

机载激光扫描测距仪的性能分析*

江月松 李树楷

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 本文对机载激光扫描测距系统的探测信号功率、背景噪声、信噪比等性能以及它们之间的关系等进行了量化的评估和定性的分析,探讨了探测信噪比与测量距离、恒虚警概率探测时阈值/噪声比等问题,为机载激光扫描测距系统在遥感和测绘中的使用及系统性能的改进提供了科学的参考依据,其分析方法具有普遍意义,可用于不同的机载或星载激光扫描测距系统的分析。

关键词 机载激光扫描测距,探测信号,背景噪声,信噪比

1 引 言

激光测距由于其低成本、精度高、操作方便、实时等一系列优点,因而有广阔的应用前景,因此在激光测距技术出现不久,就引起了测绘与遥感科学工作者的兴趣,人们发展了机载激光测距技术,并相继将其用于近海岸水深测量^[1]、森林树冠分布的断面测量^[2]、对作业困难地区和用常规技术难以测绘地区的地貌测绘^[3],并进而将激光距离测量与激光反射测量结合起来进行土地和植被分类研究^[4],随着激光器性能的提高和微弱信号检测技术的发展,激光测距技术也从机载发展到机载扫描测距^[5]、星载激光测距^[6,7],应用范围也相应地扩展到研究与地震有关区域的地壳形变、构造板块运动、冰层与火山熔岩的厚度、海洋动力学、数字地面模型生成等领域。中国学者根据遥感发展的趋势,结合全球变化研究,资源调查、环境监测的时效性的需要,提出将机载激光扫描测距仪用于“三维信息获取与(准)实时处理”这一国际高技术项目中^[8]。胡以华等已对其中的光学系统的地面扫描轨迹进行了分析^[8],获得了地面采样点坐标的定量表示以及光学系统结构参数的选择方法等一些有意义的结果。然而,对机载激光扫描测距系统的信噪比、背景噪声等性能以及测距环境、GPS、INS等测量精度对测距误差的影响问题未作系统的分析,本文以“三维信息获取与(准)实时处

理”技术系统中的机载激光扫描仪为例,对激光扫描测距仪的回波功率、背景噪声、信噪比等性能以及影响这些性能的一些因素进行了分析,给出一些量化的结果,并对如何提高激光测距仪性能提出相应的改进措施,以期在遥感与测绘应用中激光扫描测距仪的使用提供一些量化的参考依据。

2 机载激光扫描测距仪及其性能分析

图1是机载三维信息获取与(准)实时处理原理

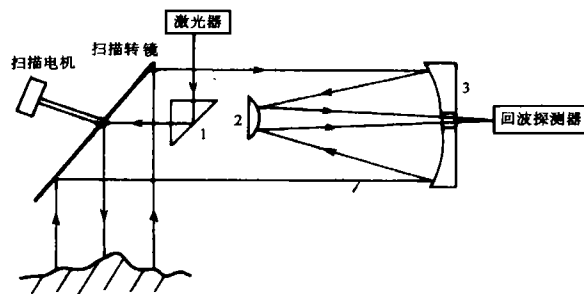


图1 扫描光学系统结构

Fig.1 The configuration of a scanning optical system

样机中的激光扫描测距仪的光机结构:图中1为棱镜,2、3构成卡塞格伦望远镜,棱镜的中心光轴与望远镜的光轴重合,这种将成像与测距共用一个光学系统是本系统的一大特色^[9]。望远镜的直径为180mm,次镜2的中心遮挡直径为70mm,焦距 f 为333.3mm。由于激光回波探测器的直径 d 约为1mm,

* 863计划308主题及获博士后基金资助项目。

收稿日期:1997-050-08;收到修改稿:1998-01-22

则视场角 $\theta = d/f = 3.07\text{mrad}$, 在激光束发散角小于 3.07mrad 时, 系统的充满系数为 1。测距是以光束在飞机平台上的激光器与待测地面之间往返传播的激光短脉冲计时为基础的。测量时, 激光器发出激光, 经棱镜 1 和扫描转镜向地面照射, 地面的后向散射信号经棱镜反射到望远镜主镜 3, 再经次镜 2 反射后, 将激光后向散射信号聚焦到回波探测器的焦点上, 经后继处理而达到测距目的。

激光扫描测距的概念是以高信噪比环境为基础的, 在高信噪比环境中, 每一激光脉冲被用作唯一的距离测量, 因此, 对于地貌测量来说, 保存每一个相继脉冲的独立数据是重要的。扫描测距仪性能的分析与评估, 就是要分析系统是否存在足够的探测信噪比以及信噪比与所测出数据之间关系的合理性。

激光测距仪的信号强度取决于从目标表面的后向散射和由接收望远镜收集到的激光脉冲功率, 与其相竞争的过程是光学背景噪声、探测器噪声和前置放大器噪声等, 对这些量进行分析就可以建立测距仪的探测信噪比。因距离的测量是建立在以超过阈值的脉冲的计时为基础的, 只有那些超过阈值的脉冲回波才能进入测距数据流, 这个阈值电路有助于抑制后向散射噪声和探测器噪声, 这就使得虚警 (false alarm) 概率最小。

通常用在遥感与测绘中的激光测距仪是天底扫描, 按照激光雷达方程, 所接收到的激光脉冲信号功率为:

$$P_R = \frac{E_T A_R \eta(R)}{\tau R^2} T_O T_C^2 T_A^2(r/\Omega) \quad (1)$$

式中: E_T 为发射的激光能量 (J); τ 为激光脉冲宽度 (s); A_R 为接收器面积 (m^2), 根据我们的实例, 取 $A_R = \pi \cdot (0.09^2 - 0.035^2) \text{m}^2 = 0.0216\text{m}^2$; R 为激光器到目标表面的距离 (m); T_O 为光学系统透射率, $T_O = T_R T_T$; T_R, T_T 分别为接收系统与发射系统的透射率, 经测量得到 $T_R = 0.5, T_T = 0.7$, 所以 $T_O = 0.35$; T_C 为云层的透射系数, 对于晴朗天气飞行 600m 高度, $T_C = 1$; T_A 为双程大气溶胶透射率, 对于中纬度地区且晴朗天气, 可推算 $T_A = 0.80$ (文献 [10]); $\eta(R)$ 为系统充满系数, 因激光束发散角 $= 2.6\text{mrad}$, 小于回波接收视场角, 所以 $\eta(R) = 1$; r/Ω 为目标的后向散射率 (sr^{-1}), 其值取决于目标的光谱反射和散射特性, 它呈数量级变化, 在波长为 $1.06\mu\text{m}$ 时, r/Ω 的范围从 $0.05/\pi - 0.8/\pi$ (sr^{-1})^[6, 11]。所用的固体激光器, 其主要性能指标为: 单脉冲能量 $E_T = 500\mu\text{J}$; 波长 $\lambda = 1047\text{nm}$; 脉冲宽度 $\tau \leq 7\text{ns}$; 脉冲重复频率 f 为 0—

10kHz; 光束发射角 $\theta_F = 2.6\text{mrad}$; 空间模式 TEM_{00} ; 工作高度 0—3000m。此外还必需考虑影响激光回波信号的一个重要的因素是激光与目标表面的相互作用而引起的脉冲波形畸变和脉冲展宽效应, 设测量中脉冲最大展宽可达 70ns, 则扫描角在 $0 - \pm 22.5^\circ$ 范围时, 根据上述一些参量, 接收到的回波信号功率应在 $1.65 \times 10^{-6} - 3.09 \times 10^{-4}\text{W}$ 范围, 一般的硅雪崩光电二极管探测器可以探测到 10^{-8}W 量级的信号功率, 所以就信号强度而言, 这个回波信号是足够的了。但要决定探测器探测能力必须考虑探测信噪比。

激光扫描测距仪接收器噪声分析和信噪比 SNR 的分析与估算必须考虑太阳背景辐射、探测器噪声、前置放大器噪声以及信号所致的量子噪声。在机载天底扫描测距的情况下, 从地表反射的太阳背景辐射能产生的噪声功率为^[6]:

$$P_B = I_S A_R T_A^2(r/\Omega) R_\phi T_R F_B \quad (2)$$

式中: I_S 为在 1.047nm 波长处大气引起的太阳光谱辐射 $I_S = 6.6 \times 10^{-1}\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ^[12]; R_ϕ 为接收器的视场角 (sr), 被设置在 3.0mrad 以确保收集目标表面上整个光斑的激光的后向散射信号和补偿发射器/接收器光路准直误差; F_B 为接收器的窄带通滤光片 (nm) F_B 取值为 40—80nm。由此估算出所使用的激光扫描测距仪的背景光学噪声功率约为 $5.0 \times 10^{-6} - 3.0 \times 10^{-4}\text{W}$, 和回波信号功率处于相同的数量级, 这对测距是个很不利的因素, 由 (2) 式可以看出, 降低背景辐射噪声的一个有效的办法是减低滤光片的带宽, 在技术上是 不难实现的。

目前, 激光回波探测器一般采用带有前放的硅雪崩二极管 (Si APD), 不同型号的二极管其性能指标有所差异, 我们采用 SPD-052 型 Si APD 光电探测器, 对 800—1100nm 波长内的脉冲具有极高的响应速度和较高的探测率。在探测过程中, Si APD 对暗电流和额外的倍增噪声两项都有贡献, 此外还必须包含前置放大器输入的热噪声, 因此, 对于后向散射激光脉冲探测, 其综合信噪比可表示为^[13, 14]:

$$\text{SNR} = \frac{P_R^2}{[2q(P_B R_0 + P_R R_0 + i_d)^{FB} M^2 / R_0^2 + i_d^2 / (R_0 M)^2]} \quad (3)$$

式中: M 为 Si APD 的增益 (~ 120); F 为 Si APD 的额外噪声因子 (~ 4.5); B 为探测器带宽, 对于 SPD-052 雪崩管而言, 其探测器的带宽为:

$$B = \frac{1}{2\pi t_1} = \frac{2.2}{2\pi t_r} \quad (4)$$

其中, t_1 是探测器的响应时间常数, 由探测器中的等效电阻和电容决定, $t_1 = t_r/2.2$, t_r 为雪崩管的上升时间 $t_r = 8\text{ns}$, 所以 $B = 44\text{MHz}$; R_0 为 Si APD 单位增益的灵敏度 ($\sim 0.135\text{A/W}$); $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{A} \cdot \text{S}$; i_d 为 Si APD 经过放大的暗电流 ($\sim 50\text{nA}$); i_A 为前置放大器输入的电流噪声 ($\sim 6 \times 10^{-11}\text{A}$); (3) 式中也包含了 P_R 的存在而引起的信号量子噪声效应。(3) 式中信噪比 SNR 作为 P_R 和 P_B 的函数结果 (图 2), 它表明, 在最大背景辐射下, 回波信号功率不低于 10^{-6}W 时, 信噪比不低于 30dB, 最佳情况信噪比可达 70dB 以上。对于通常的硅雪崩二极管光电探测器, 这样的回波信号强度和信噪比对于保证每一个脉冲的距离测量是足够的。飞机的飞行高度、探测回波信号功率、探测光学信噪比之间是互相制约的, 这三者之间如何协调好是实际飞行测量中必需考虑的问题。从 (1) 式可知, 激光测距回波功率与距离成反平方关系, 飞行高度的增加将引起回波功率的大幅度的降低, 而 (2) 式中的背景噪声功率则基本不受距离增加的显著影响, 这就使得探测信噪比大大减低, 图 3 计算了在目标后向散射率为 $0.1/\pi$ 、测量距离从 600m 增加到 1500m 时探测光学信噪比从 65.3dB 降低到 50.4dB 的情况变化情况。测量距离增加 900m, 信噪比降低了 15dB。

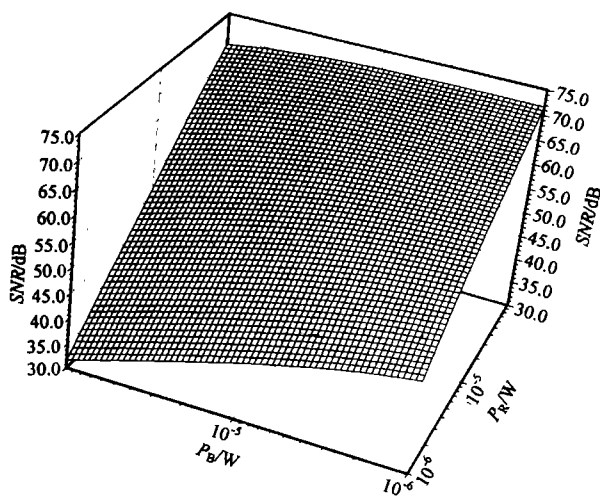


图 2 信噪比与激光回波功率 P_R 和背景辐射功率 P_B 变化关系

Fig.2 Optical signal-to-noise ratio (SNR) of scanning rangefinder versus received laser power (P_R) and solar-background power (P_B)

事实上, 当 P_R 超过 P_B 时, 噪声主要是由信号、

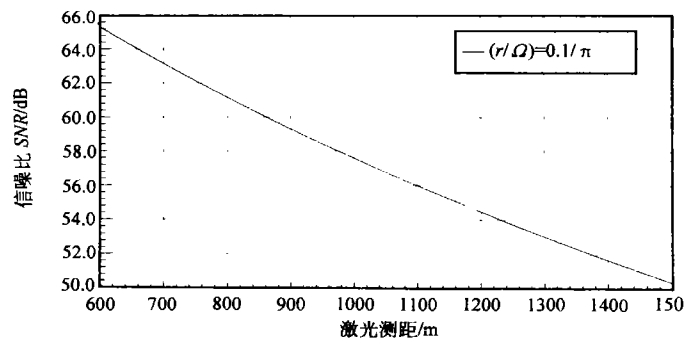


图 3 光学探测信噪比随测量距离变化情况

Fig.3 Optical signal-to-noise ratio (SNR) versus laser range

Si APD 的额外噪声因子 F (探测器噪声) 放大的量子噪声引起的。在实际测量过程中, 扫描角的增大、目标表面的斜率及粗糙度的增加会使脉冲有较大的展宽¹⁾ 和干涉散斑, 结果是减低 P_R 的值, 从而使得探测信噪比减低, 但这可以通过减低探测滤光片的带宽来减低背景辐射而补偿信噪比的损失。

低且变化的信噪比同样也产生显著的探测概率 p_E 和虚警概率 p_{FA} , Fried 等应用通讯理论说明了 p_E , p_{FA} 与阈值—噪声比的关系^[15]。在这里, 针对具体所使用的激光扫描测距仪, 我们给出恒虚警探测时的信号、阈值与噪声之间比例关系。假定漏掉的探测概率为 $p_E = 0.001$, 虚警概率 p_{FA} 为每 1000 个脉冲出现一次, 并设概率上的最大可探测距离为 $R_{max} = 10000\text{m}$, 则平均虚警概率 p_{AFA} 为:

$$p_{AFA} = p_E \cdot C / (2R_{max}) = 0.001 \times 3 \times 10^8 / (2 \times 10000) = 15\text{s} \quad (5)$$

于是, 考虑到激光脉冲宽度 $\tau = 7\text{ns}$, 有 $\tau \cdot p_{AFA} = 1.05 \times 10^{-7}$, 则由此结合 $P(E)$ 查表得到峰值信号电流与均方根噪声电流之比为 $I_s/I_n = 8.5$ 。另由下式:

$$p_{AFA} = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau} \exp(I_t^2/2I_n^2) \quad (6)$$

可求出阈值电平 I_t 与噪声电平 I_n 之比为 $I_t/I_n = 5.54$, 也就是说, 只有在信号电平是噪声电平的 8.5 倍、阈值电平是噪声电平的 5.44 倍时, 才能实现所要求的恒虚警探测。

上述对激光扫描测距仪的噪声分析给出了数量级的评估, 事实上, 产生噪声的因素非常复杂, 额外噪声因子是在均方根意义上解释了 APD 噪声的效应; 由于表面反照率、扫描角、目标的随机性、大气溶胶引起的大气透射的变化等多重因素引起了在接收

1) 江月松, 尤红建, 李树楷。机载三维信息获取中激光扫描测距仪误差分析, 待发表。

信号中脉冲到脉冲的强度的起伏变化,从而导致了信噪比的巨大变化。如何在技术上及时校正这些因素的影响还需从理论上和技术上作进一步的研究。

对探测信号强度调制的另外一个可能过程是散斑噪声,有时也叫相干衰减,它是在脉冲期间内激光束在目标表面的光斑的不同部分散射的子波彼此间干涉而产生颗粒状的随机强度分布的结果,即所谓的散斑图样,它是一种三维干涉效应。如果接收器平面中散斑图样的空间尺度比接收器孔径尺寸小,则散斑图样的对比度就会降低,整个信号的调制就会减低,这一过程叫做孔径均化(aperture-averaging)。散斑的尺度和激光波长与距离的乘积成正比而与激光束在目标表面的光斑尺寸成反比^[16]。例如,在波长 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、激光发散角为 1mrad 时,产生的散斑的空间尺度只有 1mm 。对于我们的望远镜孔径,含有 10^3 — 10^4 个散斑尺度,所以对回波信号强度的调制显得不是太重要。在激光扫描测距中,激光发射器的多重纵向(时间)模式以及多重横向(空间)模式会产生附加的均化效应,辐射的时间相干程度或者空间相干程度这两者任一方面的降低都会减小散斑的调制程度。具体的定量化的分析要用统计光学的方法。

此外,激光束通过大气传播时,由于随机的大气湍流导致的折射率涨落,激光束会受到漂移和扭曲的伤害,从而会引起光学波前畸变而导致一些潜在的问题,其中主要问题是闪烁(scintillation)现象和激光束辐射的快速调制,现在的激光器,激光束发散角在 mrad 量级,这种效应对测距仪性能的影响是可以忽略的。

3 结论与讨论

本文以三维信息获取中的机载激光扫描测距仪为例,对其性能的几个主要方面作了较为系统的分析与评估,给出了测距仪回波信号、背景辐射噪声的数量级范围,计算了系统的信噪比与回波信号、背景噪声之间的变化结果,改善信噪比的一个有效办法就是使用窄带宽的滤光片,这在技术上是较容易实现的。在实际飞行测量中,为提高作业效率,希望飞机飞行高度高一些,但高度的增加受回波信号功率与探测光学信噪比的限制,调整好它们之间的关系是实际作业时必需要解决好的问题,文中的计算可作为解决这个问题一个参考。文中还讨论了恒虚警探测时的信号、阈值电平与噪声电平之间的比例关系,这些为激光扫描测距仪性能的进一步改进提

供了重要的参考依据,事实上,激光束在大气中传播时除了受到大气气体和气溶胶的吸收、散射外,还会受到干涉、大气湍流扰动等的影响,因此,本文还对散斑效应、大气湍流效应作了定性分析,此外,还会伴有大量的线性与非线性相互作用发生,因此,更为精确的定量化的分析需要对测距电子学、大气消光系数、湍流噪声等每一方面作专题深入研究。本文的分析方法稍作变化可用于各种不同的激光扫描测距系统的分析。由于扫描测距过程中目标变化、激光束传播路径的随机性和复杂性使得激光束传播质量变化也复杂化了,如何在扫描测量过程实时改善激光束的质量以提高激光器的测量性能及测量精度,近年来发展起来的自适应光学技术将是一个行之有效的办法。

致谢:本文写作过程中参考了中国科学院安徽光学精密机械研究所胡以华博士提供的有关参数与资料,作者深表感谢!

参 考 文 献

- 1 G. D. Hickman, J. E. Hogg. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing Environ.* 1969, 1:47.
- 2 R. Nelson, W. Krabill, G. Maclean. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing Environ.* 1984, 15:201.
- 3 W. B. Krabill, J. G. Collins, R. N. Swift, M. L. Butler. Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 1984, 50:686.
- 4 H. Schreier, J. Lougheed, C. Tucker, D. Leckie. Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system. *Int. J. Remote Sensing*, 1985, 6:101.
- 5 K. Muirhead, A. P. Cracknell. Airborne lidar bathymetry. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, 7:597.
- 6 S. T. Cohen, J. J. Degnan, III, J. L. Bufton, J. B. Garvin. The geoscience laser altimetry/ranging system. *IEEE Trans. Geos. and Remote Sensing*. 1987, 25:581.
- 7 R. Seshamani. A satellite-borne altimeter for digital terrain modelling. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, 14:3133.
- 8 李树楷, 薛永祺. 遥感多维信息集成的装置与方法. 中国专利, 96 1 14306.1, 1996年12月.
- 9 胡以华, 魏庆农, 章立民, 魏吴明. 机载三维信息获取中地面扫描轨迹分析. *遥感学报*, 1997, 2(1).
- 10 李景镇编. 光学手册. 陕西科学技术出版社, 1986.
- 11 J. E. Bufton, F. E. Hoge, R. N. Swift. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface. *Appl. Opt.*, 1983, 22:2603.
- 12 W. L. Wolfe, G. J. Zissis. The infrared handbook, Office of

- Naval Research. Department of the Navy, Washington, DC. 1978.
- 13 R.J. McIntyre. Comparison of photomultipliers and avalanche photodiode for laser applications, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1979, 17:347.
- 14 C. W. Helstrom. Computing the performance of optical receivers with avalanche diode detectors. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, 36:61.
- 15 D. L. Fried, R. A. Schneltzer. The effect of atmospheric scintillation on an optical data channel-laser radar and binary communications. *Appl. Opt.*, 1967, 6:1729.
- 16 J.W. Goodman. Statistical properties of laser speckle patterns.

Laser Speckles and Related Phenomina, J. C. Dainty, Ed. Springer, New York, 1975, 9—75.

作者简介

江月松,男,1959年4月生,中国科学院遥感应用研究所博士后,1982年毕业于南京工学院电子工程系,工学学士;1989年毕业于东南大学物理系,工学硕士;1995年毕业于南京大学物理系,理学博士。目前进行激光遥感与应用研究。在国内外学术期刊已发表论文近20篇。

An Analysis of Performance of the Airborne Laser Scanning Rangefinder

Jiang Yuesong Li Shukai

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Science Beijing 100101)

Abstract A method for quantitative evaluation and qualitative analysis to the performance such as detected backscattering signal, optical background noise and signal-to-noise ratio (SNR) of the airborne laser scanning rangefinder is proposed. The problems such as the relations between SNR and detected signal, background noise and detected range are discussed. The ratio of threshold-to-noise for constant probability of false alarm is also given. All of these can be used as a scientific basis for the use in the fields of remote sensing as well as surveying and for the improvement of airborne laser scanning ranging system, the analysis method can be generalized for different airborne or satellite carried laser scanning rangefinder.

Key words Airborne laser scanning ranging, Detected signal, Background noise, Signal-to-noise ratio