

文章编号: 1000-8349(2005)02-0099-00

双波长卫星激光测距

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: 双波长卫星激光测距不必借助大气改正模型, 利用双波长往返时间差就可以进行大气折射改正。采用皮秒级事件计时器等技术测量往返时间差, 修正精度可以达到毫米量级。介绍了这一领域的研究进展、双波长大气改正的基本原理, 分析了双波长激光测距的精度, 最后对双波长卫星激光测距前景进行了展望。

关键词: 天文观测设备与技术; 双波长卫星激光测距; 综述; 飞行时间差; 大气改正; 大气模型; 波长组合

中图分类号: P228.5 **文献标识码:** A

1 引 言

卫星激光测距 (SLR) 是上世纪 60 年代中期发展起来的精密空间测量技术。目前其测量精度为亚厘米量级, 是卫星单点测量精度最高的一种技术。各领域科学技术的发展 (如天文地球动力学、空间导航) 都对 SLR 提出了毫米级测量精度的要求^[1]。近年来, 由于光电接收器件、脉冲位置测量技术以及时间间隔测定技术的快速改进, 大气改正和卫星角反射器效应已成为限制 SLR 进一步提高测距精度的主要因素。通过设计高精度的角反射器, 可以较好地解决卫星角反射器效应对测距精度的影响。而大气改正目前仍然通过测定测站地面的大气参数, 利用 Marini-Murray 模型进行修正。Marini-Murray 模型是由美国的 Marini 和 Murray 于 1973 年建立的, 其本身误差为 10 mm 左右^[2]。利用双波长激光测距系统进行卫星激光测距, 可以不再通过模型进行大气改正, 测量结果本身即可修正大气延迟。同时, 采用皮秒级事件计数器 (Picosecond Event Timer, 简称 PET) 等技术测量双波长往返时间差, 大气改正精度有望达到毫米量级, 从而满足毫米级 SLR 系统的要求。

然而, 双波长卫星激光测距技术难度很大, 精度要求也高, 迄今仍处于试验阶段。目前开展这方面研究的国家有: 法国 Grasse 站、奥地利 Graz 站、美国 NASA 的 GSFC 站、瑞士 Zimmerwald 站、意大利 Matera 站以及中国上海天文台等。

收稿日期: 2005-01-27; 修回日期: 2005-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10373022)

2 双波长卫星激光测距概述

2.1 意义及其研究内容

常规卫星激光测距是用单波长进行测距的,大气改正是利用国际组织推荐的模型(如 Marini-Murray 模型),应用测站地面气象参数进行的。这种改正精度受到两种因素的影响:一是输入大气参数的精度对大气模型的影响。比如对目前大多数测站使用的 Marini-Murray 模型来说,温度和相对湿度测量的精度会产生亚毫米级的误差,而 0.1 mBar 的气压测量误差在高度角为 20° 时会产生 2.4 mm 的误差;二是模型本身是静态的、与时间无关的函数,不能反映大气的实际物理情况^[3,4]。James 和 Gardner^[5]在 1985 年研究了横向梯度效应带来的模型误差:在高度角大于 20° 时为 1 cm 左右。另外大气湍流也将引起模型毫米量级的随机波动,在高度角为 10° 时甚至达到几厘米。唯一能够精确得到毫米级精度的激光测距系统应该工作在双波长测距模式,以实现大气延迟的无模型化改正。

与常规单波长激光测距相比,双波长激光测距技术难度大,对测距仪的激光系统、计时设备以及光电探测器等均要求很高^[6]。目前,国际上对双波长激光测距的研究主要在以下几个方面:

(1) 双波长激光系统的研制

在卫星激光测距领域,一般采用能够获得高功率以及窄脉宽的固体激光器,比较常见的有 Nd: YAG 激光器和 Titanium-Sapphire 激光器。工作在双波长激光测距状态下的波长组合常用非线性光学技术产生同步到 ps 量级的激光,而利用光学介质在强辐射场下的非线性光学效应来获得双波长组合,包括光倍频效应和受激 Raman 散射效应^[7,8]。

利用倍频晶体可以获得双波长激光输出,其方法简单且输出的能量能满足卫星测距要求,产生的谐波脉宽比基波窄。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,因其大气透过率低,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。

另外一种获取双波长激光输出的技术是 Raman 散射。用强单色光作为泵浦光入射到介质,当光强(功率)达到一定阈值时,散射光将具有受激性质,发生受激 Raman 散射,从而产生相对原频率的一个固定频移。不同的 Raman 介质有不同的频移量,因此可以得到多种固体激光器不能直接输出的波长。在 Raman 频移情况下,可以选取泵浦光/一阶 Stokes 散射光、泵浦光/一阶 anti-Stokes 散射光、一阶 Stokes 散射光/一阶 anti-Stokes 散射光等波长组合。

(2) 波长组合的选取

由于大气对激光波长色散的非线性响应,不同波长组合得到的色散差异不同,相同测时精度下不同波长组合所得的测量精度也不同。因此,双波长激光测距中波长的选择是关键。Degnan^[9]提出用波长优数来衡量双波长测距精度和能力。上海天文台对双波长卫星激光测距最佳波长组合的选取进行了理论分析,从双波长卫星激光测距的大气修正精度出发,考虑波长组合的大气色散、大气透过率、探测器的量子效率、非线性光学效应转换率、光束的发散角,以及目前具备的能满足卫星激光测距的激光器等因素,给出了目前双波长卫星激光测距中使用较多的倍频和 Raman 频移两种非线性光学技术产生的波长组合的优数。对于 Nd: YAG 激

光器倍频情况, 选取二倍频 / 三倍频 (532 nm/355 nm) 的波长组合构成双波长激光系统有较大的波长优数, 但 355 nm 是不可见光, 给调整带来了很大困难, 同时其大气透过率较低。钛宝石的基频光 / 二倍频 (846 nm/423 nm) 波长组合在整个激光波段中有最大的波长优数, 但钛宝石激光器价格昂贵。对于采用 Nd:YAG 倍频光 (532 nm) 作为泵浦光、单光子雪崩二极管 (Single Photon Avalanche Diode, 简称 SPAD) 作为接收器件的卫星激光测距系统来说, Raman 频移产生的波长和泵浦光波长分开较小, 色散差异不大, 但综合考虑测距能力等因素, Raman 技术仍是一种不错的选择。

(3) 两波长飞行时间差的精确测量

双波长激光测距中, 两波长往返时间差理论上取决于大气折射率与所选两波长的折射率之差。在光波频率范围内, 对不同频率的光波, 其大气色散差别较小。因此, 双波长激光测距系统对两个波长的飞行时间差 (Differential Time Of Flight, 简称 DTOF) 测量精度要求很高^[10,11]。一般来说, 对 Nd: YAG 激光器的基频光和倍频光 1064 nm/532 nm 的波长组合, 在天顶时必须用 ps 级计时器进行测量才能达到毫米级测距精度的要求。另外由于接收光电器件的带宽、反射器对激光脉冲的展宽以及卫星效应的存在^[12,13], 精确测定 DTOF 具有相当大的难度。美国的 GSFC 站曾分析了一系列双波长卫星测距的回波波形, 发现两个波长的回波波形不相关, 因此也不能利用卷积方法来计算 DTOF。为了使 DTOF 的测量达到 ps 级精度, 可以使用多次平均的方法以降低卫星效应等对回波时间差的影响。此外可选一些对双波长激光测距较为适用的低轨卫星 (LEO), 它们产生的回波可以近似看作是由单个角反射器产生的, 从而可提高 DTOF 的测定精度。

双波长激光测距的研究还包括发射和接收光路的设计、接收光电器件的设计等。在设计双波长激光测距系统时, 还必须考虑角反射器对激光脉冲展宽, 以及波形畸变带来的影响等。

2.2 国内外研究进展

1965 年 Bender 和 Owens 首先提出用双波长脉冲激光测距技术进行大气改正的建议, 但由于当时卫星激光测距本身精度不高, 这一建议没有引起重视。1980 年 James^[14] 再次提出多波长脉冲激光测距修正大气延迟方法, 指出双波长大气延迟修正精度若要达到亚厘米量级, 脉冲回波时间差的测量精度必须达到 3~8 ps 量级, 由此开始了多波长卫星激光测距的实用研究。双波长激光调制回波的相对相位测量可以知道大气延迟量, 进而修正大气延迟误差。但它不适用于脉冲式卫星激光测距, 因为卫星离地面距离远且运动快, 无法用连续调制测相方法。随着脉冲激光测距技术的成熟以及毫米级测距精度的提出, Graz 等站在原有设备的基础上采用不同的波长组合方式和各种接收光电器件, 对双波长脉冲激光测距展开了研究。

在双波长激光测距试验中, 大多直接选用 Nd: YAG 基频光 1064 nm 及其二倍频光或三倍频光作为测距激光, 两个光电接收器件独立接收回波信号。Veillet 和 Schreiber^[15] 选择 Nd: YAG 基频光 1064 nm 及其二倍频光 532 nm 的波长组合, 用工作在雪崩状态下的光电雪崩管接收红外基频光, 微通道板光电倍增管 (Micro-Channel Plates, 简称 MCP) 接收倍频绿光, 研究了大气色散规律。由于这两波长均由激光器直接输出, 较容易得到双波长激光。但该实验采用了不同的光电器件分别接收不同波长的回波, 给 DTOF 的测量带来不确定的时间游动, 限制了观测精度。其次, 这种波长组合的大气色散差异不大, 单位长度上双波长脉冲时差较小, 对 DTOF 测量要求很高。为了消除不同光电器件带来的时间游动影响, Zagwodzki 等人

[16] 选择色散差异更大的二倍频光 532 nm 和三倍频光 355 nm 的波长组合, 用两个 MCP 分别接收两个波长的回波。卫星实测在 NASA 哥达德飞行中心进行。对 Ajisai 卫星的观测表明, 双波长测量的大气延迟与模型计算值在 $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 高度角范围内没有明显差别。虽然此波长组合的大气色散差异较大, 但三倍频光在大气中传输能量损失也大, 回波信号相对较弱。

钛宝石的基频光 / 二倍频 (846 nm/423 nm) 波长组合在整个光波波段有最大的波长优数, 是双波长卫星激光测距试验较好的选择。Braakman 等人 [17] 利用这种双波长激光系统, 在德国 TIGO (Transportable Integrated Geodetic Observatory) 大型流动站进行了卫星激光测距实验, 取得了一批观测资料。1997 年, 瑞士 Zimmerwald 站装备了钛宝石激光器, 并采用半导体激光泵浦 Cr:LiSAF 主动锁模振荡器, 后经 Nd: YAG 调 Q 激光器泵浦的 Ti:Sapphire 再生放大级和二级多通放大级 [18]。它输出激光的波长为 846 nm 和 423 nm, 脉宽 50~100 ps, 脉冲能量 30~50 mJ, 重复率达 10 Hz。其中 846 nm 蓝光回波用带补偿的单光子雪崩二极管 (C-SPAD) 接收, 423 nm 光的回波用 MCP 接收。实测结果表明, 这一系统对 Lageos 单次测距精度在 1.8~2.6 cm。由于钛宝石激光器价格昂贵, 目前仅少数试验采用此双波长激光系统。

构成双波长激光系统另外一种常用的方法是利用 Raman 效应输出多波长激光。Gaignebet 等人 [19] 利用 Nd: YAG 激光的倍频光 532 nm 泵浦高压 H_2 , 产生受激 Raman 频移光 683 nm 的红光。他们选择 532 nm/683 nm 的波长组合, 以条纹相机作为接收系统, 在地面进行了大气延迟实验, 对室外 110 m 处的反射器进行测距, 并用室内 2 m 处的反射器校准, 最后得到大气延迟为 (5.6 ± 5.2) ps 的计算结果, 与理论结果相符。奥地利 Graz 站用 532 nm 的绿光泵浦高压 H_2 产生 Raman 频移光 [20~22]: 683 nm 红光与 436 nm 蓝光, 组成多波长激光测距系统, 并用 SPAD 作为接收器件 [23], 对 Lageos 等卫星进行了观测。它的 DTOF 测量精度为 7 ps 左右, 地靶精度对 683 nm 红光为 8.4 mm, 对 432 nm 蓝光为 7.9 mm。该系统由计算机控制交替发射双色波长激光, 利用同一个光电接收器单一通道接收回波。这种方法光路简单, 勿需采用发射、接收分光技术。但其缺点是不能同步发射两色激光, 测得的大气改正值亦非实时, 也不是严格同一天区的, 而是一段较长时间的平均值。

2001 年中国科学院上海天文台与捷克技术大学合作, 研制了用于多波长卫星激光测距的 Raman 激光系统。该系统用 Nd: YAG 主被动锁模激光器输出的 532 nm 绿光 (脉冲能量 35 mJ, 脉宽 35 ps) 泵浦特制的 1 m 长 Raman 盒中的高压 H_2 , 对一阶频移光的转换效率与光束的空间特性进行研究。结果得到一阶 Stokes 光 (683 nm): 7 mJ (单脉冲), 光束发散角 $40''$, 空间抖动角小于 $4''$; 一阶反 Stokes 光 (432 nm): 2 mJ (单脉冲), 光束发散角 $56''$, 空间抖动角小于 $4''$ 。出射光中还有 532 nm 绿光: 10 mJ (单脉冲), 光束发散角 $40''$, 空间抖动角小于 $7''$ [24]。2003 年 7 月, 利用 532 nm 及其在高压 H_2 中的 Raman 频移光 683 nm 组成双波长激光器, 上海天文台建立了国内首个同时发射和同时接收的双波长激光测距系统, 先后对 Beacon-C、Ajisai、Topex、Starlette 等卫星进行了双波长测距试验, 获得了一批结果。该系统采用两个独立 SPAD 分别接收 683 nm 和 532 nm 回波信号, 并由计算机采集 SR620、HP5370 计时器记录的两个波长的测距值。图 1 是上海天文台双 / 多波长激光测距的分光发射系统光路图。

目前世界上有几个激光测距站通过以下方法进行双波长卫星激光测距实验 [25]:

(1) GSFC、TIGO、Graz、Zimmerwald、EOS Australia、Grasse 及上海天文台等站采用

低重复率激光器、高信噪比的光电倍增管 (Photo-Multiplier Tubes , 简称 PMT) 或 SPAD 作为接收器件;

(2) Wettzell 等站采用低重复率激光器、条纹相机作为接收器件;

(3) Graz 等站采用多于两个波长的系统进行卫星激光测距。

为了适应双波长卫星激光测距发展, 2003 年春天, 国际激光测距服务 (ILRS) 工作组确定了双波长激光测距的资料组成形式。Zimmerwald 作为国际上第一个站, 开展了日常的双波长激光测距, 并向 ILRS 数据中心发送双波长资料。随后, TIGO 站和意大利的 MLRO (Matera Laser Ranging Observatory) 站先后开展了双波长激光测距, 并向国际数据中心提供两波长独立观测的标准点数据和完整的原始点数据。然而上述站目前还没有提供双波长延时差数据, 这通常由应用资料的科技人员根据精度要求采用不同方法产生。在双波长资料应用方面, 意大利的 Luceri 和美国的 Pavlis 开展了一些工作^[26]。Luceri 利用 MLRO 站双波长测量数据得到的延时差和对流层模型计算得到的延时差数据进行分析表明, 2003 年提出的 Mendes-Ciddor 模型比 Marini-Murray 模型精度更高。Pavlis 则利用 Zimmerwald 和 TIGO 站的双波长数据对大气模型进行了研究。

图 1 上海天文台双 / 多波长分光发射激光系统光路

上海站利用其 2003 年 7 月的双波长激光测距数据, 通过平均和差分方法处理了卫星的双波长测距资料, 并与 Marini-Murray 大气改正模型进行比较, 发现在目前测量精度下, 两者的趋势基本一致, 没有明显差别^[27]。

3 双波长激光测距的大气改正原理

双波长卫星激光测距基本原理如图 2 所示。

双波长卫星激光测距是利用两个波长的脉冲激光同时测量一个目标卫星, 通过两个波长在待测距离上的往返时间及两者之差, 给出测量值与修正值:

$$R_g = R_{01} + \frac{c}{2} \cdot \gamma \cdot (\Delta\tau), \quad (1)$$

式中 R_g 为卫星几何距离值; R_{01} 为单波长 λ_1 的卫星距离测量值; c 为光速; $\gamma = \frac{n_{\lambda_1} - 1}{n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}}$, n_{λ_1} 和 n_{λ_2} 分别为双波长的大气群折射率; $\Delta\tau$ 为双波长测距往返时间差。在适当湿度下, 对于给定波长, γ 的一阶近似表达式可写成如下形式^[29]:

$$\gamma = \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}, \quad (2)$$

式中, $f(\lambda)$ 为大气色散函数, 其表达式为

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}. \quad (3)$$

通过色散函数, 利用 (1) 式, 双波长修正大气延迟不再需要测站表面大气参数值和大气改正模型, 只需测量结果本身即可修正大气延迟。

图 2 双波长卫星激光测距的基本原理^[28]

4 双波长激光测距的系统设计和精度分析

4.1 系统设计

国际上一般采用两种方法来构建双波长激光测距系统: 测距差分平均 (Average Range Difference, 简称 ARD) 方法和平均距离差分 (Difference Average Range, 简称 DAR) 方法。ARD 方法构建的双波长激光测距系统的观测量是 DTOF。一般由一个高精度计数器获取 DTOF, 另外一个计数器记录测距值, 然后对 DTOF 资料直接平均, 求得大气延迟量。DAR 方法构

建的双波长激光测距系统采用两个独立的计数器分别测量两个波长的回波, 得到两个波长的测距值, 并通过在一段时间内对两个波长测距值资料做标准点来提高精度, 最后求得对应同一时刻的两个波长的标准点之差, 来获得大气延迟量^[30,31]。

在硬件和软件设计方面, 这两种方法构建的双波长激光测距系统有以下几方面的区别:

(1) ARD 方法构建的系统要求计数器对 DTOF 的测量达到 ps 量级精度, 但对另外一个计数器则没有这么严格的要求; 而 DAR 方法构建的系统对两个计时设备的要求都较高, 同时两个波长各自的回波必须足够多且本身精度高。

(2) ARD 方法构建的系统的测量精度 $\sigma_{\Delta\tau} = \sigma_{\Delta\tau} / \sqrt{n}$, 其中 $\sigma_{\Delta\tau}$ 是单次测量精度; 而对于 DAR 方法构建的系统, 由于分别处理两个波长的观测数据, 所以它的总体精度 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, 其中 σ_1 和 σ_2 分别是两个波长的测距精度。

(3) ARD 方法构建的系统需要两个测距波长在同一时刻有接收的回波。因此, 如果回波中波长为 λ_1 的数据概率为 n_1 , 波长为 λ_2 的数据概率为 n_2 , 则同时获得两个波长的回波概率为 $n_1 n_2$, 其概率大大降低。在实际测距中, 由于要把回波信号分成两路, 一路作为测距值, 另一路用来测量 DTOF, 则同时获得两个波长回波的概率更低; 而 DAR 方法构建的系统并不严格要求同一时刻都有回波。

4.2 精度分析

双波长激光测距精度依赖单波长的测量精度、双波长回波时差测量精度和双波长大气色散差异等因素。对于采用 ARD 方法构建的双波长测距系统^[32], 由 (1) 式可以得

$$\sigma_{R_g}^2 = \sigma_{R_{01}}^2 + \left(\frac{c}{2} \cdot \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} \right)^2 \sigma_{\Delta\tau}^2, \quad (4)$$

图 3 双波长几何测量精度与双波长时差测量精度关系^[31]

其中 σ_{R_g} 为几何距离标准偏差, $\sigma_{R_{01}}$ 为单波长测距标准偏差, $\sigma_{\Delta\tau}$ 为双波长时间差测量的标准偏差。双波长几何测量精度与其时差测量精度关系如图 3 所示。图中 3 条曲线分别对应单波长

测量标准偏差 3、4、5 mm，所用双波长为 355 nm/532 nm， $\gamma = f(\lambda_1)/(f(\lambda_2) - f(\lambda_1)) \approx 12$ 。由图可知，如果单波长测距精度为 3 mm，当双波长时差精度达到 3 ps 时，对应的双波长测量精度约为 6 mm。

若对两个波长独立测距，不考虑大气“湿”分量影响，由 DAR 方法构建的双波长测距系统的测量公式为

$$R_g = \frac{f(\lambda_2)R_{01}}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} - \frac{f(\lambda_1)R_{02}}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}, \quad (5)$$

式中 R_{01} 和 R_{02} 为两个波长的测量值，由 (5) 式得双波长的测量精度为

$$\sigma_R^2 = \left[\frac{f(\lambda_2)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} \right]^2 \sigma_{01}^2 + \left[\frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)} \right]^2 \sigma_{02}^2, \quad (6)$$

式中 σ_{01} 、 σ_{02} 分别代表波长 λ_1 和 λ_2 的测量精度。

由方程 (4) 和 (6) 可知，单波长的测量精度被所选波长组合的 γ 因子放大。其中 (4) 式仅对 DTOF 的测量精度放大。为了减少这种影响，可以选择放大因子小的波长组合，或采用精度高的计时器测量 DTOF；而 (6) 式对 σ_{01} 和 σ_{02} 都放大，因此对 R_{01} 和 R_{02} 的测量精度要求很高。表 1 列出了几种选定波长的放大因子。

表 1 波长组合与噪声放大因子

波长组合	$f_d(\lambda_2)$	$f(\lambda_2)$	$f_d(\lambda_2)$	$f(\lambda_1)$
	$f_d(\lambda_2) - f_d(\lambda_1)$	$f(\lambda_1) - f(\lambda_1)$	$f_d(\lambda_2) - f_d(\lambda_1)$	$f(\lambda_1) - f(\lambda_1)$
1.064 μm /0.532 μm	22.27	22.25	21.27	21.25
1.064 μm /0.355 μm	8.43	8.54	7.43	7.54
0.683 μm /0.532 μm	41.64	41.69	40.64	40.69
0.683 μm /0.436 μm	18.62	18.75	17.62	17.75
0.532 μm /0.355 μm	12.95	13.25	11.95	12.25
0.846 μm /0.423 μm	14.01	14.11	13.01	13.11

注： $f_d(\lambda)$ 为“干”分量色散函数。

由表 1 可知，波长色散差异大的波长组合，相应的噪声放大因子小；反之，噪声放大因子大。因此，在相同测量精度下，选用大气色散差异大的波长组合得到的大气改正精度高。

由于双波长测量公式 (1) 和 (5) 的推导过程中都忽略了水汽等对双波长激光测距的影响，从表 1 可以看出，“干”分量的色散因子和考虑“湿”空气时的 γ 因子略有差别，得到的 R_g 与真实几何距离值之间也存在差异。表 2 是推导 (1) 和 (5) 式时可能引入的误差量级估计。

表 2 误差源的影响^[30]

误差来源	σ/mm		备 注
	天顶角 0°	天顶角 70°	
大气简化公式	< 0.3	< 1	所用双波长对： 1.064 nm / 0.355 nm， $P = 1013.25 \sim 900 \text{ mbar}$ ， $T = 293 \sim 273 \text{ K}$
大气中二氧化碳的百分含量	< 0.01	< 0.03	二氧化碳含量变化为 0.03%
水汽分压	≈ 6	≈ 17	大气中有 20 mbar 水汽 (对所选用的双波长对)
光线弯曲	没有误差	< 4	对所有情况
激光波长	≈ 0.3	≈ 1	设所用波长变化为 1 Å

表 2 中两个主要的误差源是水汽分压和大气中的光线弯曲。水汽分压与波长组合的选取关联不大, 因此可直接先从观测数据中扣除, 然后再进行双波长数据的归算。双波长大气改正中存在水蒸气的影响, 为了减小这种影响, 可以采用遥感技术, 以精确得到双波长卫星激光测距中水汽的质量, 其中最常用的办法是 GPS 气象学方法^[32,34]。光线弯曲引起的测距误差, 是因大气折射而发生的光线弯曲和测站与卫星的直线距离之间的偏差。当高度角大于 20° 时, 这项误差很小。另外, 由于脉冲激光器的脉冲形状不很规则, 双波长改正的中心波长将漂移, 也会引入测距误差^[35]。

5 双波长激光测距的展望

鉴于双波长激光测距的重要性, 国际激光测距服务中心专门成立了大气改正专业工作组, 以研究双波长激光测距在大气延迟修正中的应用等。

2004 年 Graz 站率先成功实现了 kHz 激光测距, 这种激光测距系统回波率很高, 并且受脉冲幅度大小的影响较小^[36,37], 标准点测距精度也有很大提高。其次, 基频光 / 二倍频为 846 nm/423 nm 的高重复率激光器已研制成功, 不久将应用于 TIGO 站。可以预见, 这种激光器将对双波长测距产生重要影响。再者, 为了兼顾测距精度和探测概率, 减少反射器分布效应的影响, 毫米级精度的角反射器正在研制中, 这对双波长激光测距研究将十分有利^[38]。另外, 法国研制的 PET 的测时精度为 3 ps, 可以精确测量 DTOF, 大大提高测量精度, 在双波长卫星激光测距中发挥重要作用。

尽管双波长激光测距难度很大, 但随着相应技术的发展, 可以预计未来几年里, 双波长激光测距结果将能直接修正大气延迟, 实现毫米级精度的大气延迟测量。

参考文献:

- [1] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学, 济南: 山东科学技术出版社, 2000: 91~121
- [2] Gardner S, Rowlett R. In: Brower L ed. RRL Publication, No.477, Maryland: RADIO Research LAB., 1976: 1
- [3] Degnan J. In: Bianco G ed. Proceedings of the 12th International Workshop on Laser Ranging, Matera: ASI, 2000: 18
- [4] Luches B. Opt. Lett., 1987, 12(1), 1987: 33
- [5] James B, Gardner S. IEEE Transaction on Geo-science and Remote Sensing, 1985, GE-23(4): 414
- [6] Samain E, Gibbs P. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 21
- [7] Koechner W, Lotsch H. 固体激光工程, 北京: 科学出版社, 2002: 564~572
- [8] Ferrario A. In: Luck J ed. Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging, Australia: Australia Government Publisher Service, 1994: 499
- [9] Degnan J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 7-1
- [10] Im K E, Gardner S. In: Kwaitong E ed. Electro-Optic System Report, No.85-002, Maryland: Electro-Optic System Lab., 1985: 1
- [11] 陈千颂, 杨成伟, 潘志文等. Laser & Infrared, 2002, 32(1): 7

- [12] Hamal K. In: Prochazka I ed. Proceedings of Photonics, No.458, Prague: Czech Technical University, 2002: 1
- [13] 范建兴, 杨福民, 陈启秀. 中国科学 (A 辑), 2001, 31(1): 63
- [14] James B. Appl. Opt., 1980, 19(20): 3436
- [15] Veillet C, Schreiber U. In: Degnan J ed. Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 261
- [16] Zagwodzki W, McGarry F, Degnan J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 7-15
- [17] Braakman H, Kraan V, Visser H *et al.* In: Luck J ed. Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging, Australia: Australia Government Publisher Service, 1994: 407
- [18] Gurter W, Pop E, Utzinger J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 41
- [19] Gaignebet J, Hatat J, Louis J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 1
- [20] Prochazka I, Hamal K, Jelinkova H. In: Degnan J ed. Proceedings of 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 7-52
- [21] Kirchner G. In: Luck J ed. Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging, Australia: Australia Government Publisher Service, 1994: 609
- [22] Kirchner G, Koidl F, Prochazka I *et al.* In: Wolfgang S ed. Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Frankfurt: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 521
- [23] Prochazka I. In: Degnan J ed. Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 5-31
- [24] 扈荆夫, 杨福民, 张忠萍等. 中国科学 (G 辑), 2004, 34(6): 711
- [25] Cinzia L. In: Bianco G ed. Proceedings of the 12th International Workshop on Laser Ranging, Matera: ASI, 2000: 19
- [26] Cinzia L, Degnan J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 18
- [27] Greene B. In: Yang Fumin ed. Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1996: 477
- [28] Hamal K, Prochazka I. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 10
- [29] Owens C. Appl. Opt., 1967, 6(1): 51
- [30] Greene B, Herring T. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 58
- [31] Stefan R. In: Degnan J ed. Proceedings of the 13th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Maryland: NASA Conference Publication, 2002: 1
- [32] Selden M, Bieneman M, Clarke C *et al.* In: Wolfgang S ed. Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Frankfurt: Verlag Des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, 1998: 346
- [33] Reinhart N. In: Yang Fumin ed. Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 1996: 471
- [34] Schreiber U. In: Luck J ed. Proceedings of the 9th Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Australia: Australia Government Publisher Service, 1994: 615
- [35] Gaignebet J. In: Luck J ed. Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging, Australia: Australia Government Publisher Service, 1994: 492
- [36] <http://cddisa.gsfc.nasa.gov/lw13>, 2004
- [37] <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/working>
underline groups/signal_processing_wg, 2004

- [38] Degnan J. In: Degnan J ed. Proceedings of the 8th International Workshop on Laser Ranging, Maryland: NASA Conference Publication, 1992: 7-36

Two-Color Satellite Laser Ranging

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

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

Abstract: Freed from the atmospheric model, two-color satellite laser ranging could determine the atmospheric correction by measuring the differential time of flight between the color pairs directly. With Picosecond Event Timer and other techniques measuring the differential time of flight, the accuracy of the atmospheric delay could achieve millimeter level. The present paper introduces the research progress in this field, the principle and the corresponding formula of the atmospheric correction, and analyzes the measuring precision. The future for two-color satellite laser ranging is also prospected.

Key words: astronomical facilities and technique; two-color satellite laser ranging; review; differential time of flight; atmospheric correction; atmosphere model; color pairs