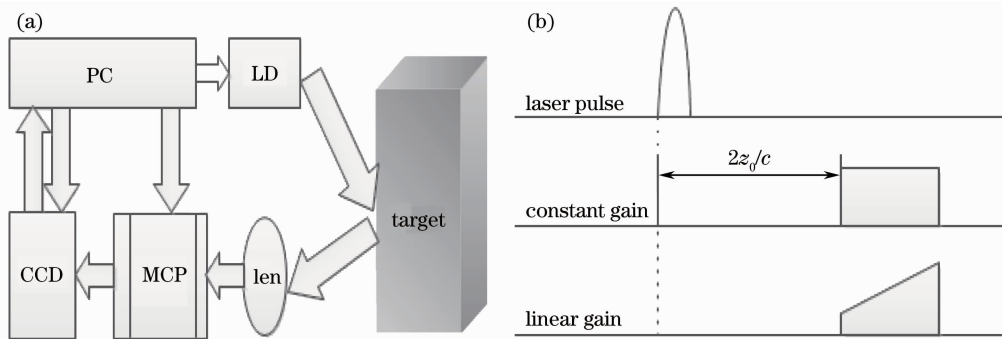


图 1 成像激光雷达测距原理图。(a)基本结构图;(b)增益选通时序图

Fig. 1 Principle diagram of imaging laser radar. (a) Basic structure; (b) gain strobe time sequence

考虑影响激光雷达系统测距精度的因素^[9]。光电阴极由于量子效率不高,在光电转换过程中会引入散粒噪声,而 MCP 在对光电子的增益放大过程中使信号的信噪比恶化,所以像增强器的噪声是造成系统噪声的主要因素^[10]。

假设光电阴极的量子效率为 η ,单个像素接收到的光子数为 N ,散粒噪声可以用泊松分布的标准差表示,那么光电阴极引入的泊松分布的散粒噪声可表示为

$$R_{SNpe} = \sqrt{\eta N}. \quad (2)$$

经过 MCP 之后,信噪比变小,通过引入 MCP 噪声因子 N_f 来表示 MCP 所带来的噪声^[11],信噪比可表示为

$$R_{SNMCP} = \frac{R_{SNpe}}{\sqrt{N_f}} = \sqrt{\frac{\eta N}{N_f}}. \quad (3)$$

系统在得到恒定增益灰度图和线性增益灰度图时,使用相同的 MCP 和 CCD,所以恒定增益灰度图和线性增益灰度图信噪比相同,都为

$$R_{SN} = \frac{\tilde{E}}{\Delta E} = R_{SNMCP} = \sqrt{\frac{\eta N}{N_f}}, \quad (4)$$

式中 \tilde{E} 为光强平均值, ΔE 为光强标准差。

将(1)式和(4)式代入误差传递公式

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial E_1}{E_1}\right)^2 \Delta E_1^2 + \left(\frac{\partial E_2}{E_2}\right)^2 \Delta E_2^2}, \quad (5)$$

可得散粒噪声受限下的误差公式, 即

$$\Delta z = (\tilde{z} - z_0 + \alpha\beta) \sqrt{\frac{2N_f}{\eta N}}. \quad (6)$$

式中 \tilde{z} 为三维目标距离平均值。由(6)式可知, 在雷达系统选通距离、增益函数和 MCP 均确定的情况下, 系统接收到的光子数 N 就决定了系统测距误差。

3 动态成像时的灰度叠加方法

为减小测距误差 Δz , 应尽量增大单个像素接收到的光子数 N 。在单帧图像不能达到足够多光子数情况下, 可以考虑将多帧图像叠加。假设每帧中每个像素接收到的光子数都是 N , 则 n 帧叠加平均后, 测距误差为

$$\Delta z = (\tilde{z} - z_0 + \alpha\beta) \sqrt{\frac{2N_f}{\eta N}} \sqrt{\frac{1}{n}}. \quad (7)$$

因此, 叠加帧数越多, 测距误差越小。

如图 2 所示的飞机航拍示意图, 在飞机高度 h 和视场角 θ 一定的情况下, 通过控制两幅图像的拍摄间隔 t_i 或者飞机飞行速度 v , 可以控制地面同一区域 A 在航拍图中的成像帧数 n 。此处的帧数 n 可以表示为

$$n = \frac{2h \tan(\theta/2)}{vt_i}. \quad (8)$$

如图 2 所示, 飞机对地面 $w \times w$ 的区域成一帧完整的图像。以区域 A 为成像中心的帧为区域 A 的中心帧。每一帧图像都对应着这样的一个长条形区域。如果飞机没有姿态变化并匀速飞行, 那么取每帧图像的这个长条形区域合在一起, 就是整个航

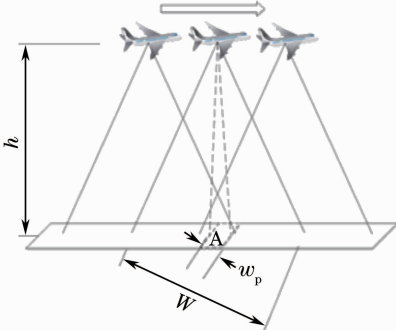


图 2 航拍成像示意图

Fig. 2 Aerial imaging diagram

拍区域。取帧间隔 t_i 时间内飞机的飞行距离作为区域 A 的宽度, 则区域 A 宽度可表示为

$$w_p = vt_i. \quad (9)$$

由(8)式可知, 区域 A 正好出现在以区域 A 为成像中心的帧为中心帧的 n 帧内。假设 CCD 的成像像素为 $n_x \times n_y$, 则区域 A 成像的像素数为

$$n_{px} = \frac{vt_i n_x}{2h \tan(\theta/2)}, n_{py} = n_y. \quad (10)$$

综上所述, 区域 A 出现在连续的 n 帧内, 将所有这些帧的区域 A 图像都剥离出来, 并且叠加到一起, 就能充分利用航拍图像帧与帧之间的重合区域来改善区域 A 的测距精度。与先计算单帧距离图, 将距离图叠加到一起的方法对比, 本方法在计算时并不需要知道每帧对应的飞机姿态, 不需要根据姿态先校正每帧的垂直距离, 计算方法更加简单直接。

4 灰度叠加导致的距离误差

如图 3 所示, 以飞机正下方与海平面的交点为原点, 飞行方向为 x 轴, 以机翼方向为 y 轴, 竖直向上为 z 轴建立直角坐标系。地面区域 A 内物点坐标表示为 $B(x_0, y_0, z_0)$, 飞机坐标表示为 $F(x, y, z)$, 雷达成像时飞机与地面物点 B 的距离为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}. \quad (11)$$

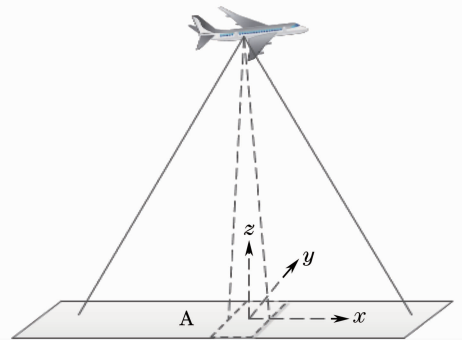


图 3 地面坐标系示意图

Fig. 3 Ground coordinate system diagram

假设成像时恒定通道增益为 g_c , 则对应恒定灰度为 $G_c = Cg_c$ 。线性通道增益为

$$g_l = (r - z_0)(g_{mr} - g_{mi})/z_g + g_{mi}, \quad (12)$$

式中, C 为与 CCD 成像及光源有关的常数, g_{mr} 为线性增益区间的最大增益, g_{mi} 为线性增益区间的最小增益。则对应的灰度为 $G_l = Cg_l$, 由灰度计算的距离为

$$r' = z_0 + z_g \left(\frac{G_l}{G_c} - \frac{g_{mi}}{g_c} \right) / \left(\frac{g_{mr}}{g_c} - \frac{g_{mi}}{g_c} \right). \quad (13)$$

4.1 飞机姿态对灰度图像叠加方法的影响

飞机在飞行过程因飞机转换方向或大风等外界因素影响,姿态会有变化。将飞机姿态分解为绕三个轴的转动,分别是偏航、侧滚、俯仰。飞机位置一定的情况下,不同的偏转角度影响的是在雷达系统成像的地面区域不同。对于同一地面目标来说,在 CCD 中成像的位置随姿态变化而变化,但与飞机的距离不会受到飞机姿态变化影响。

飞机在航拍过程中,离同一物点的距离按照先远到近,再由近到远的近似抛物线规律变化。按照第 3 节的灰度配准叠加方法,飞机有偏航角和侧滚角时,飞机在拍摄中心帧时与区域 A 内物点距离最近,离中心帧越远的帧,成像时飞机与区域 A 内物点距离越远。但若飞机有一定的俯仰角,飞机在拍摄中心帧时与目标不是最近。由抛物线的原理易知,如果以飞机与目标最近时的图像为中心帧进行灰度配准叠加,叠加后距离与中心帧中同一物点距离相差最大,此时叠加误差最大。基于此结论,后面的研究都是以飞机与目标最近,即叠加误差最大时来分析。

4.2 光源均匀性和叠加帧数对灰度图像叠加方法的影响

使用灰度图叠加来计算某物点距离,因不同帧成像时飞机与同一物点距离不同,所以同一物点在不同帧中对应线性通道的增益不同,灰度也会不同。假设飞机在某位置时,与物点距离为

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}. \quad (14)$$

光源均匀时,与 CCD 及光源有关的参数 C 为恒定值。恒定通道因不同距离增益相同所以灰度相同, n 帧图像叠加后平均灰度仍为 G_1 ,而线性通道灰度叠加后平均灰度为

$$G_1 = C\bar{g}_1 = C \left\{ \frac{1}{n} \sum_i [(r_i - z_0)(g_{mx} - g_{mi})/z_g + g_{mi}] \right\}. \quad (15)$$

简化得

$$G_1 = C \left[\left(\frac{1}{n} \sum_i r_i - z_0 \right) (g_{mx} - g_{mi})/z_g + g_{mi} \right]. \quad (16)$$

由叠加灰度计算的物点距离为

$$\tilde{r} = z_0 + z_g \left(\frac{G_1}{C} - \frac{g_{mi}}{g_c} \right) / \left(\frac{g_{mx}}{g_c} - \frac{g_{mi}}{g_c} \right). \quad (17)$$

实际上,计算所得 $\tilde{r} = \frac{1}{n} \sum_i r_i$,也就是雷达系

统与物点不同距离的平均值,或者说平均增益对应的距离值。即

$$\tilde{r} = \frac{1}{n} \sum_i r_i = \frac{1}{n} \sum_i \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}. \quad (18)$$

在飞机上连续拍摄时,同一物点连续出现在相邻的几十帧内,拍摄时间极短,所以可以认为 z_i 不变, z_i 等于飞行高度 h 。又因拼接区域长宽远远小于 $z_i - z_0$,所以 $x_i - x_0 \approx x_i, y_i - y_0 \approx y_i$ 。(18)式可简化为

$$\tilde{r} = \frac{1}{n} \sum_i r_i = \frac{1}{n} \sum_i \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (h - z_0)^2}. \quad (19)$$

因此,拼接区域内相同高度的物体由于灰度叠加所带来的叠加误差是相同的。对于不同的高度,飞机飞行高度越高,高度 z_0 变化所造成的叠加误差就越小。

在光源不均匀时,(15)式中参数 C 在每帧中成像时不同。线性增益通道成像(16)式可改写为

$$G_1 = \frac{1}{n} \sum_i A_i [(r_i - z_0)(g_{mx} - g_{mi})/z_g + g_{mi}]. \quad (20)$$

边缘强度分别是中心强度的 1.0、0.8、0.6 和 0.4 时的高斯型分布的光源强度分布,如图 4 所示。

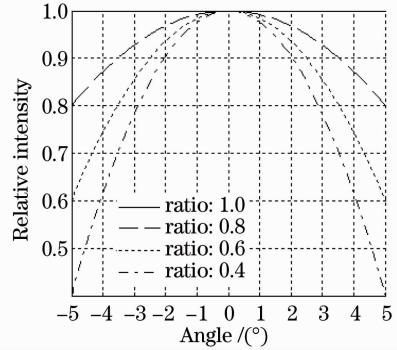


图 4 不同高光源强度分布的归一化显示
Fig. 4 Normalized display of different light intensity distributions

假设飞机飞行高度为 500 m,飞机速度为 50 m/s,雷达系统选通距离为 425 m,选通宽度为 75 m,帧间隔为 50 ms,即飞机每飞 2.5 m 时拍摄一幅恒定增益图和一幅线性增益图。假设镜头视场角为 10° ,物点 B 坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,则飞机与物点 B 在 x 方向距离为 43.7 m 范围内都能在 CCD 成像。那么物点 B 经灰度叠加后计算所得距离与实际距离误差为

$$\Delta r = r - \tilde{r} = r - \frac{1}{n} \sum_i r_i. \quad (21)$$

将前面的仿真参数代入(8)式,得到图4中不同光强分布的光源所对应的不同帧数下的叠加误差和不同高度时的叠加误差,分别如图5(a)和图5(b)所示。

由图5可知,在光源强度均匀性分布优于40%、叠加帧数少于20帧时,叠加误差几乎相同,而

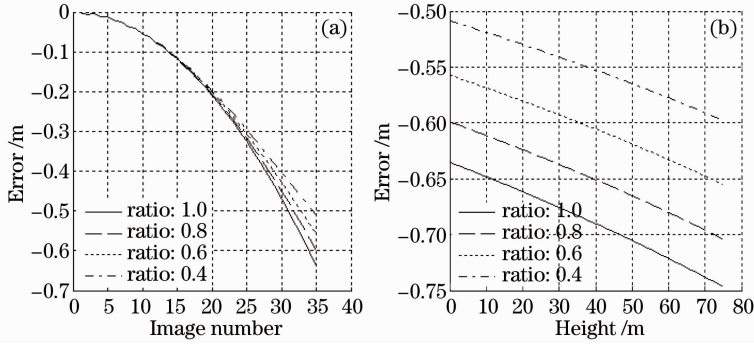


图5 飞行高度500 m时,光源强度对叠加误差的影响。(a)叠加误差随叠加帧数的变化曲线;(b)叠加误差随物点高度的变化曲线

Fig. 5 Influence of different light intensity distributions when the flight altitude is 500 m. (a) Different image numbers versus different errors; (b) different heights versus different errors

5 实验结果

为了验证灰度叠加对改善面阵激光雷达成像质量的效果,设计了两组实验,一组是地面动态实验,一组是机载航拍实验,然后将灰度叠加方法应用于图像的校正,验证其在实际应用中的效果。

灰度图精确配准采用的算法是抗干扰性较好的插值相位相关法^[12,13],本文不再详细介绍。

5.1 地面动态实验数据的校正

成像激光雷达的参数:激光波长为808 nm,增益比为3.08,视场角为10°,CCD像素分辨率为800 pixel×586 pixel,选通宽度为105 m。

选取一个距离为408 m远的场景,以近似直线的

叠加帧数大于20帧后,叠加误差最大也只增加0.1 m。而对于相同的光源强度分布,叠加帧数相同时,不同物点高度的叠加误差相差很小,仅0.07 m。

由前面的分析也可以得出结论,即使光源有较大的不均匀性,但其所带来的叠加误差还是很小的,实际应用中这种误差是可以接受的。

路径,每隔2 m对该场景成像,选通距离为360 m,最后共获得22组数据。第1、第11和第22组数据的线性增益灰度图分别如图6(a)~(c)所示。以第11组图为中心,其他灰度图都配准叠加到第11组图。叠加前,由第11组灰度图计算得到的距离图如图7(a)所示。叠加后,得到的距离图如图7(b)所示。

统计图7(a)和(b)中三个区域A、B和C的平均距离和标准差大小,数据如表1所示。

此地面动态实验的参数与4节中模拟仿真参数相似,光源不均匀性、叠加帧数和物点高度造成的叠加误差可参照图5。从图5可知,此模拟实验参数下,最大叠加误差不超过0.1 m,远小于距离图的标准

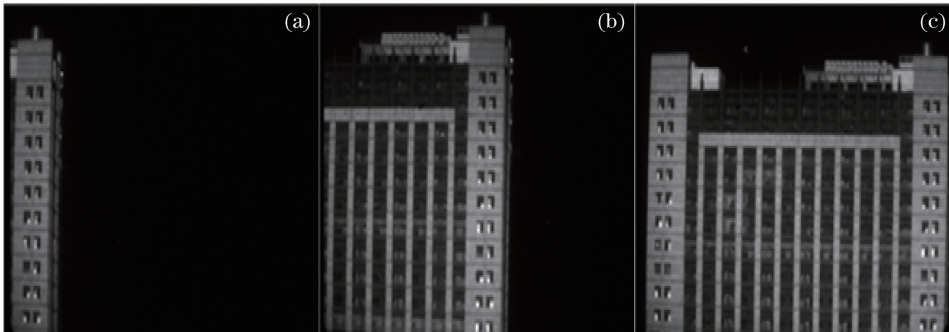


图6 模拟动态实验线性增益灰度图。(a)第1组线性图;(b)第11组线性图;(c)第22组线性图

Fig. 6 Gray image of proportional gain. (a) The first image; (b) the 11st image; (c) the 22nd image

准差,不会对物点之间的相对距离造成影响,因此可以忽略。

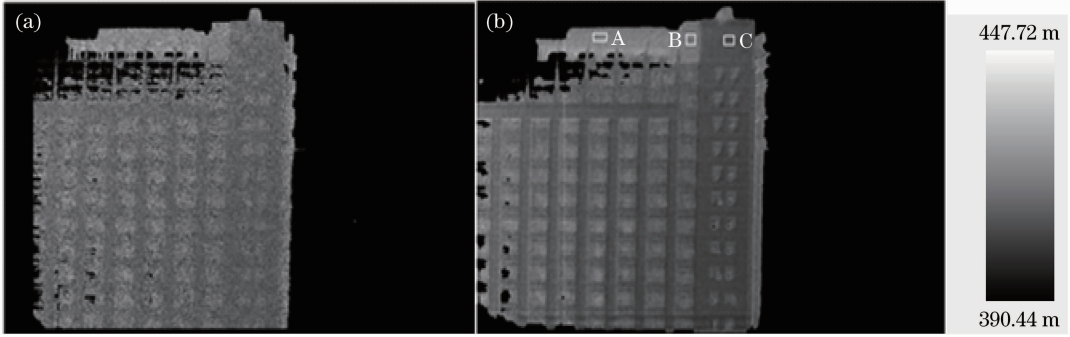


图 7 灰度配准叠加前与叠加后距离图对比。(a)第 11 组灰度图计算的的距离图;(b)配准叠加后的灰度图计算的的距离图

Fig. 7 Comparison of different range images. (a) Range images generated by the 11st group of gray images; (b) range images generated by the superposition gray images

表 1 单帧计算的的距离图与叠加后的距离图对比

Table 1 Range data comparison of different range images

Region	Range image generated by the 11st group of gray images		Range image generated by the superposition gray images		
	Average range /m	Standard deviation /m	Average range /m	Standard deviation /m	Superposition frame number
A	419.10	4.42	419.47	1.50	14
B	417.12	4.26	416.45	1.19	18
C	407.66	4.21	408.59	0.92	22

由(7)式可知,叠加帧数越多,叠加后标准差越小。22 帧灰度图像配准叠加后计算的的距离图相比单帧距离图,标准差减小到单帧距离图标准差的 1/4,符合(7)式的预期。因为拍摄总帧数有限,不同的区域有不同的叠加帧数,A、B、C 三个区域因位置有不同的叠加帧数,所以叠加后标准差会有不同,这与(7)式中 n 不同时信噪比不同相符。

5.2 航拍数据的校正

将此方法应用于双通道凝视激光雷达系统航拍数据的校正。航拍时飞机的飞行高度为 1000 m,飞行速度为 50 m/s,雷达系统选通距离为 900 m,选通

宽度为 105 m,图像拍摄时间间隔为 33 ms,CCD 像素分辨率为 1000 pixel×1000 pixel,激光光源的均匀性优于 80%。

取其中连续的 18 组图像应用灰度叠加方法进行校正。在此航拍参数下,根据(20)式和(21)式,可计算出如图 4 中光源强度分布下、18 帧图像叠加时的叠加误差,如图 8 所示。可以看出,高度为 0 和高度为 75 m 的物点,灰度叠加所带来的误差仅为 0.003 m,远远小于物点高度,不会对物点之间的相对距离差造成影响,因此可以不予考虑。

校正前与叠加校正后的距离图分别如图 9(a)

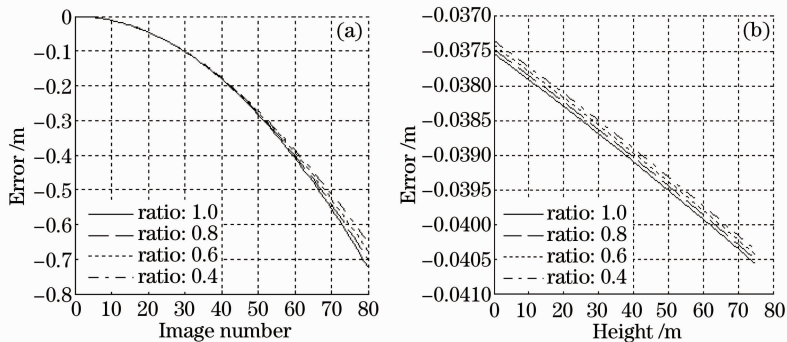


图 8 飞行高度 1000 m 时,光源强度对叠加误差的影响。(a)叠加误差随叠加帧数的变化曲线;(b)叠加误差随物点高度的变化曲线(18 帧叠加)

Fig. 8 Influence of different light intensity distributions when the flight altitude is 1000 m. (a) Different image numbers with different errors; (b) different heights with different errors (18 frame)

和(b)所示。

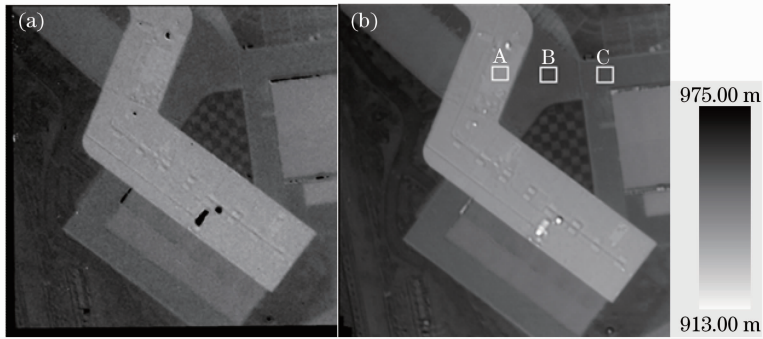


图9 灰度配准叠加前与叠加后距离图对比。(a)第9组灰度图计算的的距离图;(b)配准叠加后的灰度图计算的的距离图

Fig. 9 Comparison of different range images. (a) Range images generated by the 9th group of gray images;

(b) range images generated by the superposition gray images

对比图9(b)和(a),灰度叠加后距离图更加清晰,更容易分辨出建筑物的细小差别。具体对距离图数据的改善,可以选出图9(b)中A、B、C三个区域进行距离数据对比,数据如表2所示。

表2 单帧计算的的距离图与叠加后距离图对比

Table 2 Range data comparison of different range images

Region	Range image generated by the 9th group of gray images		Range image generated by the superposition gray images	
	Average range /m	Standard deviation /m	Average range /m	Standard deviation /m
A	938.5	2.02	939.7	0.51
B	958.4	1.71	958.3	0.52
C	956.5	1.81	956.0	0.63

与地面动态实验所得到的结论相同,恒定增益图与线性增益图分别应用灰度叠加方法后,算得的距离图标准差减小到单帧距离图的1/4,距离精度提高到0.55 m,再次验证了灰度叠加方法在改善航拍图距离精度上的有效性。

6 结 论

基于面阵激光雷达动态拍摄时的特点,提出了一种更加简单有效提高测距精度的方法,即通过灰度图像配准叠加提高测距精度,并研究了使用此方法时飞机姿态、光源均匀性、叠加帧数等因素对测距精度的影响。仿真分析表明,飞机姿态影响的是地面目标在CCD中成像的位置,如果图像之间能够完全匹配,匹配图像间飞机姿态的变化就不会影响测距精度;光源均匀性对测距精度有一定影响,在均匀性优于40%(实践中容易做到)、叠加帧数小于30时,灰度叠加造成的相对距离误差不超过0.1 m,在可以接受的范围内;同样的叠加帧数下,目标高度越高则绝对误差越大,叠加帧数小于30时目标间相对距离变化不超过0.1 m,可以不予考虑。因此灰度叠加方法能够在引入较小叠加误差的情况下提高测距精度, n 帧叠加时能将距离标准差减小到原来的

$1/\sqrt{n}$ 。在系统硬件部分受到限制而不能改善测距激光精度时,这种后期图像处理的方法是简单而有效的。所做的地面动态实验和航拍实验图像处理的效果较好,验证了这种方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi *et al.*. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2584~2589
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2584~2589
- 2 A. B. Gschwendtner, W. E. Keicher. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, **12**(2): 383~396
- 3 R. M. Marino, W. R. Davis. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 23~36
- 4 P. Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(3): 034301
- 5 X. D. Zhang, H. M. Yan, Y. B. Jiang. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1219~1221
- 6 Su Heng, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Lidar image blur caused by residual random vibration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(11): 2174~2179
苏恒, 严惠民, 张秀达等. 残余振动导致激光雷达成像模糊的研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(11): 2174~2179
- 7 Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo *et al.*. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2010, **30**(4): 994~1001
- 李增局, 吴 谨, 刘国国等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 994~1001
- 8 Yao Jinliang, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Image registration and superposition for improving ranging accuracy in imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1613~1617
- 姚金良, 严惠民, 张秀达等. 一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法 [J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1613~1617
- 9 Gao Feng, Yang Jinhua, Jiang Chenghao *et al.*. SNR analysis under multi pulse accumulation of non-scanning lidar system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 051401
- 高峰, 杨进华, 姜成昊等. 非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(5): 051401
- 10 Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian *et al.*. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908005
- 周 琴, 张秀达, 胡 剑等. 凝视成像三维激光雷达噪声分析 [J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0908005
- 11 S. E. Moran, B. L. Ulich, W. P. Elkins *et al.*. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance[C]. *SPIE*, 1997, **3173**: 430~457
- 12 M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman, J. R. Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2): 156~158
- 13 J. J. Zhu, B. L. Guo. Video stabilization with sub-image phase correlation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9): 553~555

栏目编辑:何卓铭