

大气折射对双波长空间激光授时偏差的影响

刘航**, 卢麟*, 朱勇, 吴传信, 张宝富

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 针对双波长空间激光授时系统受大气折射率分布的影响而产生授时偏差的问题, 利用实测气象数据建立了大气折射率分布对授时偏差的影响模型。以该模型为基础分别仿真研究了在地面终端捕获模式和星上终端捕获模式下双向链路不对称时延差和收发终端位置偏差随不同地区、不同月份和不同天顶角的变化规律。结果表明: 大气压强越低, 大气温度越高, 不对称时延差和收发终端位置偏差越小; 星上终端捕获模式下的授时偏差达到百皮秒量级; 地面终端捕获模式下的授时偏差达到纳秒量级, 通过进一步双向精密对准可将其减少到十皮秒量级。在卫星过顶时间内, 不对称时延差和收发终端位置偏差随天顶角的变化而变化, 并且存在地面终端地理位置的差异, 需实时校正并消除不对称时延差和收发终端位置偏差。

关键词 大气光学; 空间激光授时; 大气折射率; 不对称时延差; 位置偏差

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0901001

Influence of Atmospheric Refraction on Timing Deviation of Time Transfer by Space Laser Link at Double Wavelengths

Liu Hang**, Lu Lin*, Zhu Yong, Wu Chuanxin, Zhang Baofu

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

Abstract In order to evaluate the impact of atmospheric refractive index distribution on timing deviation of time transfer by space laser link at double wavelengths, we propose the model of atmospheric refractive index distribution influenced on timing deviation with the measured meteorological data. The asymmetric delay deviation and the position deviation of the transceiver terminal are simulated respectively in different regions, different months and different zenith angles based on the ground terminal capturing mode and the satellite terminal capturing mode. The results show that the asymmetric delay deviation and the position deviation are smaller when the atmospheric pressure is lower and the atmospheric temperature is higher. The timing deviation of satellite terminal capturing mode is hundreds of picoseconds. The timing deviation of the ground terminal capturing mode reaches to nanoseconds, which can be decreased to about ten picoseconds by further bidirectional precision alignment. In the satellite passing time, the asymmetric delay deviation and position deviation change with the variation of the zenith angle, and there are geographical location differences between the ground terminals. In general, it is necessary to correct the asymmetric delay deviation and the position deviation of transceiver terminals in real time.

Key words atmospheric optics; time transfer by space laser link; atmospheric refractive index; asymmetric delay deviation; position deviation

OCIS codes 010.1285; 010.3310; 120.3940

1 引 言

空间激光高精度授时对于提升时频体系的服务精度、增强时频体系的有效性和完好性具有重要意义, 因此已成为世界各国研究的热点^[1-4]。空间激光授时可依托于星地激光通信链路进行。星地光通信

系统主要由星上终端和地面终端组成。星上终端一般采用收发一体的设计方案, 天线多采用卡塞格伦式望远镜^[5], 例如日本的 LCE (Laser Communications Equipment) 终端、LUCE (Laser Utilizing Communications Equipment) 终端, 以及欧洲的 OPALE 终端、PASTEL 终端等, 此时上行

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-03-20; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61673393, 61371121, 61475193)

* E-mail: Nj_lulin@163.com; ** E-mail: 17512593997@163.com

链路和下行链路通常采用不同波长的光。空间激光授时通常采用与地面光纤授时类似的方案,主要包括环回法^[6]和双向比对法^[7],其中授时偏差是衡量授时系统性能的重要指标^[8-10]。但由于大气密度不均匀分布和大气色散,在上行链路和下行链路中使用不同波长的光会引起授时偏差,其原因主要包含两个因素:一是双向信号在传输中产生不对称时延差;二是终端收发位置偏差导致时延偏差。因此需进行大气折射率分布建模,研究双波长激光信号实际传播路径和时延,从而对双向链路不对称时延差和位置偏差进行补偿。

本文针对双波长条件下空间激光授时偏差问题,依托地面站高空气象实测数据建立了授时偏差的计算模型,利用该模型对星上终端捕获模式和地面终端捕获模式下不对称时延差和位置偏差进行了仿真分析。

2 大气折射率分布对授时偏差的影响模型

利用光线追踪法建立授时偏差的仿真模型。假设大气层是围绕地球均匀分布的同心球层,每一层具有相同的折射率系数;假设进入大气的光线只有在同心球层的分界处发生折射^[11];假设在 32 km 外的大气为真空。激光在大气中传播的群折射率公式^[12]为

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

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

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,二氧化碳体积分数为 0.0375%)。由(1)式和(2)式可见大气折射率是关于波长温度、气压和水汽压变化的量。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/data/detail/dataCode/B.0021.0002.html>)公开发布了 1981—2010 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。因此可根据该气象数据,进行大气折射率分层建模。在计算中为符合(1)式和(2)式中所需变量,需将数据中平均露点温度差转换成水汽压,转换的公式为

$$e = f \cdot E(T_d), \quad (3)$$

式中: E 为饱和水汽压; T_d 为露点温度; f 为湿空气增强因子,在计算大气折射率时可近似为 1^[13-14]。为计算饱和水汽压 E ,可采用 Goff-Gratch 饱和水汽压计算公式^[15]。

同时需将气象数据中等压面的位势高度转换成等压面的海拔高度,转换的公式为

$$z = \frac{9.8 \times H_w}{g(z)} = \frac{9.8 \times H_w}{9.784 \cdot [1 - 0.0026 \cdot \cos(2\varphi) - 2.8 \times 10^{-7} z]}, \quad (4)$$

式中: $g(z)$ 为重力加速度; H_w 为位势高度,单位为 gpm(1 gpm 的物理含义为单位质量空气克服重力作 9.8 J 的功时,从海平面向上移动的高度); φ 为纬度,单位为°; z 为海拔高度,单位为 m。由此即可进行大气折射率分层建模,得出大气底部与地心 O 的距离 r_i 及其所对应的折射率 n_i 。

对于星地激光通信可采取地面终端捕获模式或星上终端捕获模式建立激光链路。图 1(a)为地面终端捕获模式下计算授时偏差的几何模型,其中 O 点为地心, X 点为地面站, A 点为卫星。星上终端以 \overrightarrow{AX} 路径向地面终端发送信号光后,地面终端以接收天顶角 ψ' 向星上终端发送信号光。由于不同波长的光大气折射率不同,上行链路为 \overrightarrow{XB} 路径。因光路可逆,此时双向链路时延差即图 1(a)中 \overrightarrow{XA} 和 \overrightarrow{XB} 路径的时延差,相当于不同波长的光在同一位置以相同天顶角发送信号光。因此当给定地面站接收天顶角 ψ' 后,通过(5)式和(6)式即可得出双向链路不对称时延差 τ_a 。

$$t = \begin{cases} \sum \frac{n_i r_i \sin \alpha_i}{c \sin e_i}, & \psi' \neq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \\ \sum \frac{n_i (r_{i+1} - r_i)}{c}, & \psi' = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases}, \quad (5)$$

$$\tau_a = \frac{1}{2} (t_{\overrightarrow{XB}} - t_{\overrightarrow{XA}}), \quad (6)$$

式中: t 为时延; c 为真空中光速; 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; θ_i 为光线在第 i 层大气底部

的入射角。由图 1(a)可知, $\alpha_i = \theta_i - e_i$, 根据 Snell 定律和正弦定理可得大气光路方程:

$$n_1 r_1 \sin \theta_1 = n_i r_i \sin \theta_i = C, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (7)$$

式中: C 为常数; r_1 为地面站海拔高度, 即最低层大气底部与地心 O 的距离; n_1 为 r_1 所对应的大气折射率; θ_1 即地面站接收天顶角 ψ' 。因此已知接收天顶角 ψ' 即可得知每层大气所对应 θ_i 、 e_i 和 α_i , 代入(5)式和(6)式即可得出双向链路不对称时延差 τ_a 。

收发终端位置偏差 L_{AB} 即图 1(a)中 \widehat{AB} 长度, 由于 $\angle AOB$ 较小, 可利用 \widehat{AB} 近似等于 \overline{AB} 长度, 通过(8)式和(9)式可得因收发终端位置偏差导致的授时偏差 τ_s 。

$$L_{AB} = (r_e + H_s) \cdot (\sum \alpha_{wi} - \sum \alpha_{di}), \quad (8)$$

$$\tau_s = n_{\text{glass}} \cdot L_{AB} / c, \quad (9)$$

式中: 地球半径 $r_e = 6371.393$ km; H_s 为卫星轨道高度; α_{wi} 和 α_{di} 分别为上行和下行链路在第 i 层大气入射点和出射点相对地心 O 的夹角; n_{glass} 为玻璃折射率, 取值为 1.47。

当采用星上终端捕获模式建立激光链路时, 如图 1(b)所示。 O 点为地心, S 点为卫星, B 点为地面站。地面终端以发射天顶角 ψ 沿 \overrightarrow{BS} 路径向星上终端发送信号光后, 星上终端沿 \overrightarrow{SA} 路径向地面终端发送信号光, 此时地面站接收天顶角为

$$\psi' = \arcsin \left[\frac{n_{uN} r_N \sin(\theta_{uN})}{n_{d1} r_1} \right], \quad (10)$$

式中: θ_{uN} 为上行链路真空层底部的入射角; 真空层折射率 $n_{uN} = 1$; n_{d1} 为下行链路激光在最低层的大气折射率; r_N 为真空层底部与地心的距离。因光路可逆, 相当于不同波长的光在不同位置以不同天顶角发送信号光, 此时双向链路时延差即图 1(b)中 \overrightarrow{AS} 和 \overrightarrow{BS} 路径的时延差。给定上行链路发送天顶角 ψ 可得出 α_{wi} 和 e_{wi} , 代入(5)式即可得出上行链路时延 t_{BS} , 通过(10)式计算下行链路地面站接收天顶角 ψ' 后得出 α_{di} 和 e_{di} , 代入(5)式可得出下行链路时延 t_{AS} , 从而得出星上终端捕获模式下不对称时延差 τ'_a :

$$\tau'_a = \frac{1}{2} (t_{BS} - t_{AS}). \quad (11)$$

收发终端位置偏差 L'_{AB} 为图 1(b)中 \widehat{AB} 长度, 即

$$L'_{AB} = r_1 \times (\sum \alpha_{di} - \sum \alpha_{wi}), \quad (12)$$

由于 $\angle AOB$ 较小, 因此位置偏差 \widehat{AB} 近似等于 \overline{AB} 长

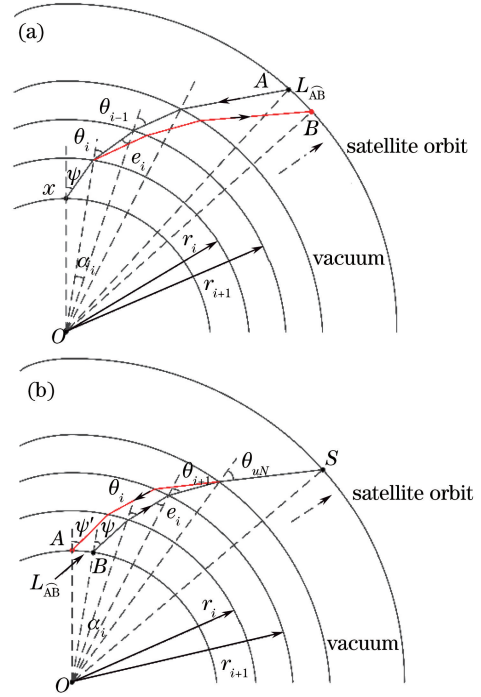


图 1 双波长空间激光授时原理图。

(a) 地面终端捕获模式; (b) 星上终端捕获模式

Fig. 1 Schematic diagram of time transfer by space laser link at double wavelengths. (a) Ground terminal capturing mode; (b) satellite terminal capturing mode

度。因收发终端位置偏差导致的授时偏差 τ'_s 可表示为

$$\tau'_s = n_{\text{glass}} L'_{AB} / c. \quad (13)$$

3 计算结果与分析

假设卫星轨道为 1000 km, 选取 800 nm 典型波段, 上行链路波长为 815 nm, 下行链路波长为 847 nm^[16-18]。利用哈尔滨站、海口站、武汉站和酒泉站实测气象数据, 主要包括温度、压强、水汽压、位势高度等数值(参见中国气象数据网), 通过(1)~(4)式建立大气折射率分布模型。星上终端捕获模式下给定地面站发送天顶角 ψ 为 $0^\circ \sim 60^\circ$, 地面终端捕获模式下同样给定地面站接收天顶角 ψ' 为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 。利用该模型对两类典型激光链路对准模式下的不对称时延差和位置偏差进行仿真分析。

3.1 星上终端捕获模式下不对称时延差和位置偏差分析

图 2(a)和(b)分别为在星上终端捕获模式下哈尔滨站、海口站、武汉站和酒泉站 1 月份双向链路不对称时延差和位置偏差随天顶角的变化情况。由图 2(a)可知, 各地面站不对称时延差在几十皮秒量级内变化, 最大约为 -33.6 ps。在小天顶角范围

内,上行链路时延仍大于下行链路;在大天顶角范围内,上行链路时延小于下行链路。在天顶角约为 45° 时,不对称时延差最小。当上行链路波长为 815 nm ,下行链路为 847 nm 时,下行链路波长大于上行链路,因此下行链路波长路径和传播速度都大于上行链路。由图2(b)可知,各地面站位置偏差随天顶角的增大而逐渐增大,整体在厘米量级内变化,最大约为 3.51 cm ,对应约 171.8 ps 的授时偏差。

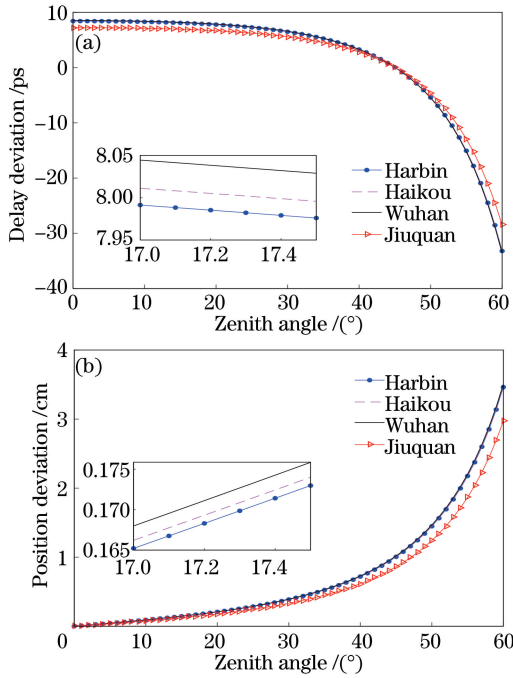


图2 星上终端捕获模式下不同站点1月份授时偏差随天顶角变化。(a)不对称时延差;(b)位置偏差

Fig. 2 Variation of timing deviation with zenith angle under satellite terminal capturing mode for different stations in January. (a) Asymmetric delay deviation; (b) position deviation

图3(a)和(b)分别为在星上终端捕获模式下哈尔滨站、海口站、武汉站和酒泉站在天顶角为 60° 时不对称时延差和位置偏差各月份的变化情况。根据图3可知,对于同一地面站,温度越高,地面站不对称时延差和位置偏差越小。该种变化情况主要因为温度升高时,大气密度降低,大气折射效应减弱。哈尔滨站的变化程度较为剧烈,主要因为其各月份之间温差较大。酒泉站的不对称时延差和位置偏差最小,与武汉站相比,不对称时延差最多相差约 5.1 ps ,位置偏差最多相差约 0.54 cm ,对应约 26.2 ps 的授时偏差。这主要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。

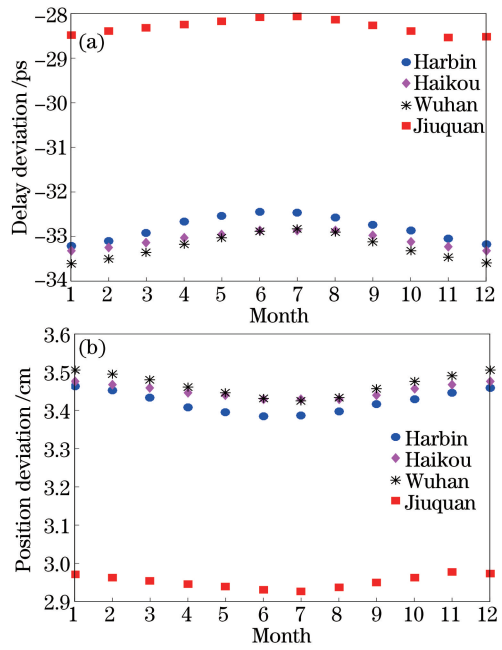


图3 当天顶角为 60° 时,星上终端捕获模式下不同站点各月份授时偏差。(a)不对称时延差;(b)位置偏差

Fig. 3 Timing deviation of different stations under satellite terminal capturing mode in different months when zenith angle is 60° . (a) Asymmetric delay deviation; (b) position deviation

3.2 地面终端捕获模式下不对称时延差和位置偏差分析

图4(a)和图4(b)分别为地面终端捕获模式下哈尔滨站、海口站、武汉站和酒泉站1月份双向链路不对称时延差和位置偏差随天顶角的变化情况。由图4(a)可知,各地面站不对称时延差随天顶角的增大而逐渐增大,整体在纳秒量级内变化,最大约为 3.36 ns 。由图4(b)可知,各地面站位置偏差随天顶角的增大而逐渐增大,整体在几百厘米量级内变化,最大约为 267.62 cm ,对应约 13.11 ns 的授时偏差。

图5(a)和图5(b)分别为哈尔滨站、海口站、武汉站和酒泉站在天顶角为 60° 时不对称时延差和位置偏差各月份的变化情况,不同地面站的变化趋势与星上终端捕获模式大致相同,大气温度越高,大气压强越低,不对称时延差和位置偏差越小。哈尔滨站月份偏差较大,不对称时延差月份偏差最大约为 0.55 ns ,位置差月份偏差最大约为 43.68 cm ,对应约 2.14 ns 的授时偏差。酒泉站和哈尔滨站相比,不对称时延差最多相差约 0.59 ns ,位置偏差最多相差约 47.14 cm ,对应约 2.31 ns 的授时偏差。

从数值上相比,地面终端捕获模式下不对称时延差为几纳秒,而星上终端捕获模式下不对称时延

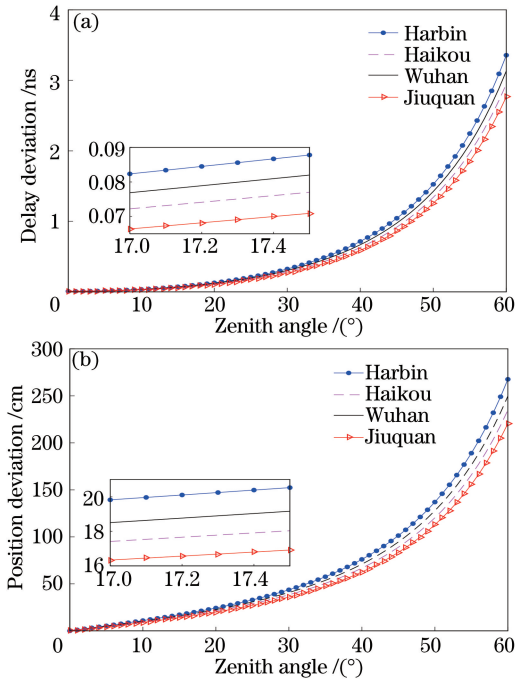


图 4 地面终端捕获模式下不同站点 1 月份授时偏差随天顶角的变化。(a) 不对称时延差; (b) 位置偏差

Fig. 4 Variation of timing deviation with zenith angle under ground terminal capturing mode for different stations in January. (a) Asymmetric delay deviation; (b) position deviation

差为几十皮秒,差别 1 个数量级。本质原因在于对色散起重要作用的是近地端十几千米的稠密大气层区。地面终端捕获模式等效于在地面站以相同天顶角发射两束不同波长的激光,两束光先受到大气层相对剧烈的色散影响再进入 980 多千米的自由空间长距离传输,导致在自由空间中路径差异不断加大。然而,在星上捕获模式下,从卫星传播到地面的过程中只在近地的稠密大气层受色散剧烈影响。因此两种模式下的不对称时延差相差较大。

3.3 精密对准条件下不对称时延差和位置偏差分析

在实际星地激光通信应用中,为满足通信误码率需求,设计捕获跟踪链路时要求双向链路高精度对准。故大气色散引起的位置偏差在工程应用中已被捕获跟踪系统部分校对和消除。

在地面终端捕获模式下,给定地面站接收角度

表 1 地面终端捕获模式下最小位置偏差和不对称时延差

Table 1 Minimum position deviation and asymmetric delay deviation under ground terminal capturing mode

Station	Month	Asymmetric delay deviation / ps	Position deviation / cm	Correction angle / μ rad
Harbin	3	17.64752	-0.07981	55.8
	6	18.75751	-0.18644	50.2
	9	14.08349	0.19992	51.9
	12	16.73951	0.00287	58.5

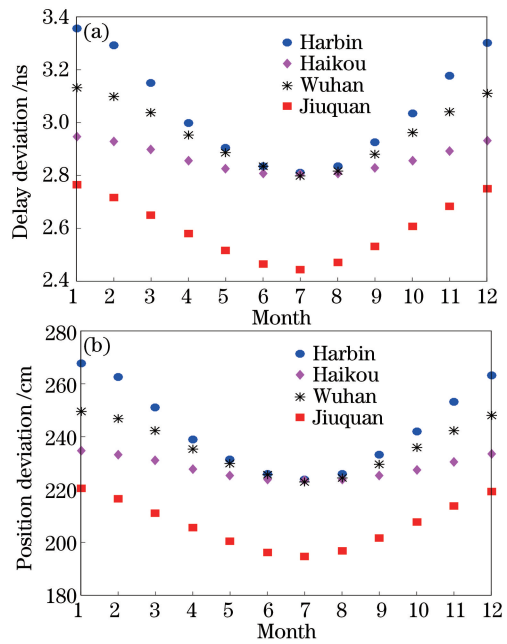


图 5 当天顶角为 60°时,地面终端捕获模式下不同站点各月份授时偏差。(a) 不对称时延差; (b) 位置偏差

Fig. 5 Timing deviation of different stations under ground terminal capturing mode in different months when zenith angle is 60°. (a) Asymmetric delay deviation; (b) position deviation

为授时偏差最大条件下的 60°,上行链路发射角度在 59°~60°范围内进行遍历,步长为 0.1 μ rad,可得出各地面站在不同季度下最小位置偏差以及该位置偏差下的不对称时延差和大气色散修正角度,如表 1 所示。哈尔滨站色散修正角度最大,酒泉站色散修正角度最小,符合上述结论,大气温度越高,大气压强越低,大气折射效应越弱。通过双向链路精密对准后,各地面站不对称时延差在几十皮秒量级内变化,哈尔滨站、武汉站、海口站不对称时延差大致相同,酒泉站不对称时延差最小,可知大气压强对双向链路不对称时延差的影响大于大气温度。由表 1 中数据可知,进一步双向精密对准可在抑制位置偏差的同时减少不对称时延差,但是仍存在数十皮秒不对称时延差。对于双波长高精度空间激光授时系统,即使在激光链路精密对准条件下,仍需针对大气折射效应和链路波长实时校对并消除不对称时延差。

续表

Station	Month	Asymmetric delay deviation /ps	Position deviation /cm	Correction angle / μ rad
Haikou	3	19.14956	-0.18954	51.3
	6	18.13858	-0.11909	49.7
	9	15.55951	0.09161	50.1
	12	19.03956	-0.17373	51.9
Wuhan	3	18.70011	-0.14558	53.8
	6	15.89420	0.06126	50.2
	9	18.18529	-0.11284	51
	12	19.19389	-0.17532	55.1
Jiuquan	3	14.42226	-0.00783	47
	6	14.03284	0.01508	43.7
	9	13.67509	0.05111	44.9
	12	14.46689	-0.00333	48.8

4 结 论

针对不对称时延差和位置偏差进行仿真研究,假设卫星轨道高度为 1000 km,上行链路波长为 815 nm,下行链路波长为 847 nm,得出如下结论:

1)同一地面站在不同月份,大气温度越高,不对称时延差和位置偏差越小。

2)不同地面站海拔高度不同,大气压强越低,不对称时延差和位置偏差越小。

3)采用星上终端捕获方式,不对称时延差在地面站天顶角约为 45°时最小,位置偏差随天顶角的增大而增大,各地面站的不对称时延差在几十皮秒量级内变化,最大约为 -33.6 ps,位置偏差在厘米量级内变化,对应约 171.8 ps 的授时偏差。

4)采用地面终端捕获方式,不对称时延差和位置偏差随天顶角的增大而增大,各地面站的不对称时延差在纳秒量级内变化,最大约为 3.36 ns,位置偏差在几百厘米量级内变化,对应约 13.11 ns 的授时偏差。

5)进一步双向精密对准后各地面站不对称时延差在几十皮秒量级内变化,位置偏差约对应十皮秒的授时偏差。

因此,双波长条件下进行高精度空间激光授时,应针对大气折射率分布模型和链路波长实时校对并消除不对称时延差和位置偏差,授时偏差有望被控制在皮秒量级。

参 考 文 献

- [1] Samain E, Vrancken P, Guillemot P, *et al.* Time transfer by laser link (T2L2): characterization and calibration of the flight instrument [J]. *Metrologia*, 2014, 51(5): 503-515.
- [2] Fridelance P, Samain E, Fridelance P. T2L2-Time Transfer by Laser Link: a new optical time transfer generation [J]. *Experimental Astronomy*, 1997, 7(3): 191-207.
- [3] Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, *et al.* Optical two-way time and frequency transfer over free space [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(6): 434-438.
- [4] Djerroud K, Acef O, Clairon A, *et al.* Coherent optical link through the turbulent atmosphere [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1479.
- [5] Ma J, Tan L Y, Yu S Y. Satellite optical communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 229-230.
马晶, 谭立英, 于思源. 卫星光通信 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 229-230.
- [6] Ding X Y, Lu L, Zhang B F, *et al.* Error analysis of fiber time service using Round-Trip method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 040603.
丁小玉, 卢麟, 张宝富, 等. 光纤 Round-Trip 法授时的误差分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(4): 040603.
- [7] Li X Y, Zhu Y, Lu L, *et al.* Study on high precision disciplined time-frequency transferring experiments through optical fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506004.
李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0506004.
- [8] Vrancken P. Characterization of T2L2 (Time Transfer by Laser Link) on the Jason 2 ocean altimetry satellite and micrometric laser ranging [D]. Nice: Université Nice Sophia Antipolis, 2008.
- [9] Belmonte A, Taylor M T, Hollberg L, *et al.* Effect of atmospheric anisoplanatism on earth-to-satellite time transfer over laser communication links [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15676-15686.
- [10] Samain E, Dalla R, Prochazka I. Time walk compensation of an avalanche photo-diode with a

- linear photo-detection [EB/OL]. 2002 [2018-01-05]. https://cddis.nasa.gov/lw13/docs/papers/detect_samain_1m.pdf.
- [11] 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.
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.
- [12] Torge W, Müller J. *Geodesy* [M]. 4th ed. Berlin: De Gruyter, 2012: 116-117.
- [13] Ciddor P E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(9): 1566-1573.
- [14] Lovell-Smith J. An expression for the uncertainty in the water vapour pressure enhancement factor for moist air [J]. *Metrologia*, 2007, 44(6): L49-L52.
- [15] Chen X M, Zhao Z W. Comparison of water vapor pressure formulas used in tropospheric refraction correction [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2013, 32(6): 479-483.
陈祥明, 赵振维. 对流层折射修正中水汽压公式对比研究 [J]. *飞行器测控学报*, 2013, 32(6): 479-483.
- [16] Toyoshima M, Reyes M, Alonso A, *et al.* Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5338: 1-15.
- [17] Toyoshima M, Takayama Y, Takahashi T, *et al.* Laser beam propagation in ground-to-OICETS laser communication links [J]. *The Journal of Space Technology and Science*, 2007, 23(2): 2_30-2_45.
- [18] Yamakawa S. Expanded laser communications demonstrations with OICETS and ground stations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7587: 75870D.