

引用本文:罗璋嗣,梁晓东. 星间激光时频传递系统中的多普勒频移补偿技术[J]. 光通信技术,2023,47(5):34-36.

星间激光时频传递系统中的多普勒频移补偿技术

罗璋嗣,梁晓东

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:为了减少星间激光时频传输过程中的多普勒频移并提高星间通信的可靠性,提出了一种多普勒频移补偿技术。首先,对多普勒频移进行了理论分析和仿真,得到了两卫星在 24 h 通信中断前传输激光光学频率所产生的多普勒频移;然后,设计了一个多普勒频移补偿系统用于星间激光多普勒频移补偿。仿真结果表明:该系统能在约 15 个控制周期内完成多普勒频移补偿,使得补偿后的多普勒频移小于 8 kHz,比未补偿的情况改善了 6 个数量级。

关键词:激光时频传递;星间激光链路;光学频率;多普勒频移补偿

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)05-0034-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Doppler frequency shifter compensation technology in inter-satellite laser time and frequency transfer system

LUO Zhangsi, LIANG Xiaodong

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to reduce the Doppler shift in the process of time-frequency transmission and improve the reliability of inter-satellite communication, a Doppler shift compensation technique is proposed. Firstly, the Doppler shift is analyzed theoretically and simulated, and the Doppler shift is obtained when the two satellites transmit the laser optical frequency before the communication is interrupted for 24 h. Then, a Doppler shift compensation system is designed for intersatellite laser Doppler shift compensation. The simulation results show that the system can complete Doppler shift compensation in about 15 control cycles, making the compensated Doppler shift less than 8 kHz, which is 6 orders of magnitude better than the uncompensated condition.

Key words: laser time-frequency transfer, inter-satellite laser link, optical frequency, Doppler frequency shifter compensation

0 引言

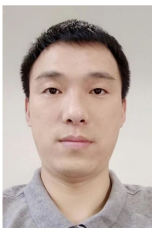
在星间激光时频传输技术中,远距离高精度空间时频传递技术是一项关键技术。通过自由空间链路进行时间频率传递的方案具备传输距离远、覆盖范围广、方便组网的特点,一直受到国内外研究的重点关注^[1-7]。基于微波技术的空间时频传递虽然发展最早,也最成熟,但由于微波传输的系统延迟、对流层和电离层电子数量不确定性的影响,导致稳定精度受限,

无法满足目前超高精度时钟的传递需求。针对未来卫星通信测控系统对高精度的时间频率同步和高抗干扰性的需求,为了充分利用自由激光传输精度高、稳定性好、抗干扰能力强、传输速度快、功耗低的特点,研究基于星间激光的时间频率传递技术已经势在必行^[8]。

在星间激光传输过程中,由于卫星位于不同轨道且存在相对运动,会产生多普勒频移现象,导致大量噪声干扰,严重影响星间激光传输系统的性能与可靠性。文献[9]指出,低地球轨道(LEO)卫星与地球同步轨道(GEO)卫星之间的多普勒频移可达 ± 7 GHz,这超出了典型的光学锁相环的牵引范围。因此,为确保星间通信的可靠性,必须对多普勒频移进行补偿。本文提出一种应用于星间激光时频传递系统中的多普勒频移补偿技术。

收稿日期:2023-07-19。

作者简介:罗璋嗣(1983—),男,广西桂林人,硕士,工程师,主要研究方向为光通信和微电子系统设计。主持高速无线相干光通信测试系统、无线激光通信光学天线研发测试系统、专用光通信设备综合光纤测试系统等项目论证、策划与管理工作。



1 多普勒频移补偿技术

1.1 理论推导

本文采用地心赤道坐标系作为参考,卫星在球面上的经度 λ 和纬度 ϕ 分别满足式(1)和式(2)。

$$\lambda = \Omega_0 + \arctan \left(\frac{\cos i \tan \theta}{\cos \theta} \right) + \begin{cases} -180^\circ, & -180^\circ \leq \theta \leq -90^\circ \\ 0^\circ, & -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \\ 180^\circ, & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$\phi = \arcsin(\sin i \sin \theta) \quad (2)$$

其中, θ 为 t 时刻(从卫星经过升交点位置开始算起的卫星飞行时间)卫星与升交点之间的角距, $\theta = \omega t + \gamma_0$, ω 为卫星绕地球旋转的角速度, γ_0 为卫星的初始相位; i 为轨道倾角, Ω_0 为卫星升交点赤经。

在一般情况下,假设存在 2 颗卫星 A 和 S,其轨道半径分别为 R_A 和 R_S 。为了方便计算,本文引入另一颗卫星 B,它位于卫星 A 的轨道面上(卫星 S 的投影处)。此时,卫星 B 与卫星 S 在天球上的经纬度是相同的。星间链路距离的示意图如图 1 所示。

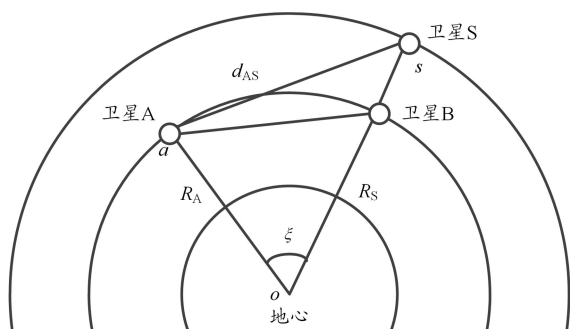


图 1 星间链路距离示意图

根据图 1 所示的几何关系,可以将地心角 ξ 用卫星 A 和卫星 B 的经纬度来表示,如式(3)所示。

$$\xi = \arccos$$

$$[\sin \phi_A \sin \phi_B + \cos \phi_A \cos \phi_B \cos(\lambda_A - \lambda_B)] \quad (3)$$

其中, ϕ_A 、 ϕ_B 分别为卫星 A、卫星 B 的纬度, λ_A 、 λ_B 分别为卫星 A、卫星 B 的经度。

使用余弦定理对 $\triangle aos$ 求解(卫星 A、卫星 S、地心分别位于图 1 中的 a 、 s 、 o 点),可以得到卫星 A 与卫星 S 之间的相对距离 d_{AS} 的表达式为

$$d_{AS} = \sqrt{R_A^2 + R_S^2 - 2R_A R_S \cos \xi} \quad (4)$$

对式(4)按时间 t 求导,就可以得到两卫星距离变化率 d'_{AS} 关于时间 t 的表达式为

$$d'_{AS} = \frac{R_A R_S \sin \xi \xi'}{d_{AS}} \quad (5)$$

其中, ξ' 为 ξ 的求导数。

由于两卫星间的相对运动速度 v_D 与 d'_{AS} 大小相同,方向相反,因此将 $v_D = -d'_{AS}$ 代入式(6)^[10],就可以算出卫星 A 与卫星 S 之间的多普勒频移。

$$f_D = f_c \times \frac{v_D}{c} \quad (6)$$

其中, f_c 为载波频率, c 为光速。

1.2 仿真分析

本文将对某铱星系统中卫星 C 与某中轨卫星系统中卫星 D 进行多普勒频移仿真,仿真时间步长为 1 s,总时长为 24 h。卫星轨道参数设置如表 1 所示^[11]。同时,对一些基本物理参量进行了初始化设置,如地球质量 M 约为 5.965×10^{24} kg,光速 c 约为 299 792 458 m/s,万有引力常量 G 约为 6.67×10^{-11} N·m²/kg²,地球平均半径加大气层高度 R_0 约为 6 441 km。多普勒频移仿真结果如图 2 所示。可以看出,在 24 h 内,卫星 C 与卫星 D 的多普勒频移约为 ± 4 GHz。

表 1 卫星轨道参数

卫星代号	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	升交点赤经/(°)	初始相位/(°)
卫星 C	778	86.4	0	0
卫星 D	8 042	45	38	30

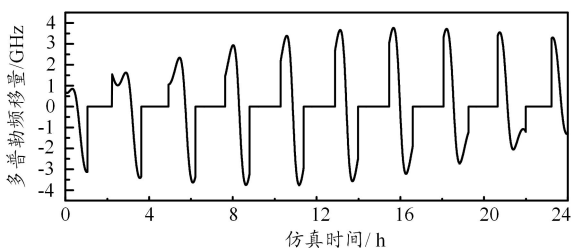


图 2 卫星 C 与卫星 D 在 24 h 内的多普勒频移仿真结果

根据仿真计算,从 2 颗卫星开始运动到第一次中断通信的时间为 3 776 s,因此计算卫星 C 与卫星 D 在 1 h 内所传递光学频率(设置初值为 193 THz)的多普勒频移如图 3 所示。可以看出,在 1 h 内,卫星 C 与卫星 D 多普勒频移约为 3.8 GHz。

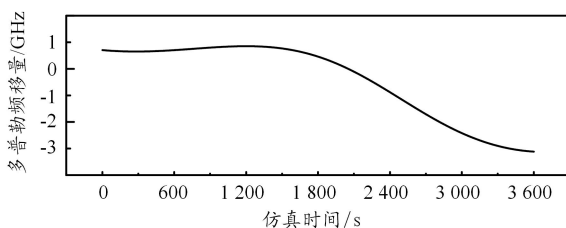


图 3 卫星 C 与卫星 D 在第一次中断通信前传输激光光学频率多普勒频移仿真结果

罗璋嗣,梁晓东:星间激光时频传递系统中的多普勒频移补偿技术

由图2和图3可知,无论是24 h还是1 h,上述多普勒频移都超出了典型的光学锁相环的牵引范围。因此,为确保星间通信的可靠性,必须对多普勒频移进行补偿

1.3 补偿系统设计

为了稳定传输卫星C与卫星D链路间的载波,本文设计了如图4所示的光学频率多普勒频移补偿系统。

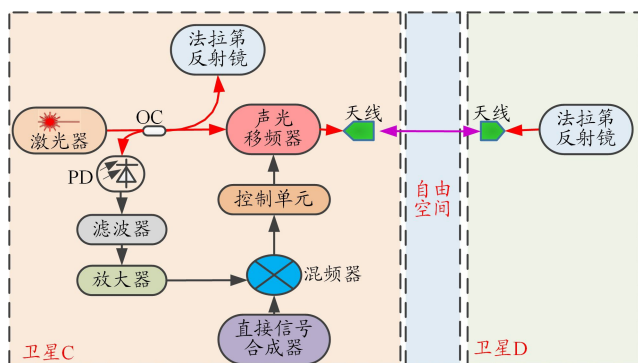


图4 光学频率传递多普勒频移补偿系统原理框图

卫星C中激光器将发射一束激光,经过光纤耦合器(OC)分成2束:一束直接经法拉第反射镜反射回光电探测器(PD);另一束经过声光移频器进行光学频率移频后,通过光学天线耦合至自由空间进行发射,随后由卫星D上的光学天线再次耦合接收,并经由法拉第反射镜再次沿原路反射回卫星C。这束经过往返传输的激光携带有链路二倍的噪声,即二倍的多普勒频移,与前述的另外一束激光在卫星C的PD中进行拍频探测,得到了链路二倍的多普勒频移噪声。该拍频信号经滤波、放大后与声光移频器的驱动频率源信号(由直接信号合成器产生)进行混频,并被输入到控制单元。控制单元使用常用的比例-积分-微分(PID)算法,对声光移频器的频移进行实时调控,以实现自由空间中光学频率传递过程中多普勒频移的有效补偿。

卫星C与卫星D间的多普勒频移补偿结果如图5

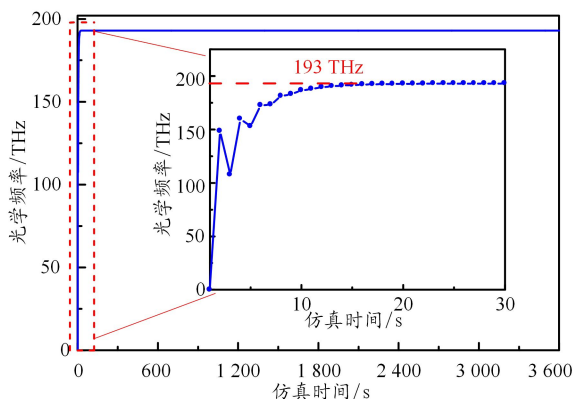


图5 自由空间光学频率多普勒频移补偿结果图

所示。可以看出,在仿真时间约为15 s时,控制单元完成了对光学频率的跟踪锁定。本文的仿真时间步长为1 s,因此通过本文的补偿方案,经过约15个控制周期,即可实现对自由空间中光学频率传输的多普勒频移进行补偿。补偿后的多普勒频移小于8 kHz,与未补偿的多普勒频移(± 4 GHz)相比,其精度提高了约6个数量级。

2 结束语

本文针对星间激光时频传递系统中的多普勒频移进行了理论分析和模拟,提出了一种用于星间光时频传递系统的多普勒频移补偿技术,并对星间激光光学频率传输过程中的多普勒频移进行了实时补偿。经过补偿后,补偿系统约在15个控制周期内实现系统锁定,多普勒频移小于8 kHz,与未补偿情况相比,性能提升了6个数量级。

参考文献:

- [1] 陈法喜,孔维成,赵侃,等.高精度长距离光纤时间传递的研究进展及应用[J].时间频率学报,2021,44(4):266-278.
- [2] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. Metrologia, 2014, 51: 174-182.
- [3] NICHOLSON T L, CAMPBELL S L, HUTSON R B, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at $2e-18$ total uncertainty[J]. Nature Communications, 2015(6): 6896-6896.
- [4] 张安旭.基于光纤的稳相传输技术研究[D].北京:北京邮电大学,2015.
- [5] 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.
- [6] DESCHENES J D, SINCLAIR L C, GIORGETTA F R, et al. Synchronization of optical oscillators over a free-space link at the femtosecond level [C]. 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, USA. San Jose: IEEE, 2015: 15380677-1-15380677-8.
- [7] KANG J, SHIN J, KIM C, et al. Few-femtosecond resolution characterization and suppression of excess timing jitter and drift in indoor atmosphere frequency comb transfer[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 26023-26031.
- [8] 侯冬,张大年,孙富宇,等.高精度自由空间时间与频率传递研究[J].时间频率学报,2018,41(3):219-227.
- [9] 单风华.空间相干激光通信系统多普勒补偿技术[C].长春:长春理工大学,2014.
- [10] 朱勇,武欣嵘,李玉权.星间激光链路的多普勒频移研究[C]//中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会,中国通信学会光通信委员会,中国电子学会通信学分会.全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议论文集.广州:暨南大学出版社,2005.
- [11] 王克锋,何翔宇,赵洪利.卫星星间链路多普勒频移仿真[J].无线电工程,2007(3):36-38.