

对地观测激光扫描成像探测效果研究*

胡以华^{1,2)} 方抗美¹⁾ 舒 嵘¹⁾ 薛永祺¹⁾

¹⁾中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083;

²⁾中国人民解放军电子工程学院, 安徽, 合肥, 230037)

摘要 提出了动态激光扫描探测中的视场偏离问题和反映动态探测效果的动态重合系数的概念, 详细分析并推导了动态重合系数与系统设计参数、工作参数之间的关系, 以及对探测效果的影响, 分析了若干典型情况, 为设计实现探测效果良好的对地观测激光扫描成像系统提出了建议和设想。

关键词 对地观测, 激光成像, 扫描成像, 激光探测效果。

SOUNDING EFFECT OF LASER SCANNING IMAGING IN EARTH OBSERVATION*

HU Yi-Hua^{1,2)} FANG Kang-Mei¹⁾ SHU Rong¹⁾ XUE Yong-Qi¹⁾

¹⁾Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²⁾Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei, Anhui 200037, China)

Abstract The overlap regression of instantaneous field-of-view (IFOV) arising from dynamic laser scanning sounding was put forth and a concept of dynamic overlap factor, which describes the dynamic sounding effect of scanning laser, was presented. The relation between the dynamic overlap factor and operation parameters, system specifications and its influence on the sounding effect were analyzed in detail. Some special examples were discussed to explain the obtained results. Finally some suggestions were given for designing laser scanning imaging system with better sounding effect in earth observation.

Key words earth observation, laser imaging, scanning imaging, laser sounding effect.

引言

对地观测激光扫描成像是近几年发展的新型对地观测技术, 是定量化对地观测技术的一个重要发展方向。它以激光探测技术为主要手段, 辅以 GPS 定位技术、惯性平台姿态技术和被动光电成像技术等, 以空-地定位方式直接、快速生成地面目标的三维影像, 而且不需要地面控制点的配合, 有着很广阔的应用前景。国内外在这方面开展了大量的研究工作, 主要技术系统包括^[1~4]: 美国的 GLRS、SHOALS、AOL/ATM、RASCAL 和 ABS 系统, 加拿大的 LARSEN 500、ALTM1025 系列, 德国的 TopoSys, 澳大利亚的 WRELADS I 和 LADS, 以及中国国家 863 计划支持的本文作者参与研制的

ASLRIS 线性和圆锥扫描两个系统^[5]。在上述系统中, 激光扫描探测的主要作用是为生成地面三维成像提供高程信息。如果激光探测的地面采样点足够密集, 并且同时获取激光回波的特征信息, 就可直接以激光扫描回波信号生成三维成像结果, 而不需要被动光电成像信息的配合, 这是本文的研究目标。

激光探测是对地观测激光扫描成像的关键手段, 激光探测效果的好坏决定着三维图像生成的质量和成败。激光扫描探测效果可以简单理解为激光探测器所收到的回波功率的大小, 参考图 1 并基于激光探测功率方程的结果可知, 它与激光发射功率、接收口径、接收与发射系统透过率、目标反射率、大气传输透过率成正比, 在考虑地面是漫散射大目标、而且接收视场大于激光束发散角的情况下, 回波功

* 国家自然科学基金(编号 49981001)和国家 863 计划(编号 863-308-10-0111)资助项目

稿件收到日期 2001-03-12, 修改稿收到日期 2001-05-10

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 49981001) and the National High-Tech Project (the 863 Project) (No. 863-308-10-01(1))

Received 2001-03-12, revised 2001-05-10

率与距离的平方成反比,但是,对于以成像为目的的激光扫描探测,还存在一个重要的动态扫描探测效果问题.本文作者在项目研究过程中敏感地注意到了这一问题,并进行了深入分析探讨,而且已将研究成果运用于实际系统的研制.

1 对地观测激光扫描的收发视场偏离现象

对地观测激光扫描成像的原理是:以飞机或者卫星为平台,由飞行平台的运动实现沿轨迹方向的扫描,由扫描镜实现沿穿轨方向的扫描,通过激光发射回波探测,得到飞行平台到地面采样点之间的距离以及激光回波信号的典型特征,同时,辅以GPS定位技术、惯性平台姿态技术得到平台的位置和姿态信息,并由被动光电成像技术取得目标成像信息,经过地面的信息处理而生成逐个地面采样点的三维坐标,最后经过综合处理而得到沿一定条带的地面区域三维定位与成像结果.

对地观测激光扫描通常由扫描镜实现发射激光束和接收瞬时视场的物方扫描^[6].假定采用激光发射、接收同轴方式,共用一个扫描镜,通过设计可以保证在静止不扫描时的发射视场处于接收视场之内,其激光发射角为 α ,照射到地面后形成一个激光光斑.接收瞬时视场为 β (一般 $>\alpha$),对应地面为一个接收脚印.通过调整可以让激光光斑完全位于接收脚印之内.

但在动态扫描探测时,发射激光在某一个时刻发射,发射波束倾角(与天底方向的夹角)为 φ ,然后扫描镜仍然继续转动,经过地面回波时延的一个时间间隔之后,回波经过扫描镜而进入接收光学系统,很明显,此时的扫描镜偏角与激光发射时的偏角不

同,也就是说,接收瞬时视场较发射激光束方向偏离了一个角度 $\Delta\varphi$,出现了动态视场偏离现象,如图1所示.它等效为激光光斑与接收脚印之间的重合程度减小,即使在经过精心调整而使静态视场完全重合时也是如此.

假定扫描镜速度在穿轨方向等效 $S=r/s$ (转镜扫描时转速),传感器平台作业高度为 H ,则回波时延 t_r 和偏离角 $\Delta\varphi$ 分别为

$$t_r = 2H/(c \cdot \cos\varphi), \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi S t_r = 4\pi S H / (c \cdot \cos\varphi), \quad (2)$$

这里 c 是光速

2 动态重合系数和扫描探测效果的概念

激光动态探测效果可以描述为标准反射面的相对有效接收功率,用动态重合系数表示,定义为激光光斑和接收脚印重合部分面积与激光光斑面积的比值.激光探测器的有效接收功率与动态重合系数成正比,显然,如果动态重合系数很小,很好的静态探测效果也难以得到好的动态扫描探测效果.图2给出了关于动态重合系数定义的有关关系,重合部分以阴影表示,只有该区域中的激光后向散射信号才能被探测器所接收.

参考图1和式(2),如果 $\Delta\varphi \geq (\beta + \alpha)/2$,光斑全部在脚印之外,如图2(a),此时的重合系数为0.如果 $\Delta\varphi \leq (\beta - \alpha)/2$,光斑完全在脚印之内,如图2(b),此时的重合系数为1.对于基模高斯激光束,在有扫描倾角 φ 的情况下,光斑应为椭圆形,长轴在扫描方向.同样,一般的探测器和接收望远镜也决定了接收地面脚印是个椭圆,设光斑长短轴分别被表示

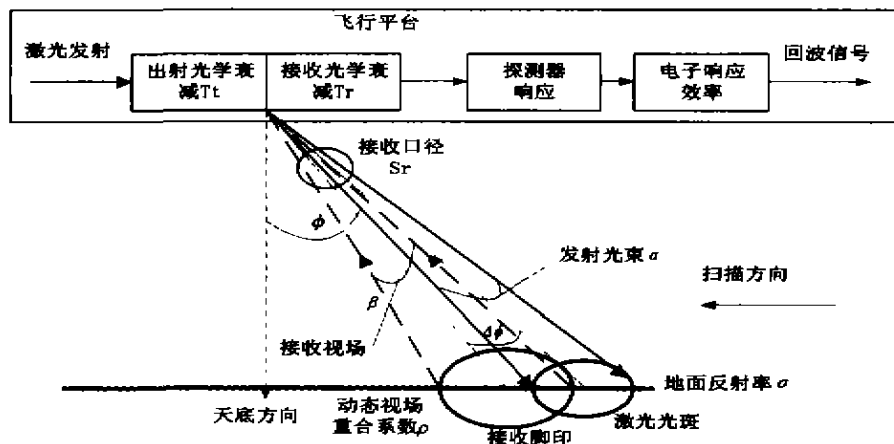


图1 对地观测激光扫描成像示意图

Fig. 1 Sketch map of laser scanning imaging in earth observation

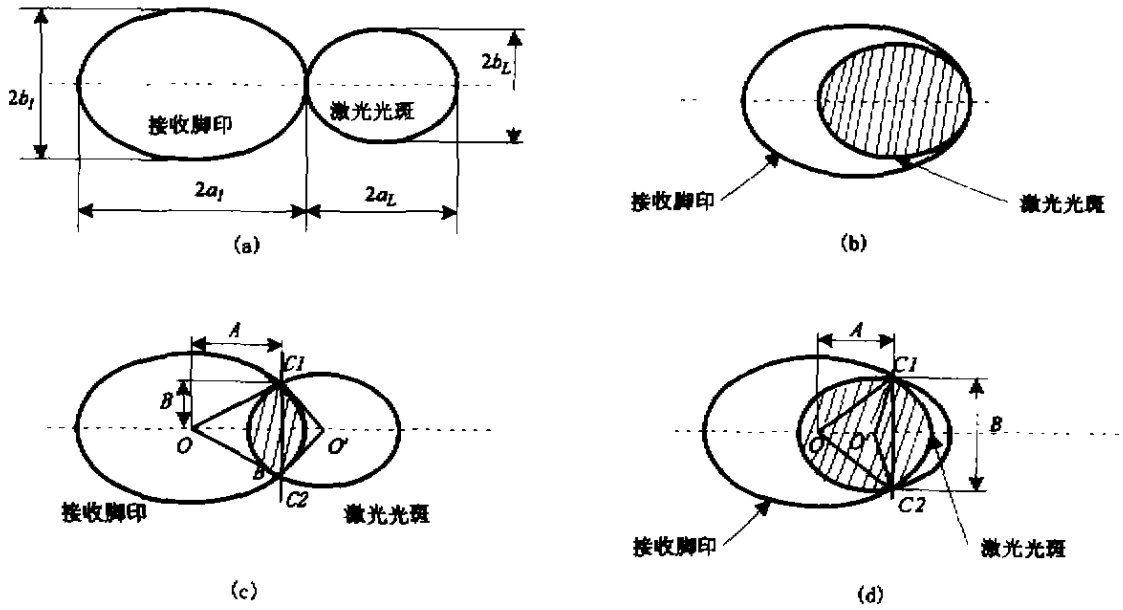


图 2 激光光斑与接收脚印之间的关系

(a) 光斑在脚印之外, (b) 光斑完全在脚印之内, (c) 和 (d) 光斑部分在脚印之内

Fig. 2 The relationship between laser spot and footprint

(a) laser spot out of the receiving footprint, (b) laser spot completely within the receiving footprint, (c) and (d) laser spot partially within the receiving footprint

为 a_L 和 b_L , 脚印的长短轴分别为 a_I 和 b_I , 它们可分别表示为

$$a_L = \alpha H \sec^2 \varphi / 2, \quad (3)$$

$$b_L = \alpha H \sec \varphi / 2, \quad (4)$$

$$a_I = \beta H \sec^2 \varphi / 2, \quad (5)$$

$$b_I = \beta H \sec \varphi / 2. \quad (6)$$

在直线扫描时, 两椭圆的长轴重合, 两个椭圆的中心距离为

$$\Delta l = oo' \approx H \Delta \varphi / \cos^2 \varphi. \quad (7)$$

设两椭圆的交点 C_1 (或 C_2) 到长轴的距离为 B , 交点连线 C_1C_2 到接收元中心 o 的距离为 A , 则有

$$\begin{cases} \frac{A^2}{a_I^2} + \frac{B^2}{b_I^2} = 1, \\ \frac{(\Delta l - A)^2}{a_L^2} + \frac{B^2}{b_L^2} = 1. \end{cases} \quad (8)$$

参考式 (7) 解方程 (8), 可以得到

$$A = \frac{\Delta l}{2} + \frac{a_I^2}{2\Delta l} ((\beta/\alpha)^2 - 1), \quad (9)$$

$$B = b_L \sqrt{(\beta/\alpha)^2 - A^2/a_L^2}. \quad (10)$$

那么, 如果 $\Delta l - A \geq 0$, 就有 $\Delta \varphi \geq \sqrt{\beta^2 - \alpha^2} / 2$, 则图 2 (c) 中阴影区面积为

$$S_{LI} = a_L b_L \arccos \frac{\Delta l - A}{a_L} + a_I b_I \arccos \frac{A}{a_I} - \Delta l B. \quad (11)$$

如果 $\Delta l - A \leq 0$, 就有 $\Delta \varphi \leq \sqrt{\beta^2 - \alpha^2} / 2$, 从而图 2 (d) 中阴影区面积为

$$S_{LI} = a_L b_L (\pi - \arccos \frac{A - \Delta l}{a_L}) + a_I b_I \arccos \frac{A}{a_I} - \Delta l B. \quad (12)$$

而激光光斑面积为

$$S_L = \pi a_L b_L. \quad (13)$$

因此, 根据定义, 归纳出动态重合系数为

$$\rho = S_{LI} / S_L = \begin{cases} 1, & \langle \Delta \varphi \leq (\beta - \alpha) / 2 \rangle \\ 1 - \frac{\arccos(\frac{A - \Delta l}{a_L})}{\pi} + (\frac{\beta}{\alpha})^2 \frac{\arccos(\frac{a_I A}{\beta a_L})}{\pi} - \frac{\Delta l B}{\pi a_L b_L}, & \langle (\beta - \alpha) / 2 < \Delta \varphi \leq \sqrt{\beta^2 - \alpha^2} / 2 \rangle \\ \frac{\arccos(\frac{\Delta l - A}{a_L})}{\pi} + (\frac{\beta}{\alpha})^2 \frac{\arccos(\frac{a_I A}{\beta a_L})}{\pi} - \frac{\Delta l B}{\pi a_L b_L}, & \langle \sqrt{\beta^2 - \alpha^2} / 2 < \Delta \varphi \leq ((\beta + \alpha) / 2) \rangle \\ 0, & \langle \Delta \varphi > ((\beta + \alpha) / 2) \rangle \end{cases} \quad (14)$$

由式 (14) 知, 动态重合系数 ρ 与激光波束发散角 α ,

接收瞬时视场角 β 、传感器平台高度 H 、扫描镜速度 S 和波束倾角 φ 有关, 它以一个乘积因子的形式直接影响着激光探测功率的大小, 也就决定着激光扫描探测效果。

以上分析的是穿轨方向的扫描情况, 沿航线方向的平台运动引起的动态视场偏差的分析与此类似。当飞机作为探测平台时, 由于高度和速度较小, 其影响可以忽略不计。而在卫星对地探测时, 其影响不能忽略。例如, 如果 $H = 450\text{km}$, 运动速度为 8000m/s , 则激光发射回波接收时的时间差为 3ms , 此时卫星运动了 24m 。

3 典型情况下激光扫描成像探测效果分析

基于上述结论, 有必要分析讨论典型情况下的动态重合系数 ρ 与作业参数 (H, S)、系统设计参数 (α, β) 之间的关系, 以及它对激光扫描探测效果的影响, 以便于指导对观测激光扫描成像系统的设计。

3.1 如果 $\alpha \leq \beta$, 近似有

$$\rho = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi \leq \beta/2 \\ 0, & \Delta\varphi > \beta/2 \end{cases} \quad (15)$$

在这种情况下, 若高度-扫描速度积 $H \cdot S$ 满足

$$H \cdot S < \frac{\beta \cos \varphi}{8\pi}, \quad (16)$$

则激光光斑上的所有后向散射功率都会被探测到, 探测效果最好。

3.2 如果 $\alpha = \beta$, 有

$$\rho = \begin{cases} \frac{2\arccos(\Delta\varphi/\beta)}{\pi} - \frac{2\Delta\varphi}{\pi\beta} \sqrt{1 - (\Delta\varphi/\beta)^2}, & (\Delta\varphi < \beta) \\ 0, & (\Delta\varphi \geq \beta) \end{cases} \quad (17)$$

在这种情况下, 若 $\Delta\varphi = \beta/2$, 仅有 $\rho \approx 0.4$ 。若 $\Delta\varphi = \beta$,

将有 $\rho = 0$, 会探测不到任何回波。因而, 为了能够探测到回波功率, 此时的高度-扫描速度积必须满足

$$H \cdot S < \frac{\beta \cos \varphi}{4\pi}. \quad (18)$$

例如, 若 $\beta = 3\text{mrad}$, $\varphi = 22.5^\circ$, $H = 1000\text{m}$, 扫描速度必须满足 $S < 66\text{r/s}$ 。

3.3 而更一般的情况都较上述两种情况复杂, 需要由一组曲线表示动态重合系数的关系。图 3 就是某些具体参数时动态重合系数 ρ 与作业高度 H (单位为 m) 间的关系。其中图 3(a) 是某机载激光扫描成像系统中有关参数的情况, 可以看出, 随着扫描速度的加倍, ρ 明显地减小。在 $s = 40\text{r/s}$ 时, 若要求 $H = 1600\text{m}$, ρ 变成为 0。在原理试验时, 当扫描速度从 20r/s 变到 40r/s 时, 激光探测效果确实明显变差, 这显然与动态重合系数变小有关。图 3(b) 给出了另外一组参数时的 $\rho-H$ 关系, 它的 β 较 3(a) 中的为小, α 设计得非常小, 此时 β/α 很大, 所以在较大的作业高度范围内有 $\rho = 1$ 。由以上分析可以得到, 如果作业高度不是太高, 图 3(b) 的设计较好, 而若作业高度较高 (比如 $1000 \sim 2000\text{m}$ 或卫星对地探测), 就要求有较大的接收瞬时视场 β , 而且扫描速度 s 不能太大。

4 结语

通过以上分析可知, 激光扫描探测效果受到系统设计参数和作业参数的多重影响, 其分析结果可以指导我们根据作业目的和要求而在系统设计时合理选择系统参数, 又可以在系统实现之后, 指导选择合理的工作参数。

由上述分析还可知, 为了提高扫描探测效果, 需要较大的 β 并且通过激光准直来减小波束发散角

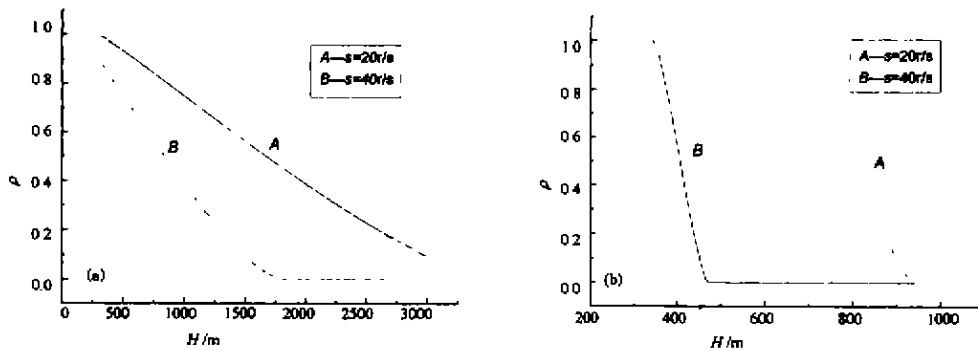


图 3 动态重合系数 ρ 与作业参数、系统参数间的关系曲线

Fig. 3 The curves of ρ versus operation parameters and system specifications
(a) $\alpha = 2.6\text{mrad}$, $\beta = 3\text{mrad}$, $\varphi = 22.5^\circ$. (b) $\alpha = 0.2\text{mrad}$, $\beta = 1.26\text{mrad}$, $\varphi = 22.5^\circ$

α . 但是, β 不可能太大, 否则会带来较大的背景噪声. 可以设计一种调节装置, 对静态时接收视场与激光束间的关系进行调节, 使之预先偏离一个角度 $\Delta\phi$, 这个角度与平台的可能作业高度成正比, 也满足式(2), 那么, 在动态扫描的情况下, 飞行高度恰为 H 时, 动态视场与激光束正好重合, 保证动态重合系数达到 1. 这一方法需要根据可能的作业高度实时调整 $\Delta\phi$, 而作业高度不一定恒定, 所以具体实现时要设置几个调节档, 通过适当地调整, 可以在一定范围内提高动态重合系数. 采用圆锥型扫描方案也是一种有效方法, 此时扫描镜作圆锥扫描, 实验已经证明: 在同样扫描速率的情况下, 其动态重合系数明显提高.

REFERENCES

- [1] Steven C Cohen, John J Degnan, Jack L Bufton, *et al.* The geoscience laser altimetry/ranging system. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1987, **25** (5): 581—592
- [2] Wong H, Antoniou A. Characterization and decomposition of waveforms for LARSEN 500 airborne system. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1991, **29**(6): 912—921
- [3] Penny M F, Abbot R H, Phillip D M, *et al.* Airborne laser hydrography in Australia. *Applied Optics*, 1986, **25** (3): 2046—2058
- [4] Bufton Jack L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft. *Proceedings of the IEEE*, 1989, **77** (3): 463—477
- [5] HU Yi-Hua, SHU Rong, XUE Yong-Qi. Improving the qualification of georeferenced image in the airborne scanning laser ranging-imaging sensor. *Proceeding of SPIE*, 2000, **4130**: 13—20
- [6] SHU Rong, HU Yi-Hua, XUE Yong-Qi. Scanning modes of the airborne scanning laser ranging-imaging sensor. *Proceeding of SPIE*, 2000, **4130**: 760—767