

文章编号: 0253-2239(2008)03-0573-05

星载激光相干测高计的参量设计

杨 馥 贺 岩 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)

摘要 为使星载激光高度计实现高空间分辨率、高距离精度,提出了联合采用调频光纤激光器和相干测距的方法。详细讨论了这种方法的实现方案,并对方案中的激光发射功率、望远镜口径以及脉冲宽度对距离精度及信噪比的影响进行数值模拟。对系统参量进行分析,得到了相关参量的关系和优化的参量。结果表明,当望远镜口径为 400 mm 时,啁啾调频速率为 1 MHz/ μ s,脉冲时间宽度 150~350 μ s,发射功率 10 W 左右时,基于相干测距的星载激光高度计可以实现距离精度小于 15 cm 的技术指标。

关键词 激光遥感;星载激光高度计;外差探测;频率调制;光纤激光;人眼安全

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

Parameter Design of Space-Borne Laser Altimeter

Yang Fu He Yan Chen Weibiao

(*Novel Laser Technique and Application System Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract In order to realize the high spatial and range resolution for a space-borne laser altimeter based on frequency-modulated fiber laser and heterodyne-range detection is proposed. The detailed principle of detection is presented. The relationship of range accuracy and signal-to-noise ratio with laser power, telescope diameter, and pulse width are numerically simulated. The relationship and the optimized parameters are given after the analysis of system parameters. The results show that the space-borne laser altimeter based on coherent range detection can achieve a range accuracy of less than 15 cm with telescope aperture of 400 mm, chirp rate of 1 MHz/ μ s, pulse width ranges of 150~350 μ s, and average laser power of about 10 W.

Key words laser remote sensing; space-borne laser altimeter; heterodyne detection; frequency modulation; fiber laser; eye safety

1 引 言

星载激光高度计可以精确地获取卫星平台到行星表面的距离,结合卫星姿态、定位信息,利用轨道重叠技术来获取全球地面的数字高程,因此在地球科学、深空探测中得到广泛应用。目前,已经成功进行发射的星载激光高度计,如地球观测的地球科学激光测高仪系统(GLAS)^[1],月球探测的“Clementine”^[2],火星探测的火星轨道激光测高仪(MOLA)^[3]等,均采用传统的脉冲激光测距技术,通过发射巨脉冲,采用时间间隔测量技术来获取距离信息。这种方式结构简单,但是在高脉冲能量下,

提高激光重复频率的难度和风险大,造成地面的分辨力偏低。提高地面分辨力是对地观测的发展趋势,除了进一步提高传统脉冲测距的能力外,一些新的测量方案在不断被提出来^[4~6]。

本文基于连续激光和相干测距技术,设计一套星载激光测高仪,针对星载测量特点,进行系统参量的设计和优化,并进行测量精度的数值模拟。

2 测量原理

星载激光相干高度计的组成原理如图 1。激光器采用人眼安全波长的通信波段的、成熟的光纤单

收稿日期: 2007-06-27;收到修改稿日期: 2007-11-28

作者简介: 杨 馥(1983-),女,江西吉安人,博士研究生,主要从事相干探测系统的仿真以及参量设计等方面的研究。

E-mail: yangfu_sh@126.com

导师简介: 陈卫标(1969-),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感、遥测和激光雷达等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn

模激光器。激光器输出光入射到一个 1×2 光纤分束器,其中一路分作为本振光,一部分激光经过声光调制器(AOM)移频,连接到马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)调制器,马赫-曾德尔调制器将啁啾信号调制到光信号上。然后通过光纤放大器(OFA)后,由光纤环形器经望远镜发射出去。返回信号光由相同的望远镜和光纤环形器接收。由于激光发射和接收采用同一光路,不仅光路简单、易于调

节,而且光学耦合效率高。回波信号与本振光同时进入相干光电探测器,一般采用平衡探测器^[7],探测器同时检测回波信号光和本振光,从而达到放大回波光信号的目的。从光电探测器输出的电信号是调制到声光调制器信号上的啁啾信号,该信号经过正交信号处理后,再同啁啾信号混频,获得与测量距离成正比的单频率信号,从而在频率上达到脉冲压缩的目的。

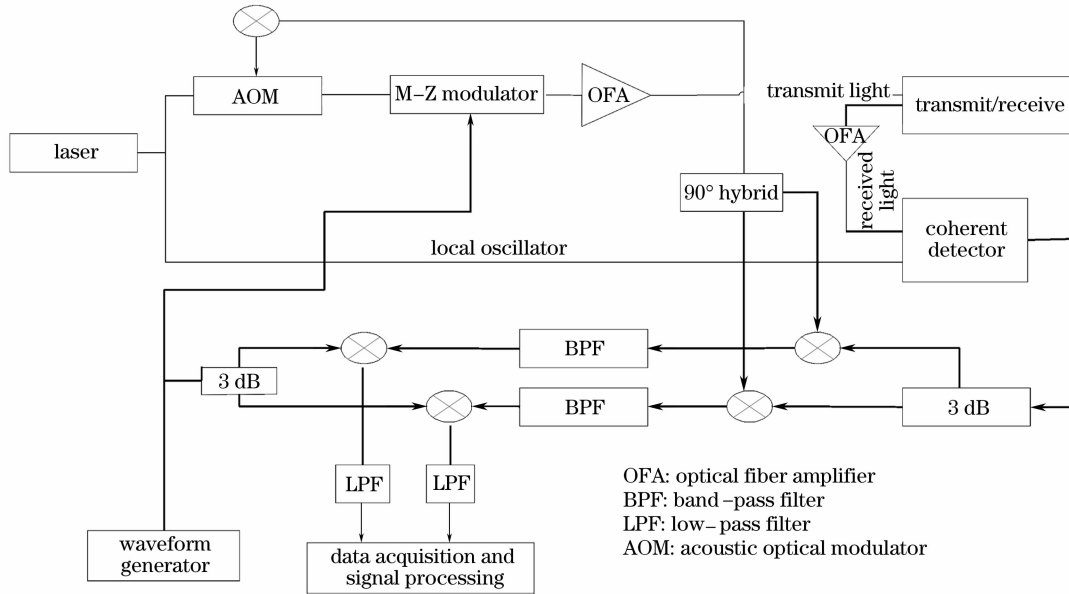


图 1 星载激光相干测高计的原理组成

Fig. 1 Block diagram of space-borne laser altimeter with coherent range detection

根据测量原理,距离信息与最终解调出来的频率 f_r 之间对应关系为

$$f_r = k \frac{2L}{c}, \quad k = \frac{B}{T}, \quad (1)$$

式中 L 为测量距离, c 为光速, B 为啁啾信号带宽, T 为脉冲时间宽度, k 为频率调制速率, 简称为调频速率。因此,只要测量出信号频率 f_r , 就可以推算出目标距离。测量距离的均方误差可表示为

$$\sigma_L = \frac{c}{2B \sqrt{2R_{SN}}} = \frac{c}{2kT \sqrt{2R_{SN}}}, \quad (2)$$

式中 R_{SN} 为信噪比。根据相干激光雷达理论,在本振光足够强的情况下,相干检测后的信噪比为

$$R_{SN} = \frac{R_{esp}^2 P_{sig} P_{lo}}{2B_{rec} [qR_{esp} (P_{sig} + P_{lo}) + 2k_b T_c / R]}, \quad (3)$$

式中 R_{esp} 为光电探测器的响应度, P_{sig} 、 P_{lo} 分别为信号光和本振光的功率, B_{rec} 为探测器带宽, q 为电子电量, k_b 为玻尔兹曼常量, T_c 为温度, R 为探测电路等效电阻。系统接收到的信号光功率可以表示为

$$P_{sig} = \eta_c \eta_{atm} \eta_{sys} P_T G \frac{\pi D^2}{(4L)^2} \rho, \quad (4)$$

式中 η_c 为相干效率, η_{atm} 、 η_{sys} 分别为大气和雷达系统光学透射率, G 为回波信号增益, D 为望远镜口径, ρ 为地面反射率, P_T 为激光发射的平均功率。

回波信号的大小取决于发射功率、接收口径、脉冲宽度、轨道高度等多种因素。光纤放大器的放大自发辐射(ASE)取决于抽运光的大小和光纤的增益,如果回波信号过小而无法抑制放大自发辐射,则可以进一步提高发射功率,可不采用回波光放大,因此将 G 设置为 1。

系统采用脉冲压缩技术,信号脉冲压缩比定义为

$$R_{comp} = \frac{T}{1/B} = BT, \quad (5)$$

将 P_{sig} 代入(3)式,经过相干检测和脉冲压缩后

$$R_{SN} = \frac{R_{esp}^2 P_{lo}}{2B_{rec} [R_{esp} q (P_{sig} + P_{lo})] + 4B_{rec} k_b T_c / R} \times \eta_c \eta_{atm} \eta_{sys} P_T \frac{\pi D^2}{(4L)^2} G \rho m T, \quad (6)$$

式中 m 为带宽常量。经过相干检测和脉冲压缩后的信号在频谱上为单频信号,即把啁啾的宽带信号都

集中到单频信号上,从而大大提高信噪比。模拟结果表明 $m = 2 \times 10^8$ Hz 时,较为符合实际情况。

3 系统参量的优化设计

对于星载激光测高仪,系统的信噪比、空间分辨力和距离精度是影响系统性能的主要参量。由于系统采用调制的连续激光器,其测量重复频率取决于调制的重复频率,因此可以实现非常高的重复频率,根据卫星高度的光速传输时间,可以选择几百至几千赫兹频率,对应的空间分辨力远高于传统的脉冲激光测高仪。

3.1 信噪比

由(6)式可知,系统的信噪比主要取决于系统的参量和脉冲时间宽度。由于受望远镜的尺寸、系统功耗等条件的限制,因此合理优化设计系统参量,对系统的研制至关重要。表 1 列出了系统模拟计算所采用的固定参量,而其他参量由数值模拟后确定。为了简化,尽可能选择高响应率的探测器,目前在 1550 nm 波段主要是 InGaAs 雪崩光电二极管 (APD)。

表 1 系统模拟时固定参量表

Table 1 Fixed parameters of system simulation

Parameter	Description	Value
L	Orbital altitude	400 km
R_{resp}	Responsivity of the detector	9 A/W
η_{atm}	Atmospheric loss factor	0.5
η_{sys}	System loss factor	0.5
η_c	Heterodyne efficiency	0.8
B_{rec}	Bandwidth of the detector	800 MHz
ρ	Target reflectivity	0.1
G	Optical gain for the return optical wave	1
T_c	Temperature	273 K
R	Resistance	50 Ω
f_{AOM}	Frequency shift of the AOM	600 MHz

将表 1 各项参量代入(6)式,整理可得

$$R_{\text{SN}} = \frac{8.63P_{\text{lo}}P_{\text{T}}D^2T}{P_{\text{lo}} + 1.046 \times 10^{-4}} \times 10^4. \quad (7)$$

3.2 测距精度

从(7)式可以发现,当本振功率大于 1 mW 时,分母中 1.046×10^{-4} 可以忽略,这样本振功率 P_{lo} 对信噪比 R_{SN} 产生的影响很小。当本振信号功率大于 1 mW 时,将(7)式代入(2)式,可得距离精度表达式

$$\delta L = \frac{10^6}{2.77kT^{3/2}DP_{\text{T}}^{1/2}}, \quad (8)$$

因受调制器响应速度的限制, k 不可能无限制地提高,根据目前的技术水平,本文 $k = 1$ MHz/ μs 是可

以实现的。

3.2.1 距离精度 δL 等高图

假设望远镜口径 D 为 400 mm,将 k, D 值代入(8),可得

$$\delta L = \frac{1}{1.108 \times 10^6 T^{3/2} P_{\text{T}}^{1/2}}, \quad (9)$$

考虑到星载条件下的功耗以及系统的高重复频率,模拟时发射平均功率 P_{T} 控制在 10 W 以下,脉冲时间宽度 T 控制在 400 μs 以下。在这个限定条件下,距离精度 δL 与脉冲时间宽度 T 以及发射平均功率 P_{T} 的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,距离精度越高,输入功率以及脉冲宽度均要求越大。图 2 中从下至上,距离精度的值是等间隔递减的,但是输入平均功率 P_{T} 和脉冲时间宽度 T 却是呈指数递增的。

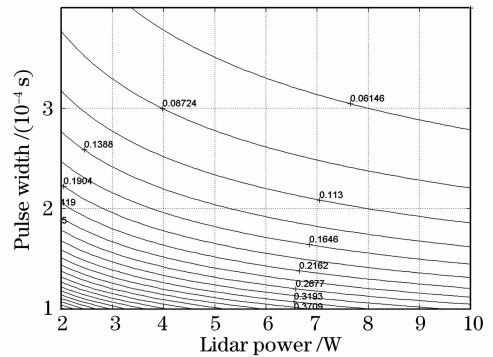


图 2 望远镜口径 $D = 400$ mm 时,不同距离精度下脉冲宽度随激光功率的变化

Fig. 2 Pulse width versus lidar power at different range accuracy under telescope diameter of 400 mm

3.2.2 固定距离精度

系统设计要求的距离精度为 0.15 m。考虑到实现的可能性,望远镜口径 D 的大小需设定在 500 mm 以下。脉冲时间宽度 T 和输入平均功率

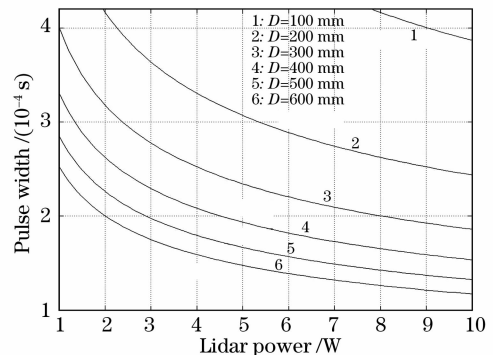


图 3 将距离精度 $\delta L = 0.15$ m,望远镜口径 D 不同时脉冲宽度随激光功率的变化

Fig. 3 Pulse width versus lidar power at different telescope diameters under range accuracy of 0.15 m

P_T , 距离精度 δL 及口径 D 的对应关系:

$$T = \frac{1}{1.97 \times 10^4 \delta L^{2/3} D^{2/3} P_T^{1/3}}, \quad (10).$$

调整口径 D , 为达到 0.15 m 的距离精度, 脉冲时间宽度 T 和输入平均功率 P_T 的关系如图 3 所示。从图中可以看出当 $D < 400$ mm 时, 增加望远镜口径 D 对脉冲宽度 T 及输入功率 P_T 的改善比较显著, 当 $D > 400$ mm 时, 增加望远镜口径 D 对脉冲宽度 T 和输入功率 P_T 的改善并不明显。所以将望远镜口径 D 定在 400 mm。

3.2.3 固定望远镜口径

望远镜口径 $D=400$ mm, 考虑到系统需工作在几百至几千赫兹, 因此将时间脉宽 T 的变化范围设定在 $50 \sim 350 \mu\text{s}$ 。设定时间脉宽 T 的变化步长为 $50 \mu\text{s}$ 。根据(7)式可得到信噪比 R_{SN} 和输入功率 P_T 的关系, 如图 4 所示。图 4 中的各条直线呈射线状分布, 不同时间脉宽 T 时, 距离精度 $\delta L=15$ cm 对应的点以“*”标出。不同时间脉宽 T 时的输入功率必须大于此脉宽 T 下“*”点对应的输入功率, 才能满足系统对距离精度的要求。

从图 4 中可以看出脉冲宽度 $T \geq 200 \mu\text{s}$ 后, 系统对发射功率的要求可以得到满足。

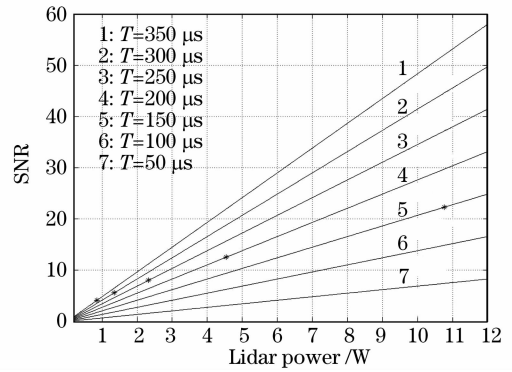


图 4 望远镜口径 $D=400$ mm, 不同脉冲宽度 T 时, 信噪比 R_{SN} 随激光功率的变化

Fig. 4 R_{SN} versus lidar power at different pulse widths under telescope diameter of 400 mm

当望远镜口径 $D=400$ mm, $T=200 \mu\text{s}$, $k=1 \text{ MHz}/\mu\text{s}$ (即啁啾信号带宽 $B=200 \text{ MHz}$), $P_T=5 \text{ W}$ 时, 从相干探测器输出的信号频谱和系统最终解调出来的信号频谱如图 5 所示。从相干探测器输出的信号频谱应该是调制到 f_{AOM} MHz 上的啁啾信号, 而从图 5(a) 中调制的啁啾信号淹没在噪声中。从图 5(b) 中可以看出系统能够清楚地分辨信号对应的频率。对比图 5(a)、图 5(b), 可以充分显现脉冲压缩对信号提取的积极作用。

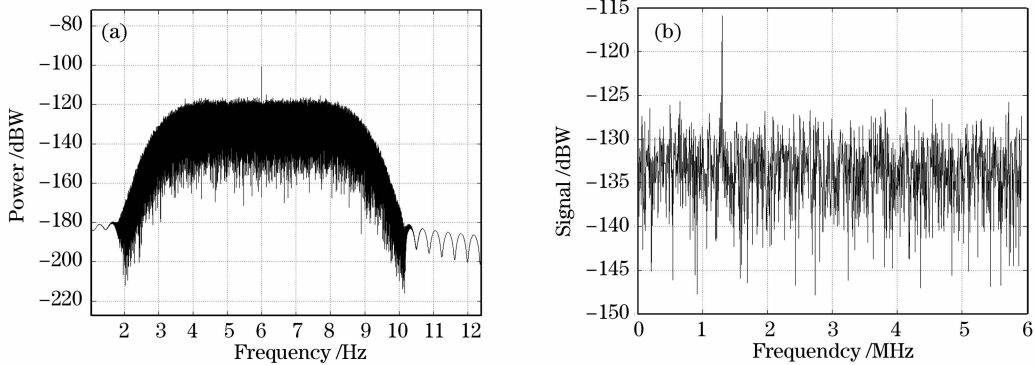


图 5 相干探测器输出信号(a)和最终目标信号(b)的频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of the coherent detector's signal (a) and final target signal (b)

4 结 论

讨论了相干星载激光测高系统的方案, 分析了系统参量与系统信噪比, 距离精度的关系。设计了一套系统参量, 当望远镜口径为 400 mm 时, 啁啾调频速率为 $1 \text{ MHz}/\mu\text{s}$, 脉冲时间宽度 $150 \sim 350 \mu\text{s}$, 发射功率 10 W 左右时, 可实现距离精度小于 15 cm 的星载激光测距。当然, 本文仅仅从理论角度来分析这种方法在星载激光测高中的应用潜力, 诸多假设还是非常理想化的。在实际应用时, 光纤激光器

辐照后的衰减、光学系统的对准误差、大气衰减和湍流的影响都会影响系统的性能。目前 Yb, Er 光纤激光器的输出功率已经大幅提高, 1 m 以上口径的星载望远镜也可实现, 因此可以提高发射和接收的规模来弥补, 从而达到系统的预期性能。

参 考 文 献

1 J. B. Abshire, Xiaoli Sun, H. Riris *et al.*. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: pre-launch and on-orbit measurement performance[C]. *IEEE*, 2003, **3**: 1534~

- 1536
- 2 Stewart Nozette, P. Rustan, L. P. Pleasance *et al.*. The clementine mission to the moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, **266**(5192): 1835~1839
- 3 Robert S. Afzal. Mars observer laser altimeter: laser transmitter [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3184~3188
- 4 John J. Degnan. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements [J]. *J. Geodynamics*, 2002, **34**(3,4): 503~549
- 5 N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba *et al.*. Random modulation cw lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9): 1382~1386
- 6 Kobayashi T, Jiang Shudong. Optical FM heterodyne interferometry for range and displacement measurements [C]. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, 1988. 133~134
- 7 Christopher T. Allen, Sek Ken Chong. Development of a 1319-nm laser radar using fiber optics and RF pulse compression [R]. *Technical Report*, 2002, ITTC-RSL-FY2002-TR-18680-01
- 8 Christopher T. Allen, Yanki Cobanoglu. The design and development of a hybrid RF/laser radar system for measuring changes in ICE surface elevation at arctic regions[R]. *Technical Report*, 2002, ITTC-RSL-FY2002-TR-18680-02
- 9 Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Wang Chunhui *et al.*. Study on ranging signal of pulse coherent laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1081~1083
- 田兆硕,王 骐,王春晖 等. 脉冲相干激光雷达测距信号研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1081~1083
- 10 Jeffrey H. Shapiro. Heterodyne mixing efficiency for detector arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(17): 3600~3606
- 11 Michael J. Kavaya, Sammy W. Henderson, James R. Magee *et al.*. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 776~778
- 12 Guy N. Pearson, P. John Roberts, Justin R. Eacock *et al.*. Analysis of the performance of a coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter applications[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(30): 6442~6450
- 13 Zhao Dong, Liu Liren, Wang Jiming *et al.*. A laser ranging method based on photon statistics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1091~1096
- 赵 栋,刘立人,王吉明 等. 基于光子数目比较的激光测距法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1091~1096
- 14 Zhao Dong, Liu Liren, Wang Jiming *et al.*. Laser ranging by simultaneous switching of transmitting and receiving beams[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 391~395
- 赵 栋,刘立人,王吉明 等. 发射和接收光束同时开关的激光测距法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 391~395
- 15 Guotian He, Xiangzhao Wang, Aijun Zeng *et al.*. Real-time displacement measurement with large range and high accuracy using sinusoidal phase modulating laser diode interferometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 211~214