

文章编号: 1001-3806(2005)06-0645-04

双波长激光测距最佳波长组合的选取

李人东^{1,2}, 张忠萍^{1*}, 杨福民¹, 扈荆夫¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为获得双波长卫星激光测距的最佳波长组合, 考虑了大气效应、接收光电器件的响应、激光器等因素, 从大气改正精度出发, 利用激光雷达方程, 得到了评价波长组合优劣的波长优数公式。分别对倍频和喇曼频移两种技术产生的各种波长组合的波长优数进行计算。分析和讨论了在开展双波长可选波长组合的情况, 为最佳波长的选择提供了一定的依据和标准。

关键词: 双波长卫星激光测距; 大气修正; 波长组合; 波长优数

中图分类号: P225.2 **文献标识码:** A

The selection of optimal wavelength pairs for two-color satellite laser ranging

LI Ren-dong^{1,2}, ZHANG Zhong-ping¹, YANG Fu-min¹, HU Jing-fu¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2 Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to get the optimal wavelength pairs for two-color satellite laser ranging, with the factors including atmosphere effect, the response of the receiver and the laser considered, beginning with the precision of atmosphere correction, based on the lidar equation, the wavelength figure of merit, which can determine whether the pair is selected properly, is obtained. Various figure of merits of the wavelength pairs induced by the technology of harmony and Raman scattering is calculated, the possible wavelength pairs are discussed. Finally the standard and basis for the selection of optimal wavelengths is set up.

Key words: two-color satellite laser ranging; atmosphere correction; wavelength pair; figure of merit

引 言

随着卫星激光测距技术向亚厘米级精度的发展, 大气修正量已成为确定从测站到卫星精确几何距离的主要误差源。尽管用于大气修正的 MariniMurray 模型能达到 1cm 左右的精度^[1], 但是, 为了得到更高的毫米级的大气修正精度, 卫星激光测距系统需要工作在双波长测量模式。

双波长卫星激光测距采用大气色散差的方法来修正大气延迟。利用两个波长的激光对同一个目标卫星进行测量, 通过两个波长在待测距离上的往返时间之差, 给出大气修正值^[2]: $C = R_g - R_{01} = \frac{yc}{2} (\tau_1 - \tau_2)$ 。其中, R_g 为卫星几何距离值, R_{01} 为波长 λ_1 的卫星距离测量值, c 为光速, τ_1 和 τ_2 分别是测距波长 λ_1 和 λ_2 的往

返时间。在适当的湿度下, 对于给定的波长, $\gamma = \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}$, 其中, $f(\lambda)$ 为大气色散函数: $f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$ 。

通过色散函数, 利用大气修正值公式, 双波长修正大气延迟不再需要测站表面大气参数和大气模型, 只需测量结果本身即可修正大气延迟。

由此可知, 大气延迟精度决定于两波长往返时间之差 $\tau_1 - \tau_2$ (这决定于计时设备的精度) 以及所选波长组合的大气色散差。在波长选择的过程中, 还应考虑所选波长的大气透过率、光电接收设备对激光的响应、目前具备的能满足卫星激光测距的激光器等。所以, 波长组合的选择是一项综合性工作, 决定了双波长卫星激光测距能力和测距精度。作者从双波长卫星激光测距的大气修正精度出发, 利用激光雷达方程, 得到了评价波长组合优劣的波长优数公式, 并对目前双波长卫星激光测距中使用较多的倍频和喇曼频移两种非线性光学技术产生的波长组合的优数进行计算, 依据计算结果分析和讨论了最佳波长的选取及波长组合方式, 为双波长卫星激光测距的波长选择提供了依据和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10373022)

作者简介: 李人东 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事双波长卫星激光测距的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: slr2003@yahoo.com

收稿日期: 2004-08-17; 收到修改稿日期: 2004-09-21

标准。

1 波长组合选取的考虑因素

1.1 大气效应对波长组合的影响

对于双波长卫星激光测距波长的选取,除考虑大气对所选波长的透过率影响,还要考虑两个波长的大气色散差、噪声放大率等因素。

(1)激光的大气透过率。激光在大气中的透过率直接影响测距的能力,选择的波长经过大气的衰减之后应仍有很强的回波到达光电接收器件。在能见度 $V=60\text{km}$ 、可降水厚度为 2cm 、天顶角 θ_{zen} 为 $0^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ 时大气透过率随波长的变化如图 1 所示。在选择测距波长时,应该尽量避免落入大气水汽吸收峰,如 $0.75\mu\text{m}$ 左右, $0.93\mu\text{m}\sim 0.95\mu\text{m}$ 以及超过 $1.1\mu\text{m}$ 的波段,否则会使回波信号减弱甚至畸变,影响激光测距的精度和测距能力。

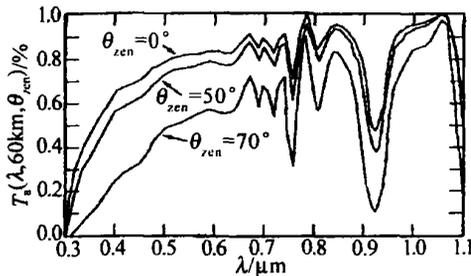


Fig 1 Atmospheric transmission as a function of wavelengths at different zenith angles

(2) 两波长之间的大气色散差。大气改正要求两个波长之间有较大的色散差异,来降低对两波长回波时间差测量的精度要求。在近紫外区域,色散函数较大,所以一个测距波长可以选在该区域。

(3) 大气色散差还对双波长激光测距的噪声放大率产生影响,双波长测距的噪声放大率可以写作^[2]:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_0} = \sqrt{\left[\frac{f(\lambda_2)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} \right]^2 + \left[\frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} \right]^2} \quad (1)$$

式中, σ_a 代表双波长测量精度, σ_0 为波长 λ_1 和 λ_2 的测量精度(设 λ_1 和 λ_2 同等精度)。方程左边表示测量噪声放大率,波长组合的噪声放大率对测距精度有放大的效应,在可选的波长组合内,色散差异大的两波长组合的噪声放大率小。

1.2 光电接收器件

在双波长卫星激光测距中,要求接收回波信号的光电器件工作在光子计数方式且光电转换的游动时间在皮秒量级。目前,卫星激光测距中大多采用单光子雪崩二极管 SPAD 和光电倍增管 MCP-IMT 两种,因此,选定的两波长应该对光电器件响应均匀,且有较高量子效率。

1.3 产生双波长的激光器

在卫星激光测距领域,一般采用能够获得高峰值功率以及窄脉宽的固体激光器,比较常见的有 Nd:YAG 激光器以及钛宝石激光器。工作在双波长激光测距状态下的波长组合常由非线性光学技术来产生的同步到皮秒量级的激光。利用光学介质在强辐射场下的非线性光学效应产生固体激光器不能直接产生的频率,包括光倍频效应和受激喇曼散射效应^[4,5]。

用倍频晶体获得双波长激光是常用的手段,其产生方法简单、且输出的能量能满足卫星测距要求,产生的谐波的脉宽也比基波更窄。对使用 Nd:YAG 激光器的激光测距系统,一般不采用高于四倍频的激光,其大气透过率低,而且光电接收器件对它响应较差。因此,在倍频情况下,可以选取:基频/二倍频、基频/三倍频、二倍频/三倍频等波长组合。

喇曼散射也是一种获取双波长激光器的手段。在喇曼散射中,当入射光光强达到一定阈值时,散射光将具有受激性质,发生受激喇曼散射,从而产生相对原频率的一个固定的频移,对不同的喇曼介质有不同的频移量,可以得到多种固体激光器不能直接发射的波长^[5]。在喇曼频移的情况下,利用能量较大的一阶斯托克斯散射光和一阶反斯托克斯散射光,可以选取:抽运光/一阶斯托克斯光、抽运光/一阶反斯托克斯光、一阶斯托克斯光/一阶反斯托克斯光等波长组合。

2 双波长的波长优数及其波长组合的讨论

为了衡量双波长激光测距中各种波长组合的优劣,以及其对测距精度的影响,从大气修正值公式出发,利用激光雷达方程,可以得到波长优数的公式。由大气修正值公式可知,大气修正值 C 的精度为^[6]:

$$\sigma_c = \frac{\gamma C}{2} \sqrt{\frac{\tau_{p1}^2}{n_1} + \frac{\tau_{p2}^2}{n_2}} \quad (2)$$

式中, τ_{p1} 与 τ_{p2} 分别代表光波 λ_1 和 λ_2 的脉宽, n_1 与 n_2 分别是回波中的光电子数。设基频光脉宽是 τ_p , 则:

$$\sigma_c = \frac{\gamma C \tau_p}{2} \sqrt{\frac{1}{\beta_1^2 n_1} + \frac{1}{\beta_2^2 n_2}} \quad (3)$$

式中, $\beta_1 = \tau_p / \tau_{p1}$, $\beta_2 = \tau_p / \tau_{p2}$ 。

将雷达测距回波方程写为^[7]:

$$n_{pe} = R(\lambda) \frac{hc}{\lambda c} \left(\frac{E_0}{h\nu} \right) \frac{4\pi A_t}{\lambda^2} g_t \rho \frac{4\pi A_{cc}^2}{\lambda^2} \times T_a^2 T_c^2 \left(\frac{1}{4\pi R} \right)^2 A_r \eta_t \eta_r \quad (4)$$

式中, E_0 为基频光的能量, T_a 是单程的大气透过率,它是波长和仰角 E 的函数, $R(\lambda)$ 是探测器的光谱响应度,其余各参数见参考文献 [7]。将方程中除能量外

与波长无关的量用一个系数 k 表示,有:

$$\eta_{pe} = kE_0 \frac{R(\lambda) T_a^2(\lambda, E)}{\lambda^4} \quad (5)$$

用 η_1, η_2 表示获得两个波长激光的能量转换效率,并将 (5) 式代入 (3) 式可得:

$$\frac{1}{\sigma_c} = \frac{2}{c\tau_p} \frac{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}{f(\lambda_1)} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda_1^4}{\eta_1 \beta_1^2 R(\lambda_1) T_a^2(\lambda_1, E)} + \frac{\lambda_2^4}{\eta_2 \beta_2^2 R(\lambda_2) T_a^2(\lambda_2, E)}}} = \frac{2 \sqrt{kE_0}}{c\tau_p} F(\lambda_1, \lambda_2, E) \quad (6)$$

式中, $F(\lambda_1, \lambda_2, E)$ 为波长优数:

$$F(\lambda_1, \lambda_2, E) = \frac{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}{f(\lambda_1)} \times \left[\frac{\lambda_1^4}{\eta_1 \beta_1^2 R(\lambda_1) T_a^2(\lambda_1, E)} + \frac{\lambda_2^4}{\eta_2 \beta_2^2 R(\lambda_2) T_a^2(\lambda_2, E)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$F(\lambda_1, \lambda_2, E)$ 是一个与波长 λ 、仰角 E 、激光转换效率 η_1, η_2 、脉宽比率及光电探测器的灵敏度有关的量。 $F(\lambda_1, \lambda_2, E)$ 值越大,大气延迟修正精度也越高。 β_1, β_2 分别是与脉冲宽度有关的量,取决于产生第 2 个脉冲的非线性效应。 η_1, η_2 分别表示获得两个波长激光的能量转换效率。对于确定的大气单程透过率函数 $T_a(\lambda, E)$,两个波长的产生方式(如基频光,二倍频光;二倍频光,三倍频光等)以及光电接收器件对波长组合的响应 $R(\lambda)$,波长优数 F 可以衡量双波长激光测距中各种波长组合的优劣,它的大小直接反映测距精度。

应用以上得到的波长优数表达式,以 SPAD 作为回波的接收探测器,分别对倍频技术和喇曼技术两种模式进行了波长优数的计算,分析和讨论了最佳波长的获取条件,并对倍频和喇曼两种技术所获得的波长组合的优数进行比较。

(1) 利用倍频技术选取双波长组合的波长优数。对二倍频或三倍频组成的双波长激光系统,典型的激光能量转换值取 $\eta_{sh} = 0.5$ 或 $\eta_{sh} = 0.2$ 。在仰角 E 为 20 和 90 的时候,得到倍频技术产生的波长组合的优数图,见图 2、图 3。

图 2 和图 3 是在基波 二倍频、基波 三倍频、二倍频 三倍频三种波长组合方式,仰角为 20 和 90 的情况下,波长优数随基频光的变化情况。从图中可知,基波 二倍频有最大的波长优数 F ,其最大值为 22。其中,基波在 0.8 μm 附近的基波 二倍频的波长组合 0.85 $\mu\text{m}/0.42 \mu\text{m}$ 有最大的波长优数。在能满足卫星激光测距的激光器中,钛宝石激光器的基波在此附近,但该激光器价格昂贵,不易采用。随着高度的降低,紫

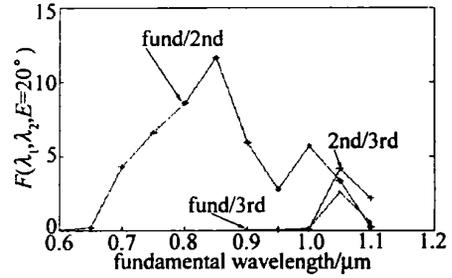


Fig 2 Figure of merits for fundamental/the second harmonic, fundamental/the third harmonic and the second/the third harmonic wavelength pairs ($E = 20^\circ$)

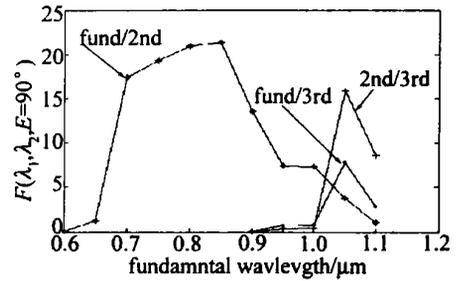


Fig 3 Figure of merits for fundamental/the second harmonic, fundamental/the third harmonic and the second/the third harmonic wavelength pairs ($E = 90^\circ$)

外区的大气衰减开始占主导,因此,波长优数的最大值开始向长波方向移动,并且优数减小。对于常用的 Nd:YAG 激光器,由图可知,在 Nd:YAG 的基波 1.064 μm 处,二倍频/三倍频 (0.532 $\mu\text{m}/0.355 \mu\text{m}$) 的组合有最大的波长优数,是较好的选择。对于其它仰角的情况,能得到类似的结论。

(2) 利用喇曼频移选取波长组合,计算各波长组合的波长优数。在喇曼频移所产生的波长组合下,采用 SPAD 作为回波接收器件,在仰角为 20 和 90 的时得到的波长组合的优数图,见图 4 和图 5。

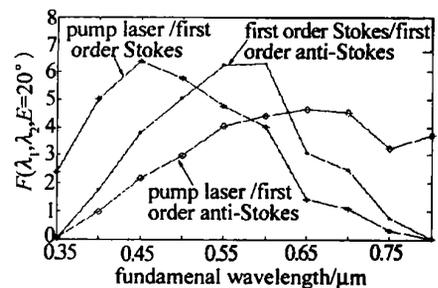


Fig 4 Figure of merits for Raman systems operating at $E = 20^\circ$

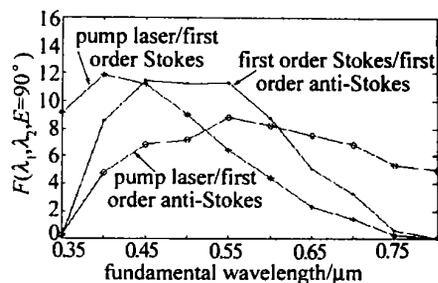


Fig 5 Figure of merits for Raman systems operating at $E = 90^\circ$

图4和图5是用 $0.35\mu\text{m}\sim 0.8\mu\text{m}$ 波长范围内的激光抽运喇曼盒中的高压 H_2 气,产生受激喇曼散射,在喇曼频移产生的抽运光 ν -一阶斯托克斯光,抽运光 ν -一阶反斯托克斯光,一阶斯托克斯光 ν -一阶反斯托克斯光组合,仰角为 20° 和 90° 的情况下,计算出波长优数随抽运光波长的变化。从图5中可以看出,在基波为 $0.4\mu\text{m}$ 左右,选用一阶斯托克斯光 ν -一阶反斯托克斯光的波长组合具有最大的波长优数12。主要是因为此波长处于紫外波段,有较大的大气色散值,且这种波长组合有较大的色散差,但目前还没有合适的基波在 $0.4\mu\text{m}$ 的激光器用于激光测距中。当用Nd:YAG的二倍频光 $0.532\mu\text{m}$ 去抽运喇曼盒中的高压 H_2 气时,3种波长组合中一阶斯托克斯光 ν -一阶反斯托克斯光的波长组合有较大的波长优数,是较好的选择。从图中可以看出,3种波长组合都是在 $0.5\mu\text{m}$ 附近有较大的波长优数,因此,对于采用Nd:YAG倍频光($0.53\mu\text{m}$)作为抽运光、单光子雪崩二极管SPAD作为接收器件的卫星激光测距系统来说,喇曼技术是一种十分有前途的选择方案。

比较倍频和喇曼频移两种非线性光学技术产生的波长组合的优数,当仰角 $E=90^\circ$ 时,对于常用的Nd:YAG激光器(其基波波长为 $1.064\mu\text{m}$),其各种谐波的波长组合的优数大约从 $3.5\sim 16$,对于采用Nd:YAG倍频光($0.53\mu\text{m}$)作为抽运光的喇曼频移产生的波长所组成的波长组合的优数为 $6.5\sim 11.6$ 左右。

(上接第640页)

4 结论

利用波片延迟量对入射倾角的敏感性所设计的Lyot双折射滤光片具有较好的可调性,可调范围比较宽。对于单级Lyot可调滤光片来说,它的通带半宽度较大,这是其最大的缺憾,如果希望得到较窄的带宽,必须采用多级的办法来实现。

感谢宋连科老师和郝殿中老师在实验和数据处理中给予的帮助。

喇曼频移出的波长和抽运光波长分开较小,其色散差异不大,故波长优数略小,但综合测距能力等因素考虑,喇曼技术是一种十分有前途的选择方案。

3 结论

在双波长卫星激光测距中,波长组合的选择是关键,对于双波长激光测距的精度提高有直接的影响。计算表明,倍频技术产生的波长组合具有较大的波长优数,但综合测距能力等因素考虑,喇曼技术是一种十分有前途的选择方案。在所有的波长选择原则中,应综合考虑各个因素,并结合测站的实际设备情况,选出最佳的波长组合。

参考文献

- [1] OWENS J C. Optical refractive index of air dependence on pressure [J]. *Temperature and Composition*, 1967, 6(1): 51~58.
- [2] GREENE B A. Multiple wavelength laser ranging [J]. *Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, 1994, 3: 581~591.
- [3] ABSHRE J B. Pulsed multi-wavelength laser ranging system for measuring atmospheric delay [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(20): 3436~3440.
- [4] 克希耐尔 W, LOTSCH H. 固体激光工程 [M]. 5版,北京:科学出版社,2002. 564~572.
- [5] 蓝信钜,姚建铨,宁继平 *et al* 激光技术 [M]. 北京:科学出版社,1999. 252~259.
- [6] NOOMEN R, KLOSKO S, NOLL C. Multi-wavelength tracking [M]. Washington: International Laser Ranging Service, 2002. 18~20.
- [7] DEGNAN J J. Optimum wavelengths for two color ranging [M]. Maryland: International Laser Ranging Service, 1992. 7-1~7-14.

参考文献

- [1] 庞岩涛,李国华,梁志霞. Lyot型双折射调谐滤光片特性研究 [J]. *光电子·激光*, 2000, 11(4): 167~169.
- [2] 梁志霞. 双折射滤光片特性参数研究与优化设计 [D]. 曲阜:曲阜师范大学,1999. 4~7.
- [3] 云茂金. 液晶调谐滤光片的设计与测试 [D]. 曲阜:曲阜师范大学,2002. 3~5.
- [4] 赵建林. 高等光学 [M]. 北京:国防工业出版社,2003. 106~107.
- [5] 李国华,肖胜安. 波片的相位推迟对入射角的依赖关系 [J]. *曲阜师范大学学报*, 1988(4): 58~62.