

# 空间激光遥感技术研究

赵铭军, 张晓鹏, 周胜利, 徐 鹏  
(中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:**通过与地面应用激光雷达的对比分析了空间激光遥感系统的工作特点。根据测距方程,对影响空间激光遥感系统回波功率的外部因素进行讨论。分析了回波探测系统的设计要素,对激光遥感系统探测概率与信噪比间关系进行讨论,并针对雪崩光电二极管(APD)的最佳工作点控制技术和雪崩高压稳定控制技术进行了深入分析,同时根据最佳线性滤波器匹配设计理论给出了接收通道带宽与增益的理论设计结果。

**关键词:**激光遥感;探测概率;雪崩光电二极管;滤波器

**中图分类号:**TP721.2      **文献标识码:**A

## Study on the Space-borne Laser Remote Sensing Technology

ZHAO Ming-jun, ZHANG Xiao-peng, ZHOU Sheng-li, XU Peng  
(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Comparing with the system which was designed for the ground application, the operation characteristics of space-borne laser remote sensing system are analyzed. According to the laser ranging equation, external factors which influence echo power are discussed. The design elements of echo detecting system are analyzed and the relation between detection probability and SNR is discussed. The optimal operation point setting technique and high bias voltage stability control technique of APD are studied in detail. Based on the theory of optimum liner filter designing, the theoretic design results, such as the bandwidth and gain of the receiver, are given in this paper.

**Key words:** laser remote sensing; detection probability; avalanche photodiode; filter

### 1 引言

继可见光、红外和微波遥感技术之后,激光遥感技术以其高精度、主动工作、高分辨率等优点,在三维成像、高精度对地观测和深空探测等领域得到广泛的应用,表现出良好的空间应用前景。美国在激光技术的空间应用方面做了大量研究,并取得了令人瞩目的成果,如2000年的火星轨道激光高度计(MOLA)、2003年的ICESat和2006年的CALIPSO卫星等<sup>[1-3]</sup>。MOLA主要用于研究火星地形情况,为评估火星的地球物理特性、地理特性和大气特性提供数据,ICESat主要用于极地冰盖总量平衡和对海平面变化的研究,CALIPSO主要用于对地球的云层和浮质进行三维观测。

### 2 激光遥感工作特点及影响因素分析

#### 2.1 工作特点

与地面应用的系统相比,空间激光遥感系统有其自身特点,较为突出的表现在以下几个方面:

##### (1) 目标特性不同

对于地面应用的中远距离激光系统(如火控雷达),其主要目标是空中飞行物体(如飞机或导弹),对于这类目标通常作为漫反射小目标,其回波功率与距离的四次方、发射激光束散角的平方成反比;而对于空间激光遥感系统,由于其测量对象多为星体,

**作者简介:**赵铭军(1972-),男,工学博士,从事激光雷达及光电对抗方面的研究,研究方向为空间主动光学遥感技术。E-mail: mjzhao307@163.com

**收稿日期:**2008-07-13

因此目标特性是漫反射大目标,回波光功率与距离的平方成反比。

### (2) 传输信道不同

地面应用的激光系统多为在大气中应用,大气衰减多取水平传输低层大气模型,主要衰减因素为米氏散射,同时由于大气的后向散射影响,会对接收机通道产生干扰信号,因此系统设计时需采用近程自动增益控制技术。空间激光系统用于深空探测时则无需考虑大气后向散射,用于对地观测时多以垂直方式穿越大气,因此应重点考虑光在大气中传输的垂直传播衰减模型。

### (3) 距离有先验值

在地面应用的激光系统中,目标的距离是未知量,目标距离可能是从盲距(几十米)到最远作用距离间的任意值。而对于空间激光遥感系统,由于卫星轨道高度是已知量,同时目标特性(如地形起伏等)又不是突变量,因此这种系统具有先验值,目标回波数据有一个范围,都是在轨道高度附近变化的量,这对系统设计是有利的。

### (4) 具备定位和成像功能

空间激光遥感系统可根据平台位置、激光指向和回波距离对目标定位,同时在激光脚点密度达到一定值时具有对目标成像功能。

## 2.2 回波强度的影响因素

可根据雷达方程推导出激光遥感时漫反射大目标的回波功率为:

$$P_r = \frac{P_t \cdot \rho \cdot \tau_t \cdot \tau_r \cdot \tau^2 \cdot A_r}{\pi \cdot R^2} \quad (1)$$

式中, $P_r$ 为探测器接收到的光功率; $P_t$ 为发射激光峰值功率; $\tau_t$ 为发射光学系统透过率; $A_r$ 为探测系统接收光学口径(面积); $\tau_r$ 为探测系统接收光学透过率; $\rho$ 为目标光学系统对入射激光的反射率; $\tau$ 为激光单程大气透过率; $R$ 为探测系统到目标的距离。

从方程(1)可以看出,对于一个激光遥感系统,对回波功率产生影响的外部因素主要有大气透过率、目标反射率和作用距离。这三个因素中作用距离基本由轨道高度确定,在此重点讨论大气和目标的影响。同时,根据目前激光器技术发展水平和空间环境应用的特殊性要求,目前的空间遥感系统多采用1.064 $\mu\text{m}$ 工作波段,本文重点对该波段进行讨论。

### (1) 大气衰减

地球大气是激光遥感的主要衰减因素。按照温度的垂直分布不同,地球大气可以分为对流层、平流层、中间层和热层,而且大气分子主要集中在0~

50km高度范围内的对流层和平流层,约占地球大气总量的99.9%,而在高度大于50km的空间仅占0.1%左右。因此在计算大气衰减系数时,主要考虑此范围内的大气衰减,其他高度范围大气影响可忽略。

影响激光在大气中传输的因素较多,主要有大气能见度、温度、气压、大气成分、大气密度以及传输路径等。对于斜程传输,单色光的大气透射率为:

$$\tau(\lambda) = \exp[-\sec Q \int_0^H \sigma(\lambda) dh] \quad (2)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 激光的大气透射率; $\sigma(\lambda)$ 为该波长的总衰减系数; $Q$ 为天顶角; $H$ 为光的传输距离。其中总衰减系数可表示为:

$$\sigma(\lambda) = \sigma_m + \kappa_m + \sigma_a + \kappa_a \quad (3)$$

其中, $\sigma_m$ 为分子散射系数; $\kappa_m$ 为分子吸收系数; $\sigma_a$ 为气溶胶散射系数; $\kappa_a$ 为气溶胶吸收系数。

对大气传输进行计算的常用软件有美国地球物理实验室研制的LOWTRAN, MODTRAN和FASCODE。其中,FASCODE更适合对激光传输特性的研究。图1是陈前荣等人利用FASCODE软件,在能见度为10km时计算的不同仰角(仰角间隔5°)条件下1.064 $\mu\text{m}$ 激光传输10km时的单程透过率曲线<sup>[4]</sup>。在天顶角大于50°,传输距离大于10km后透过率基本不变。

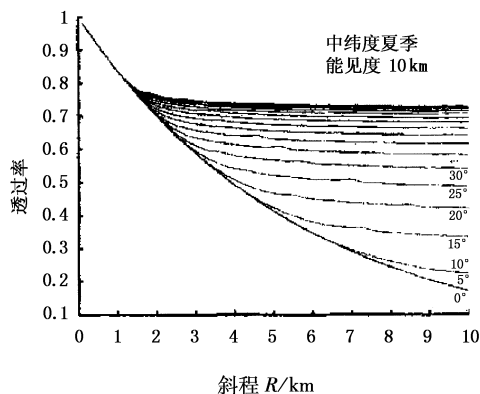


图1 能见度10km时大气斜程透过率曲线

### (2) 目标反射率

反射率是指物体表面反射激光的能力,用反射功率与入射功率之比来描述。反射率是波长的函数,它与目标材料或目标表面涂层的透射率和吸收特性有关,也与目标表面粗糙度有关。实验结果表明,漫反射目标在光束入射角较小的情况下显示出较好的朗伯特特性,即辐射体向空间规定方向单位立体角内发射的辐射通量和该方向与表面法线方向夹角的余弦成正比。表1为一些涂层和天然目标对1.064 $\mu\text{m}$ 波长激光的反射率。

表1 不同目标在 1.064μm 波段反射特性

目标类型		目标反射率	
各类天然目标	绿色植被	0.64	
	沙漠	0.5	
	土壤	0.32	
	雪	0.75	
人工目标	铝(风化了)	0.55	
	建筑用水泥	0.5	
	钛合金(新的)	0.47	
	钛合金(风化了)	0.48	
	军用涂层	浅棕色	0.257
		浅黄绿色	0.118
		黄绿色	0.118
		绿褐色	0.121
		灰色	0.071

3 回波探测系统设计要素

3.1 探测概率、假目标概率与信噪比

激光遥感系统的探测概率和假目标概率是系统设计的重要指标,由指标要求的假目标概率和探测概率选取探测阈值,求出稳定时的信噪比。

在能量探测方式中,对于量子噪声极限的探测来说,噪声的统计特征服从泊松分布。除了光量子极限工作条件外,探测器接收到大量光子,并产生大量光电子。依据中心极限定理,大量光电子噪声概率密度函数,可以用高斯概率密度函数来表示。而探测器电流噪声和背景噪声、热噪声、电路噪声等在放大器线性工作的条件下,所有噪声之和的统计特征仍然服从高斯分布。

在选定门限阈值后,假目标概率用下式来表示:

$$P_F = \int_{U_m}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{U_n^2}{2\sigma_n^2}} dU_n \quad (4)$$

式中,  $U_m$  为选定门限阈值。

当有信号和噪声同时存在时,根据概率论可得探测概率的表达式为:

$$P_d = \int_{y_m}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-y^2} dy \quad (5)$$

式中,  $y = \frac{x - U_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}$ ,  $y_m = \frac{U_m - U_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}$

信噪比可由假目标概率  $P_F$  求得  $U_m$ ,再由探测概率  $P_d$  求得  $y_m$ 后,由下式求得:

$$SNR = \frac{U_s}{\sigma_n} = \frac{U_m}{\sigma_n} - \sqrt{2}y_m \quad (6)$$

雷达研究工作者将探测概率作为假目标概率和信噪比的函数作成图表,供研究使用,如图2所示<sup>[5]</sup>。一般在火控探测系统中,假目标概率小于

$10^{-5}$ 时被认为是可以接受的指标。由图中可以看出,若假目标概率为  $10^{-5}$ ,当信噪比为 5 时,则探测概率大于 80%;当信噪比为 6 时,探测概率大于 95%;当信噪比为 7 时,探测概率已达 99.9%。对于空间遥感系统,由于探测距离有先验值,假目标概率指标可进一步放宽,认为达到  $10^{-3}$ 时可以接受,此时若要求探测概率大于 90%,所要求的信噪比约为 4.5。

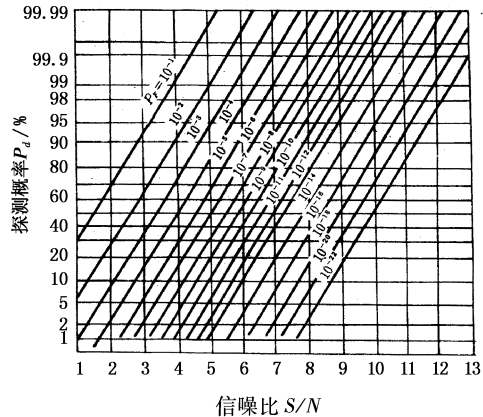


图2 探测概率、信噪比与假目标概率关系

3.2 光电探测器

硅雪崩光电二极管(Si-APD)是目前工作在 1.064μm 波长的灵敏度较高、具有内部增益的光电器件。当光照射其 PN 结区时,便产生光生载流子,并且在强电场作用下动能急剧增大并与晶格原子发生碰撞产生电子空穴对,并产生连锁反应和雪崩效应。上述过程非常迅速,因此雪崩管本身具有电流增益和响应度高、响应速度快等特点。其光电倍增因子  $M$  可表示为:

$$M = \frac{1}{(1 - \frac{V}{V_B})^\alpha} \quad (7)$$

其中,  $V$  为外加雪崩高压;  $V_B$  为击穿电压;  $\alpha$  为基体材料有关的系数,硅:  $\alpha = 1.5 \sim 4$ , 锗:  $\alpha = 2.5 \sim 3$ 。可见倍增因子随外加电压升高而增加,但电压太高雪崩管会有被击穿危险。图3为 APD 的电流响应曲线示意图。APD 使用时有两个关键技术:一是最佳倍增因子  $M_{opt}$  控制,也称最佳工作点控制技术,二是雪崩高压的稳定控制技术。

3.2.1 最佳倍增因子  $M_{opt}$

从图3中可直观看出随着 APD 反向偏压的增大,噪声与信号有着不同的响应曲线:在临界电压以下,信号光电流增加速度快,噪声电流只有缓慢变化,但当反向偏压高于临界电压时,虽然信号、噪声电流都在上升,但噪声电流增大速度要快得多。因此,该临界电压下所得到的信噪比最大,此时的

APD 增益被称为最佳倍增因子( $M_{opt}$ )。需要指出的是,由于材料的离散性,不同产品的最佳偏压值是不同的,使用时需要逐一检测。

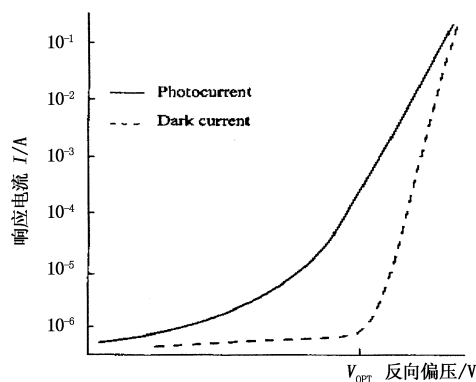


图3 APD的  $I-V$  特性

### 3.2.2 雪崩高压的稳定控制

由于 APD 的输出电流对外加偏压的变化很敏感,同时其最佳偏压随温度变化(对于 C30950 系列来说,雪崩偏压的变化量为  $2.5V/^\circ C$ ,根据国军标要求  $-40^\circ C \sim +60^\circ C$  时变化值为  $200V$ ),因此要求 APD 外加偏压既要随着温度变化调整,同时还要随着背景(噪声)变化进行调整,始终工作在输出信噪比最佳的状态,所以在电路设计上必须通过反馈回路对偏压进行精确控制。图4为该反馈控制回路原理框图。

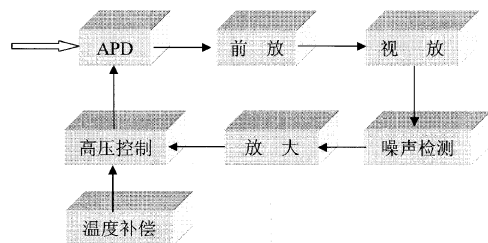


图4 APD 高压控制回路

由主通道的输出信号分出一路送噪声检测回路,检测结果经放大后对雪崩管偏压进行控制:噪声大时控制高压降低,噪声小时控制高压增大。由温度传感器输出的温度补偿信号也经过高压控制回路对偏压进行控制。

### 3.3 通道带宽与增益

放大器带宽选取与信号频谱和噪声特性有关。激光发射信号脉冲宽度只有几纳秒,经传输和目标展宽后其宽度增加,可达到十几纳秒。针对激光回波脉冲的特点,为使接收机输出信噪比最大,必须进行带宽的匹配设计。

根据雷达信号处理中的最佳线性滤波器设计理论<sup>[6]</sup>,以输出信噪比最大为准则,得出在白噪声情况下匹配滤波器的频率特性应为输入信号频谱的复

共轭。设输入信号为  $S_i(t)$ ,其频谱为:

$$S_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

只有当滤波器的频率响应为

$$H(f) = KS_i^*(f) e^{-j2\pi ft_0} \quad (9)$$

时,在滤波器的输出端能得到最大信噪比。

对于激光雷达中的窄脉冲信号,匹配带宽设计与脉冲信号的前沿上升时间有关,其工程设计取值为:

$$B \approx \frac{0.35 \sim 0.45}{t_r} \quad (10)$$

接收通道增益与输入信号幅度和后端触发信号电平有关。设由光电探测器输出的信号为  $V_{smin}$ ,而后端的整形触发电平阈值为  $V_H$ ,则放大器增益为:

$$K = \frac{V_H}{V_{smin}} \quad (11)$$

式中,  $V_{smin}$  主要由探测器的噪声等效功率(NEP)、通道带宽( $B$ )、背景噪声和信噪比确定。

## 4 结束语

与地面应用的激光探测系统相比,空间激光遥感系统有其自身特点,突出表现在目标特性、传输信道和目标距离等方面的差异。在回波探测通道设计中,需要综合考虑系统假目标概率、探测概率与信噪比间的关系,通过对光电探测器的最佳工作点控制以及带宽、增益的匹配设计来实现远距离高灵敏度探测。总之,空间激光遥感回波探测系统设计既要借鉴地面系统的成熟技术,又必须根据空间应用的特点进行具体分析,这样才能设计出合理、高效的探测系统。

## 参考文献:

- [1] Abshire J B X, Sun, R S Afzal. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. Appl. Opt., 2000, 39: 2440 - 2460.
- [2] Zwally H J, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34: 405 - 445.
- [3] Carl Weimer, Ron Schwiesow, Mark LaPole. CALIPSO: lidar and wide-field camera performance [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5542, 74 - 85.
- [4] 陈前荣, 王国玉, 等.  $1.064\mu m$  激光大气透过率数据库的建立与应用 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (7): 610 - 613.
- [5] 戴永江. 激光雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [6] 赵树杰. 信号检测与估计理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.