

光学学报

大气色散对星地激光单向授时偏差的影响

邢子轩, 卢麟*, 戴卫恒, 项鹏, 郑吉林, 徐荣

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 针对星地激光单向授时受大气色散影响而产生授时偏差的问题, 利用气象实测数据建立大气折射率对星地激光单向授时偏差的影响模型。以该模型为基础, 分别研究了单星对地授时和四星对地授时模式下, 不同地区、不同月份、不同天顶角和激光波长对大气色散引入的单向授时偏差的量值范围和变化规律。结果表明: 大气温度越高, 大气压强越低, 接收天顶角越小, 大气色散引入的单向授时偏差越小; 星地单向授时偏差在 10 ns 量级, 通常大气色散导致授时偏差的全年波动峰峰值小于 1 ns。

关键词 大气光学; 星地激光单向授时; 大气色散; 单向授时偏差

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230619

1 引言

时间频率是目前测量精度最高的物理量, 高精度授时的重要性已经体现在科研、国防及社会生活等方面。目前基于光纤的授时技术已经较为成熟, 在数百千米的距离上, 授时误差小于 100 ps^[1-5]。但光信号必须约束在敷设的光纤网络中传递, 无法满足大量位置不定用户的需求。基于微波链路的全球导航系统可以有效满足这部分用户需求, 目前能够实现 ns 量级的授时精度^[6]。但当更高精度等级的钟源(如离子钟、喷泉钟和光钟)可以实用化时, 传统的全球定位系统(GPS)/北斗卫星授时系统难以满足用户的授时精度需求。因此, 对于更广泛的空间应用、移动平台应用以及更高精度的授时需求, 星地激光授时技术应运而生^[7-19]。

目前, 星地激光授时的研究集中于点对点双向传输的应用场景, 通常采用往返时间测量法^[9]或双向时间比对法^[10], 采用往返时间测量法的经典研究是国外的 T2L2(Time Transfer by Laser Link)计划^[11-12]以及其后续项目 ELT(European Laser Timing)^[13-14], 其授时偏差可优于 100 ps, 百秒稳定度为 1 ps。美国国家标准计量院(NIST)结合光学频率梳^[15-16]和双向时间比对法, 在 14 km 的连接距离上, 实现了 fs 量级的授时偏差^[17-19]。但上述方法需要信号双向传输和天线对准以满足信道时延的对称互易性, 因而终端设备技术复杂且成本高, 通常用于星间、星地重要时频节点或用户之间的高精度授时。

针对绝大多数位置不定, 且因成本、体积、重量等因素无法采用双向精确对准的终端用户需求, 可借鉴北斗/GPS 卫星授时系统“多星覆盖、监听解算”的终端用户单向授时机制, 利用多条卫星到用户的下行激光链路实现用户高精度授时, 本文将其称为“星地激光单向授时”。该授时方式不仅具备用户终端体积、功耗小、“只收不发”隐蔽性好、无需精密双向对准、即插即用等优势, 还可以将空间激光授时的高精度与激光光束控制精准优势结合, 在需要的时间和区域动态构建“精细时空”, 在多激光波束交汇的范围内实现超高精度导航定位服务, 为特殊、重要的基础研究、空间测控、精确打击等军民应用服务。

但在星地激光单向授时技术体制下, 不满足激光点对点双向同时传输才能实现的对称互易条件, 信号在传输过程中因大气色散导致星地真实光线路径与直线路径之间产生差异, 从而导致位置和授时解算偏差。本文针对星地激光单向授时偏差问题, 依托气象站实测高空数据建立了大气色散导致的单向授时偏差计算模型, 利用该模型对大气色散引入的单星对地和多星对地单向授时偏差进行了仿真分析。

2 大气色散对星地激光单向授时的影响模型

大气色散导致的单星对地单向授时偏差是研究多星对地单向授时偏差的前提基础。对于单一星地链路, 激光信号在传播过程中由于大气色散影响产生时延差, 如图 1(a)中星地实线和虚线所示, S 表示卫星,

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(62273355, 61974165)、国家重点研发计划(2020YFB2205804)

通信作者: *nj_lu@163.com

A 表示终端用户,由卫星发送给用户的激光信号受大气色散影响而产生弯折,光程路径 $L_{\widehat{SA}}$ 偏离几何路径 L_{SA} ,由此造成的星地单向授时偏差可以描述为

$$t_0 = \frac{L_{\widehat{SA}} - L_{SA}}{c} = t_{opt} - t_{geo}, \quad (1)$$

式中: t_0 为大气色散引入卫星单向授时偏差; $L_{\widehat{SA}}$ 为卫星到用户终端的光程路径长度; L_{SA} 为卫星到用户终端的几何路径长度; c 为真空中光速; t_{opt} 为卫星到用户

终端的光程时延; t_{geo} 为卫星到用户终端的几何时延。

图 1(b)为星地单向授时中的大气色散几何模型。其中: O 点为地心; A 为终端用户; S 为卫星;卫星发送激光信号沿 \widehat{SA} 路径进行传播并通过大气,地面用户终端以接收天顶角 ψ 来接收卫星信号; r_i 为第 i 层大气底部与地心 O 的距离; α_i 为第 i 层大气入射点和出射点相对于地心 O 的夹角; e_i 为光线在第 i 层大气顶部的出射角。

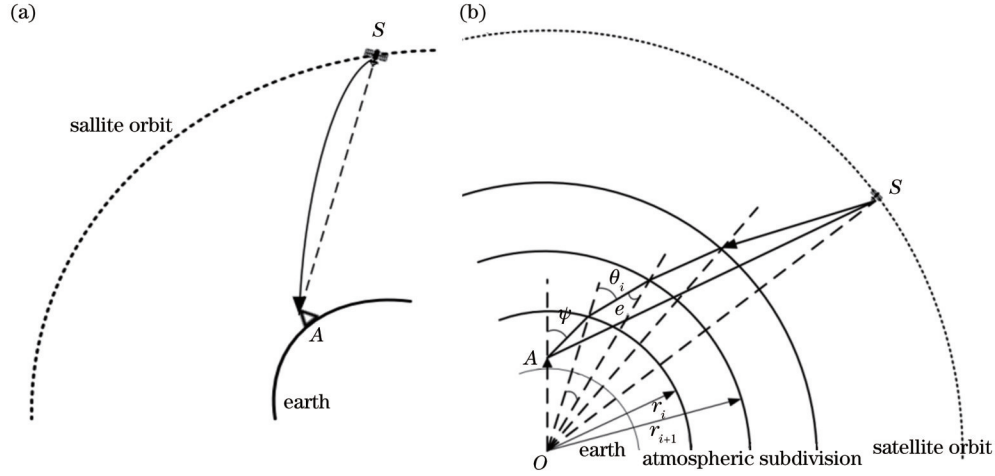


图 1 星地单向授时中的大气色散。(a)大气色散的几何形状;(b)大气色散的几何模型

Fig. 1 Atmospheric dispersion in satellite-to-earth unidirectional time transfer mode. (a) Geometry of atmospheric dispersion; (b) geometric models of atmospheric dispersion

由折射定律可知,信号经过折射率不同的介质时,压力和温度变化导致激光经过较低密度的区域加速。信号也沿着因光线弯曲而导致的弯曲路径传播。基于几何光学理论,可以将光线追踪法应用于一系列的薄球形壳,直到大气的顶部。在每个球形壳体内都假设一个恒定的折射率。星地链路中传播的激光信号只有在球层的分界处发生折射^[20-21]。激光在大气中传播的群折射率公式^[22]为

$$(n - 1) \times 10^6 = \left(\frac{273.15}{1013.25} \cdot \frac{P}{T} \cdot N_s \right) - 11.27 \cdot \frac{e}{T}, \quad (2)$$

$$N_s = (n_s - 1) \times 10^6 = \frac{287.6155}{\lambda^2} + \frac{4.88660}{\lambda^4} + \frac{0.06800}{\lambda^4}, \quad (3)$$

式中: λ 为光波波长,单位为 μm ; P 为压强,单位为 hPa; T 为温度,单位为 K; e 为水汽压,单位为 hPa; n 为大气群折射率; N_s 和 n_s 分别为标准大气群折射率指数和群折射率(标准大气温度为 273.15 K,水汽压为 0 hPa,气压为 1013.25 hPa)。由式(2)和式(3)可知,大气折射率是关于波长、温度、气压和水汽压变化的量^[20-22]。因此,可通过实际高空气象数据进行计算。中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)发布了历年中国高空规定层累年月数据,该气象数据包括探空站点所在地面和等压面的平均气压、平均温度和平均露点温度差,涵盖了地表至位势高度 30781 m 的探空数据。大气色散

对激光信号的影响主要集中在对流层,高度随纬度不同而不同,最高可达 17~18 km,因此可假设在位势高度 30781 m 以外的大气为真空,而 30781 m 以内的大气均匀分布在以地球为球心的同心球层,每一层折射率系数相同。根据该气象数据进行大气折射率分层建模。

对于地面用户位置已知的单星对地单向授时,卫星以 \widehat{SA} 路径发送激光信号,终端用户以接收天顶角 ψ 来接收信号。由于激光传输的可逆性,相当于终端用户 A 以天顶角 ψ 向卫星 S 发送激光信号,则通过下式可得出对于单一星地链路,激光信号在大气中传播的光程时延,

$$t_{opt} = \begin{cases} \sum \frac{n_i r_i \sin(\alpha_i)}{\sin(e_i) c}, & \psi \neq 0, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum \frac{n_i (r_{i+1} - r_i)}{c}, & \psi = 0, i = 1, 2, \dots, N \end{cases}, \quad (4)$$

式中: t_{opt} 为卫星到用户终端的光程时延; n_i 为第 i 层大气的折射率; r_i 为第 i 层大气底部与地心 O 的距离; α_i 为第 i 层大气入射点和出射点相对于地心 O 的夹角; e_i 为光线在第 i 层大气顶部的出射角。由图 2 可知, $\alpha_i = \theta_i - e_i$,根据折射定律和正弦定理可得,

$$n_1 r_1 \sin \theta_1 = n_i r_i \sin \theta_i = c, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (5)$$

式中: r_1 为终端用户与地心 O 的距离; n_i 为对应的大气

折射率; θ_i 为光线在第 i 层大气底部的入射角; θ_1 即为终端用户的天顶角 ψ 。因此已知接收天顶角 ψ 即可得知每层大气所对应 α_i 、 e_i 和 θ_i 。

可以计算得出星地几何时延

$$t_{\text{geo}} = \sqrt{(x_s - x_A)^2 + (y_s - y_A)^2 + (z_s - z_A)^2}, \quad (6)$$

式中: (x_s, y_s, z_s) 为卫星 S 的空间位置坐标; (x_A, y_A, z_A) 为地面用户终端的空间位置坐标, 代入式(1)可以求出大气色散引入的单星对地授时单向偏差 t_0 。

对于用户位置已知的情况, 仅通过一颗卫星就可以实现星地激光单向授时, 然而对于大多数位置不定的用户, 在陌生地域无法获取自身位置时, 仅凭一颗卫星无法完成授时, 这时就需要多颗卫星实现授时功能。图 2 为多星对地单向授时场景, 考虑到用户的未知坐标 (x_0, y_0, z_0) 和单向授时偏差 t_0 共 4 个未知数, 根据卫星激光单向授时系统中“多星覆盖、监听解算”的机制, 需选取至少 4 颗卫星, 通过接收卫星信号, 计算获得用户位置坐标与授时误差, 同时实现定位与授时。

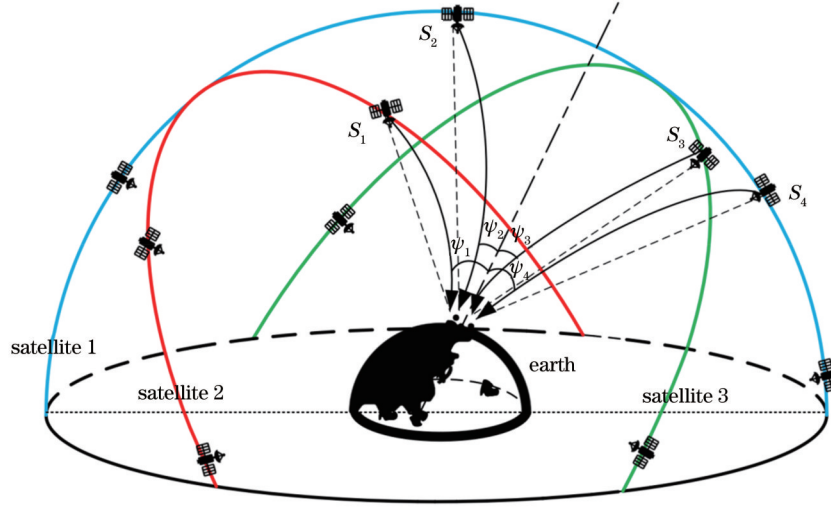


图 2 多星对地单向授时场景

Fig. 2 Scene of satellite-to-earth unidirectional time transfer by multiple satellites

如图 2 所示, O 为地心, A 为终端用户, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为当前时刻用户可观察到的处于不同卫星轨道上的 4 颗卫星, ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 、 ψ_4 分别为终端用户接收对应卫星激光信号的接收天顶角, 本文采用用户终端常用的伪距测量法研究大气色散引入的授时偏差, 授时卫星为

四颗时, 伪距观测方程组为

$$c \times t_{\text{opt}}^{(j)} = L_{S,A} + c \times t_0, \quad (7)$$

式中: j 取 1、2、3、4, 表示终端用户观测到的 4 颗卫星。式(7)可以展开为

$$\begin{cases} c \times t_{\text{opt}}^{(1)} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} + c \times t_0 \\ c \times t_{\text{opt}}^{(2)} = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2} + c \times t_0 \\ c \times t_{\text{opt}}^{(3)} = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2} + c \times t_0 \\ c \times t_{\text{opt}}^{(4)} = \sqrt{(x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2} + c \times t_0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $t_{\text{opt}}^{(j)}$ 表示第 j 颗卫星到用户的光程时延, 根据前述单星对地单向授时大气色散的几何模型式(4)可以计算得到; $c \times t_{\text{opt}}^{(j)}$ 即为观测伪距; $L_{S,A}$ 表示第 j 颗卫星到用户的真实距离; (x_j, y_j, z_j) 表示当前时刻第 j 颗卫星的位置坐标, 通过卫星星历数据可以得到; (x_0, y_0, z_0) 表示终端用户的位置坐标; t_0 表示接收机与标准时的钟差。模型中未考虑大气色散以外的其他误差因素。故此钟差 t_0 即为四星对地授时机制和用户解算模式

下, 大气色散引入的单向授时偏差。

四星对地单向授时偏差的模型的建立步骤如下:

- 1) 根据各站的气象数据建立大气分层模型;
- 2) 选定终端站的位置坐标, 且用户在同一时刻以 4 个确定的天顶角发送激光信号, 利用光线追踪法算出受大气色散影响的传播路径与确定轨道之间的交点即为 4 颗卫星坐标值;
- 3) 将 4 颗卫星坐标值与卫星到终端用户的光程时延 $t_{\text{opt}}^{(j)}$ 代入式(8), 解得终端用户位置和钟差 t_0 ;
- 4) 在此模型下, 终端用户与卫星标准时之间授时偏差

有且仅由四星到地不同路径的各自色散偏差确定,因此 t_0 可认定为大气色散导致的四星对地单向授时偏差。第三步解出的用户位置与第二步选定的用户坐标之间的距离之差即为大气色散导致的定位误差。

3 仿真结果与分析

选取中圆地球轨道(MEO)作为卫星发送端轨道,高度约为 21528 km,仿真中激光波长分别选取 815 nm 和 1550 nm。根据式(2)~(6)可知,大气色散导致的星地激光单向授时偏差与大气压、水汽压、温度、天顶角等有关,大气压的变化主要与位势高度相关,水汽压的变化主要与温度相关,因此,为研究星地激光单向授时偏差量值范围,主要研究不同温度、天顶角以及位势高度下,单向授时偏差的波动情况。利用中国气象数据网获取到的海口站、酒泉站、武汉站、哈尔滨站探空气象实测数据,结合式(2)、(3)计算大气分层折射率建立大气色散模型。假设终端用户的天顶角 ψ 为 $0^\circ \sim 60^\circ$,利用该模型仿真分析大气色散对卫星激光单向授时偏差的影响。

3.1 终端用户位置已知,大气色散导致的单星对地激光单向授时偏差分析

图 3(a)和(b)分别为对于单一星地链路,激光波长为 815 nm 时大气色散引入的单星对地单向授时偏差波动情况。图 3(a)为天顶角为 60° 时大气色散导致的单星对地单向授时偏差及其变化情况。哈尔滨、武

汉和海口站的授时偏差在 17.5 ns 左右波动,而海拔较高的酒泉站,单向授时偏差明显低于其他三站,与武汉站相比单向授时偏差最大差异为 2.69 ns。这是因为酒泉地面站处于高海拔地区,大气较为稀薄,大气折射效应减弱,因而单向授时偏差较小。对于同一地面站,单星对地单向授时偏差全年变化范围在百 ps 量级,武汉站全年单向授时偏差波动最大为 396 ps,海口站为 228.5 ps,哈尔滨站为 377.6 ps,酒泉站为 245.2 ps。综合分析不同地面站之间单星对地单向授时偏差的差异,跨越中国南北的哈尔滨站与海口站在大气温度和湿度方面差距巨大,但单向授时偏差的差异并不明显,最大仅为 98.6 ps。

如图 3(b)所示,海口站、酒泉站、武汉站、哈尔滨站 1 月份大气色散导致的单星对地单向授时偏差随天顶角的增大而逐渐增大,天顶角的变化对单向授时偏差影响更为显著,整体在纳秒量级内变化。这是因为随着天顶角增大,激光链路在大气层分层处的入射角相应增大,加剧了大气折射效应,光程路径更加偏离几何路径。海口站、武汉站与哈尔滨站三站单向授时偏差随天顶角的变化曲线大致相当。具体分析三站差异可知,武汉站海拔最低,大气分布密集,在三站中单向授时偏差最高,1 月份海口站温度最高,在三站中单向授时偏差最小。可以看出:武汉站天顶角 60° 时授时偏差最大,约为 17.69 ns;酒泉站天顶角 0° 时授时偏差最小,约为 7.52 ns。

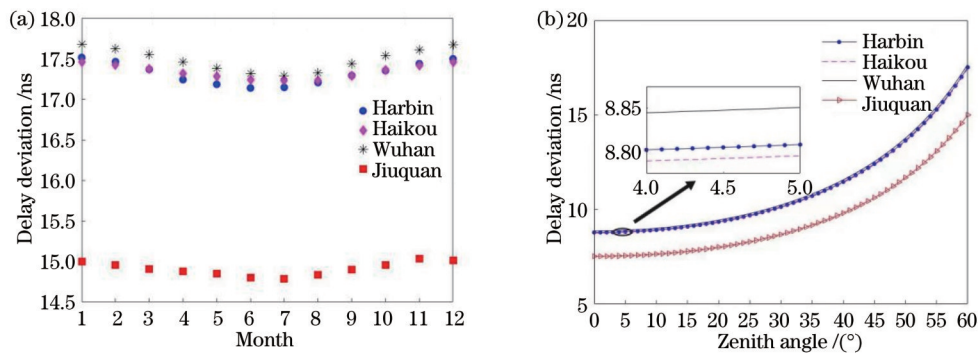


图 3 单星对地单向授时偏差的变化(用户位置已知,激光波长为 815 nm)。(a)天顶角为 60° 时不同站点各月份授时偏差;(b)不同地面站 1 月份授时偏差随天顶角的变化

Fig. 3 Variation of satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation by single satellite (user's position is known, laser wavelength is 815 nm). (a) Time transfer deviation of different sites in each month when zenith angle is 60° ; (b) variation of time transfer deviation in different sites with zenith angle in January

图 4(a)和(b)分别为对于单一星地链路,激光波长为 1550 nm 时大气色散引入的单星对地单向授时偏差波动情况。其他条件不变,激光波长设定为 1550 nm 时,对于同一地面站,授时偏差随月份变化趋势与激光波长 815 nm 时类似,偏差值减少约 300 ps。单星对地单向授时偏差的变化范围在百 ps 量级,武汉站全年单向授时偏差波动最大为 388.7 ps,海口站为 224.3 ps,哈尔滨站为 370.6 ps,酒泉站为 240.6 ps。

可以看出:武汉站天顶角 60° 时授时偏差最大,约为 17.36 ns;酒泉站天顶角 0° 时授时偏差最小,约为 7.38 ns。

3.2 终端用户位置未知,大气色散导致的四星对地激光单向授时偏差分析

对于位置未知的终端用户的单向授时偏差是本文的研究重点,而多星对地激光单向授时偏差的研究基础是至少需接收到 4 颗卫星发播的信号,因此本文对

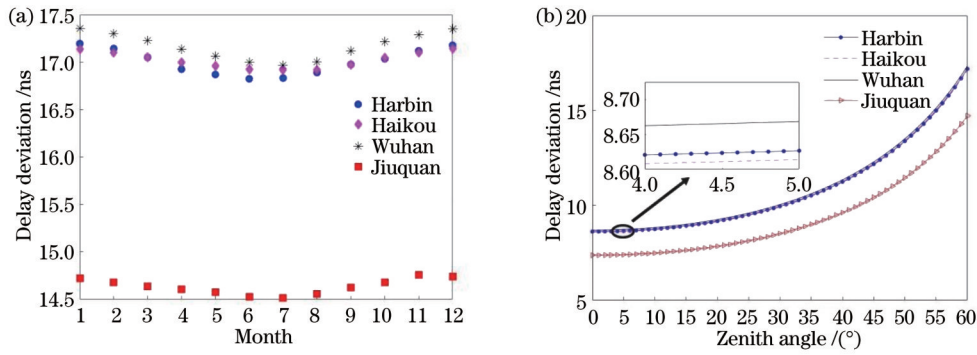


图 4 单星对地单向授时偏差的变化情况(用户位置已知,激光波长为 1550 nm)。(a)天顶角为 60°时不同站点各月份授时偏差; (b)不同地面站 1 月份授时偏差随天顶角的变化

Fig. 4 Variation of satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation by single satellite (user's position is known, laser wavelength is 1550 nm). (a) Time transfer deviation of different sites in each month when zenith angle is 60°; (b) variation of time transfer deviation in different sites with zenith angle in January

多星对地激光单向授时偏差的研究以四星对地授时为主。研究中分别仿真分析了激光波长为 815 nm 和 1550 nm 时,四星对地单向授时偏差的波动情况。

图 5(a)、(b)分别为对于四条星地链路,激光波长为 815 nm 时各地面站四星对地单向授时偏差的变化情况。前文研究了单星对地单向授时偏差的变化情况,天顶角对单星对地单向授时偏差的影响较为显著,因此仅研究四星对地单向授时偏差的量值范围,可假设终端用户同一时刻接收 4 颗卫星信号的天顶角相等,各地面站授时偏差随天顶角的增大而逐渐增大,以此得出四星对地单向授时偏差的最大量值范围。如图 5(a)所示,四星对地单向授时偏差整体在纳秒量级内变化,最大约为 35.36 ns。与单星对地单向授时偏差

相比较,四星对地单向授时偏差量级约为单星对地单向授时偏差的 2 倍。

根据前文所述,接收天顶角均为 60°时,单向授时偏差最大,以下对于单向授时偏差随月份的波动情况研究以天顶角均为 60°为主。图 5(b)为终端用户同一时刻接收 4 颗卫星信号的天顶角均为 60°时四星对地单向授时偏差的波动情况。对于同一终端用户,单向授时偏差变化幅度在百 ps 量级,武汉站单向授时偏差最大波动为 796.3 ps,哈尔滨站为 763.1 ps,海口站为 457.6 ps,酒泉站为 494.6 ps。对于不同终端用户,用户所在海拔高度越高,单向授时偏差越小,海拔 1477.2 m 的酒泉站与海拔 23.6 m 的武汉站相比,大气色散引入的单向授时偏差最多相差 5.35 ns。

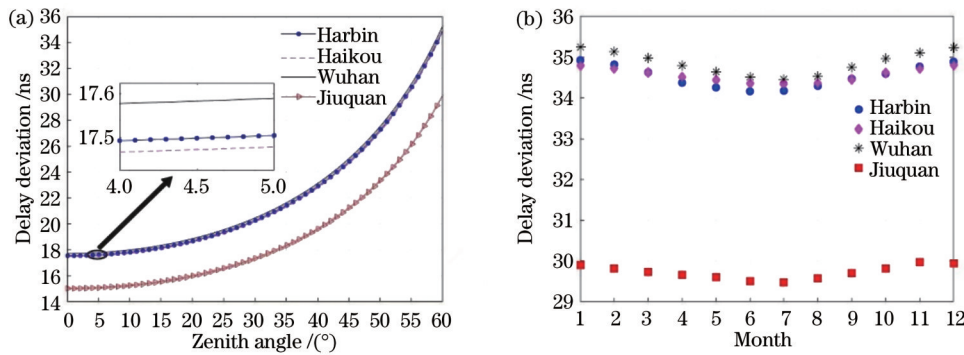


图 5 四星对地激光单向授时偏差的变化情况(用户位置未知,激光波长为 815 nm)。(a)不同地面站 1 月份授时偏差随天顶角的变化; (b)天顶角为 60°时不同站点各月份最大授时偏差

Fig. 5 Variation of satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation by four satellites (user's position is unknown, laser wavelength is 815 nm). (a) Variation of time transfer deviation in different sites with zenith angle in January; (b) maximum time transfer deviation of different sites in each month when zenith angle is 60°

图 6(a)、(b)分别为对于四条星地链路,激光波长为 1550 nm 时四星对地单向授时偏差的变化情况。其他条件不变,激光波长设定为 1550 nm 时,对于同一地面站,授时偏差随月份变化趋势与激光波长 815 nm 时类似,授时偏差随温度的升高而降低,变化范围在百

ps 量级,武汉站全年单向授时偏差波动最大为 781.5 ps,海口站为 449.1 ps,哈尔滨站为 748.9 ps,酒泉站为 485.4 ps。武汉站 4 颗卫星天顶角均为 60°时四星对地单向授时偏差最大,约为 34.70 ns。

对于同一地区,由于 815 nm 与 1550 nm 在变化趋

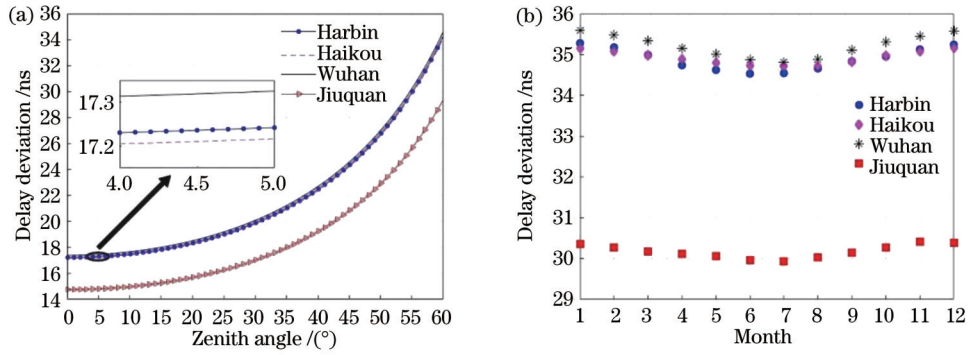


图 6 四星对地激光单向授时偏差的变化情况(用户位置未知,激光波长为 1550 nm)。(a)不同地面站 1 月份授时偏差随天顶角的变化; (b)天顶角为 60°时不同站点各月份最大授时偏差

Fig. 6 Variation of satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation by four satellites (user's position is unknown, laser wavelength is 1550 nm). (a) Variation of time transfer deviation in different sites with zenith angle in January; (b) maximum time transfer deviation of different sites in each month when zenith angle is 60°

势上呈现一致性,区别仅在于波长 1550 nm 时各站大气色散导致的四星对地单向授时偏差较波长 815 nm 时整体下降几百个 ps。因此以下仅分析 1550 nm 波长时四星对地单向授时偏差。图 7 为统计 1550 nm 激光四星对地单向授时偏差全年数据得出的统计直方图,横轴表示各站单向授时偏差的数值范围,纵轴表示在 12 个月份数据中,单向授时偏差属于某一区间的次数。综合分析结果如表 1 所示。各地面站单向授时偏差波动峰峰值和均方差均在百 ps 量级。传统 GPS/

BD 系统因电离层波动影响较大,授时偏差均方根通常在几个甚至几十个纳秒,需每日多次测量校消才能实现授时^[23-24]。而同一地区全年激光单向授时偏差的稳定性显然更好,全年单向授时偏差均方差在百 ps 量级。在非极端天气情况下,地面站每日温差明显小于 7 月和 12 月之间的最大温差,因此可以推断空间激光单向授时偏差日波动同样在百 ps 量级,同时也使得无需频繁实时测量大气色散实施偏差校消、提升授时性能成为可能。

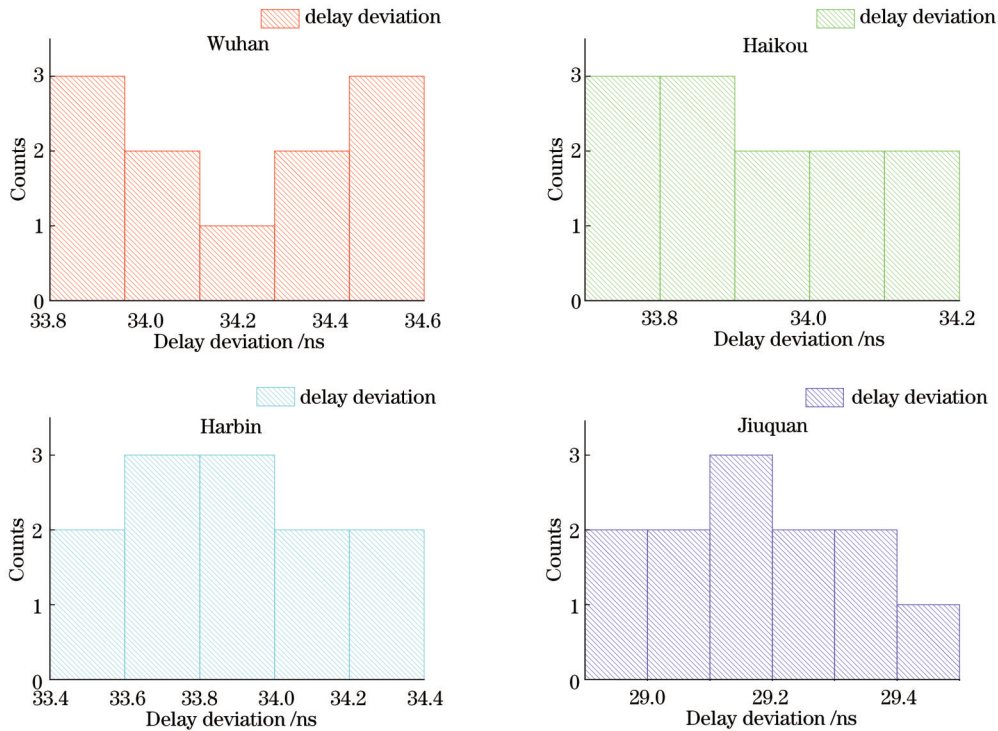


图 7 不同站点全年最大单向授时偏差统计(天顶角 60°)

Fig. 7 Annual maximum unidirectional time transfer deviation of different sites (zenith angle is 60°)

表 1 不同站点全年最大单向授时偏差数值分析(天顶角 60°)

Table 1 Numerical analysis of annual maximum unidirectional time transfer deviation of different sites (zenith angle is 60°)

Station	Mean value /ns	Mean square error /ps	Peak-to-peak value /ps
Wuhan	34.2209	282.23	781.5
Haikou	33.9258	171.08	449.1
Harbin	33.8945	274.28	748.9
Jiuquan	29.1753	164.47	485.4

4 结 论

本文通过研究大气色散对星地激光单向授时的作用机理,建立了授时偏差计算模型,对大气色散对星地激光单向授时偏差的影响进行了仿真研究。结果表明:大气色散引入的星地激光单向授时偏差与用户接收天顶角、激光波长、地面温度和位势高度均相关,其中接收天顶角的影响最为显著,在 10 ns 量级;当四星天顶角与地面站相对位置不固定时,星地激光单向授时偏差约在 15~35 ns 内波动;当相对位置固定时,四星对地授时的全年单向授时偏差波动小于 1 ns。因此,在非极端天气条件下,通过定时测量大气色散数值,实施偏差校消,有望使空间激光单向授时偏差峰值降至百皮秒量级。

参 考 文 献

- [1] Dierikx E F, Wallin A E, Fordell T, et al. White rabbit precision time protocol on long-distance fiber links[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(7): 945-952.
- [2] 谭小容, 许江宁, 吴苗, 等. 远距离光纤时频信号传递研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500006.
Tan X R, Xu J N, Wu M, et al. Research progress of long-haul fiber-optic time-frequency transmission[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0500006.
- [3] 陈祖峰, 左发兴, 胡亮, 等. 基于双向时分复用同纤同波传输的时间同步系统[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906005.
Chen Z F, Zuo F X, Hu L, et al. Time synchronization system based on bidirectional time-division multiplexing transmission over single fiber with same wavelength[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906005.
- [4] 陈丁, 许江宁, 吴苗, 等. 基于双纤环回比值法的光纤时间同步技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1706001.
Chen D, Xu J N, Wu M, et al. Optical fiber time synchronization technology based on double fiber round-trip ratio method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1706001.
- [5] 陈法喜, 李博, 郭宝龙. 基于光纤频率传递的高精度时间传递方法[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1506002.
Chen F X, Li B, Guo B L. High precision time transfer method based on optical fiber frequency transfer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1506002.
- [6] 姚渊博, 蒙艳松, 边朗, 等. 空间激光时频传递技术研究现状及趋势[J]. 空间电子技术, 2017, 14(5): 12-16, 21.
Yao Y B, Meng Y S, Bian L, et al. Research status and trends of space laser time and frequency transmission technology[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(5): 12-16, 21.
- [7] 于连栋, 朱家圣, 陆洋. 高精度自由空间光学时频基准传输技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312009.
Yu L D, Zhu J S, Lu Y. Research progress of high precision free space optical time-frequency reference transfer technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312009.
- [8] 孙延光, 徐敏, 陈亚晴, 等. 自由空间激光时频传输研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170004.
Sun Y G, Xu M, Chen Y Q, et al. Research progress on free-space laser time-frequency transfer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170004.
- [9] Meng W D, Zhang H F, Huang P C, et al. Design and experiment of onboard laser time transfer in Chinese Beidou navigation satellites[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 951-958.
- [10] Guo G K, Hou D, Sun F Y, et al. Laser-based atmospheric radio-frequency transfer with sub-picosecond timing fluctuation using single phase compensator[J]. Optics Communications, 2018, 426: 526-530.
- [11] Exertier P, Samain E, Courde C, et al. Sub-ns time transfer consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2[J]. Metrologia, 2016, 53(6): 1395-1401.
- [12] Laas-Bourez M, Courde C, Samain E, et al. Accuracy validation of T2L2 time transfer in co-location[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(2): 255-265.
- [13] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, et al. The ACES/PHARAO space mission[J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 540-552.
- [14] Schreiber K U, Prochazka I, Lauber P, et al. Ground-based demonstration of the European Laser Timing (ELT) experiment [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(3): 728-737.
- [15] Guidry M A, Lukin D M, Yang K Y, et al. Quantum optics of soliton microcombs[J]. Nature Photonics, 2022, 16(1): 52-58.
- [16] 董瑞芳, 张晓斐, 刘涛, 等. 高精度自由空间时间传递研究的新趋势[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 162-169.
Dong R F, Zhang X F, Liu T, et al. New trends on high-precision free-space distant time transfer research[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 162-169.
- [17] Sinclair L C, Swann W C, Bergeron H, et al. Synchronization of clocks through 12 km of strongly turbulent air over a city[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(15): 151104.
- [18] Swann W C, Bodine M I, Khader I, et al. Measurement of the impact of turbulence anisoplanatism on precision free-space optical time transfer[J]. Physical Review A, 2019, 99(2): 023855.
- [19] Bergeron H, Sinclair L C, Swann W C, et al. Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter [J]. Nature Communications, 2019, 10: 1819.
- [20] 袁宏武, 梅海平, 黄印博, 等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401004.
Yuan H W, Mei H P, Huang Y B, et al. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0401004.
- [21] 杨明珊, 周慧妍, 刘璐, 等. 对流层大气折射率剖面模型研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0701001.
Yang M S, Zhou H Y, Liu L, et al. Study on tropospheric atmosphere refractive index profile model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0701001.
- [22] Torge W, Muller J. Geodesy[M]. 4th ed. Berlin: DE Gruyter,

- 2012: 116-117.
- [23] 焦文海, 张慧君, 朱琳, 等. GNSS 广播协调世界时偏差误差评估方法与分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 805-815.
Jiao W H, Zhang H J, Zhu L, et al. Assessment method and analysis of GNSS broadcast coordinated universal time offset error[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7): 805-815.
- [24] 杨旭海, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 1-10.
Yang X H, Li X H, Hua Y, et al. Technical progress of satellite time service and time transfer[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(4): 1-10.

Influence of Atmospheric Dispersion on Deviation of Satellite-to-Earth Laser Unidirectional Time Transfer Link

Xing Zixuan, Lu Lin*, Dai Weiheng, Xiang Peng, Zheng Jilin, Xu Rong

Institute of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China

Abstract

Objective Free-space laser time transfer techniques have a wide range of application prospects as they have higher accuracy than the traditional global navigation satellite system (GNSS) and better flexibility than fiber-optic time transfer techniques. However, the current research on free-space laser time transfer techniques requires two-way signal transmission and antenna alignment to meet the symmetric reciprocity of channel time delay, resulting in the high complexity and cost of terminal equipment. Consequently, these techniques are mainly utilized for high-precision time transfer of satellite-to-satellite, satellite-to-earth crucial time-frequency nodes and users. Characterized by small user terminal size, low power consumption, good concealment, and plug-and-play convenience without the need for precise two-way alignment, satellite-to-earth laser unidirectional time transfer can combine the high precision of free-space laser time transfer techniques and the flexibility of unidirectional time transfer techniques to overcome the limitation. A significant factor limiting the performance of satellite-to-earth laser unidirectional time transfer is the time transfer deviation introduced by atmospheric dispersion. We can lay a solid foundation for further correcting the deviation and improving the time transfer accuracy by studying the range and fluctuation of atmospheric dispersion on the deviation of satellite-to-earth laser unidirectional time transfer.

Methods We employ the meteorological data from China Meteorological Data Network to build a standard atmospheric refractive index layering model using Murray's classical spherically symmetric atmospheric refractive index layering theory, and then build a time transfer deviation model based on the unidirectional time transfer mechanism. On this basis, firstly, the variation of single-satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation is simulated and studied. Secondly, the variation of four-satellite-to-earth unidirectional laser time transfer deviation is analyzed. Finally, the fluctuations of the single-satellite-to-earth and four-satellite-to-earth unidirectional time transfer biases are compared and analyzed under the laser wavelength of 815 nm (Fig. 3) and 1550 nm, respectively.

Result and discussion The medium earth orbit (MEO) satellite is selected as the navigation satellite. On this basis, we investigate the influence of atmospheric dispersion on the single-satellite-to-earth unidirectional time transfer deviation first. Simulation results of the unidirectional time transfer deviation are obtained with the laser wavelength of 815 nm (Fig. 3) and 1550 nm (Fig. 4) respectively. The range of unidirectional time transfer deviation is from 7.52 ns to 17.69 ns at 815 nm and slightly decreases from 7.38 ns to 17.36 ns at 1550 nm. The results show that the unidirectional time transfer deviation caused by atmospheric dispersion decreases with the increasing atmospheric temperature and potential height, and it also reduces with the decrease in atmospheric pressure and receiving zenith, with a more significant influence of potential height. The unidirectional time transfer deviation of Jiuquan station with higher altitude is significantly lower than that of other stations. Then, the effect of atmospheric dispersion on the unidirectional time transfer deviation of four satellites to the earth is studied, and the fluctuations of unidirectional time transfer deviation are obtained when the laser wavelength is 815 nm (Fig. 5) and 1550 nm (Fig. 6) respectively. The unidirectional time transfer deviation ranges from 15.02 ns to 35.36 ns at 815 nm and from 14.74 ns to 34.70 ns at 1550 nm. The trend of the time transfer deviation influenced by temperature, potential height, and receiving zenith angle is similar to that with the wavelength of 815 nm. Finally, a comprehensive analysis of the unidirectional time transfer deviation of the four ground stations in different months with a laser wavelength of 1550 nm (Fig. 7, Table 1). This shows that the mean square error of the unidirectional time transfer deviation at each ground station is in the order of 100 ps throughout the year when the relative position

between the four satellites and ground stations is fixed.

Conclusion We investigate the mechanism of the influence of atmospheric dispersion on the deviation of satellite-to-earth laser unidirectional time transfer link, build a time transfer deviation calculation model, and simulate and study the deviation caused by atmospheric dispersion in the satellite-to-earth laser unidirectional time transfer link. The results show that the unidirectional time transfer deviation introduced by atmospheric dispersion is related to the user receiving zenith angle, laser wavelength, ground temperature, and potential height. The receiving zenith angle exerts the most significant influence, resulting in time deviation fluctuation of up to 10 ns. When the relative position between the four satellites and ground stations is not fixed, the unidirectional time transfer deviation fluctuates within the range of 15 ns to 35 ns. However, when the relative position between the four satellites and ground stations is fixed, the annual unidirectional time transfer deviation fluctuation is less than 1 ns. Therefore, in non-extreme weather conditions, the peak deviation of satellite-to-earth laser unidirectional time transfer is expected to be reduced to the order of 100 ps by compensating the deviation with empirical values.

Key words atmospheric optics; satellite-to-earth unidirectional time transfer; atmospheric dispersion; unidirectional time transfer deviation