

论 文

北斗全球卫星导航系统专题



基于激光通信链路的星间时间同步技术

朱福南1,27, 周黎莎3,4,57, 孙建锋1,2*, 陈卫标1,2*

- 1. 中国科学院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;
- 2. 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800;
- 3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
- 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
- 5. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203
- *联系人, 孙建锋, E-mail: sunjianfengs@163.com; 陈卫标, E-mail: wbchen@mail.siom.ac.cn †同等贡献

收稿日期: 2020-06-24; 接受日期: 2020-09-24; 网络出版日期: 2020-12-11 国家自然科学基金重大项目(编号: 91938302)资助

摘要 时间同步技术对于导航、定位、授时都有重要作用,是空间应用领域的热门方向. 激光通信技术具有通信容量大、保密性和抗干扰性强等优点,因此受到越来越广泛的应用. 本文提出了基于激光通信链路的时间同步技术,通过数据帧头实现粗测距,通过接收时钟相位实现精测距. 通过理论分析,获得了基于激光通信链路的时间同步精度的理论极限,并进行模拟仿真计算. 在双向单程测距条件下,1 Gbps通信速率时可以获得毫米级的测量精度和皮秒级的时间同步精度. 采用BPSK相干通信体制,在实验室进行了基于激光通信链路的时间同步试验,结果符合理论预期.

关键词 激光通信,时间同步,激光链路,同步精度

PACS: 07.60.Vg, 07.87.+v, 42.62.Eh

1 引言

随着人类活动区域的增加,人类对时间、空间的计量精度要求越来越高.近年来原子钟的发展对时间的计量精度有了质的提升.空间原子钟技术直接推动了全球卫星导航定位系统的发展,目前正在运行的系统包括GPS系统、北斗系统、GLONASS系统和伽利略系统等,均具备了实现全球定位、导航和授时的能力.

目前的导航定位系统各个卫星的时钟并没有实现

同步功能.通过高精度的星间链路可以实现卫星系统内部的时间同步,通过长时间不间断连接还有可能摆脱每个卫星平台安装原子钟的精度要求,通过远程链路驯服技术实现全网时间的高精度统一^[1-8].

美国的GPS系统是目前部署最早,应用最为广泛的全球卫星导航系统,在GPS IIR-M卫星上率先采用了超高频(Ultra High Frequency, UHF)星间链路技术,其工作频率为250-290 MHz,采用时分工作体制,设计目标为在无地面支持情况下,能够维持180 d内自主运

引用格式: 朱福南, 周黎莎, 孙建锋, 等. 基于激光通信链路的星间时间同步技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019517
Zhu F N, Zhou L S, Sun J F, et al. Time synchronization based on intersatellite laser communication links (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019517, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0230

© 2020 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

行,星载钟的维持误差约为6 ns. 俄罗斯在其GLO-NASS-M卫星上也设计星间链路,采用的是S频段载荷,采用时分和频分结合的通信体制,测距采用宽波束和分组相结合的测距方式,测量精度可以小于0.5 m. 我国北斗全球卫星导航系统为了弥补国内监测网的不足,同时为了实现卫星自主导航,在北斗三号卫星上设计了Ka频段星间链路^[9]. 北斗Ka星间链路采用同频时分体制,能够实现星间及星地间的测距与通信. 我国的北斗全球导航系统已经搭载了基于Ka的星间链路载荷,用于实现星间数据和时间测量比对,获得了很好的应用效果. 激光星间链路由于具有通信速率高、信噪比高、抗干扰能力强等优点,是未来星间链路的发展方向之一.

本文重点研究了基于激光通信链路的时间同步技术,推导了时间同步的基本原理,分析和仿真了信噪比、通信速率、接收功率等因素对时间测量精度的影响,对于实际应用具有重要意义.

2 基于激光通信链路时间同步原理

卫星激光通信将信息加载到光载波上,常见的调制方式有OOK,BPSK,DPSK等,以BPSK调制通信为例,可以表示为

$$E_1(t) = A_1(t) \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t + \pi \cdot m(t) + \varphi_1(t)], \tag{1}$$

其中, f_c 为激光载波频率, $\varphi_1(t)$ 为发射激光载波的相位噪声, m(t)为调制的信息、表示为

1比特信息的持续时间 T_b 为通信速率 R_b 的倒数,即

$$T_{\rm b} = \frac{1}{R_{\rm b}}.\tag{3}$$

如图1所示,通信发射比特序列由发射时钟决定,时钟信号周期与通信比特持续时间 T_b 相同,时钟信号的上升沿与信息比特的中心对齐.

在进行时间同步时,将发射时钟与卫星平台基准时钟的时钟频率同源,且相位保持恒定,发射时钟的上升沿与秒脉冲上升沿对齐.这样,发射信息经过调制后就携带了本地卫星平台的时间信息.为了避免远距离测量时的距离模糊问题,通过在数据帧中添加特

殊的测距帧实现远距离的距离测量和时间同步.

典型的基于通信链路的帧格式如图2所示.

根据CCSDS建议, 帧同步头选用0x1ACFFC1D, 总帧长为1024字节, 秒内帧计数从秒脉冲的上升沿置零,随后进行逐帧累加. 秒计数从零开始累加, 累加至255时再从零继续累加, 源地址和目的地址用于识别不同的激光终端,每个激光终端对应一个唯一的地址, 测量需要的补偿信息与地址绑定, 插入域用于传输实时性要求比较高的信息, 数据为星间通信传输的有效信息, 校验采用累加校验方式.

时间同步采用双向单程时间差测量的方式实现, 具体如图3所示.参与同步的激光终端用A和B表示,分 别安装在两颗不同的卫星上.双方约定秒脉冲的上升 沿与帧同步头的最后一个比特的下降沿对齐,帧同步

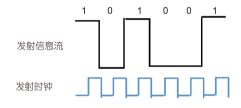


图 1 (网络版彩图)激光通信信息与时钟关系

Figure 1 (Color online) The relationship between information and transmit clock.

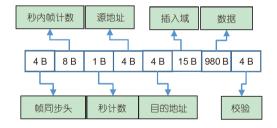


图 2 (网络版彩图)基于激光通信链路时间同步数据帧格式 Figure 2 (Color online) Data frame for the time comparison based on laser communication links.

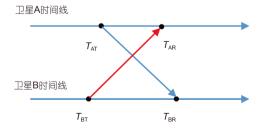


图 3 (网络版彩图)双向单程时间同步原理

Figure 3 (Color online) The scheme of two one-way time transfer.

头最后一个比特发送出去后开始计时,记为 T_{AT} 和 T_{BT} ,当接收到秒内帧计数相同的帧同步头后停止计时,记为 T_{AR} 和 T_{BR} ,同时需要记录该帧对应的秒计数 N_{A} 和 N_{B} .

采用通信链路进行时间同步的具体步骤如下.

- (1) 记录原始四个时刻数据, T_{AT} 和 T_{BT} , T_{AR} 和 T_{BR} . 在记录接收时刻配对时,需要查看秒计数和秒内帧计数,为简单起见,秒内帧计数为零时发送测距帧.
 - (2) 计算各自时间差

$$\Delta T_{\rm A} = T_{\rm AR} - T_{\rm AT},$$

$$\Delta T_{\rm B} = T_{\rm BR} - T_{\rm BT}.$$
(4)

(3) 计算两个卫星的时间差

$$\Delta T = \Delta T_{\rm A} - \Delta T_{\rm B}.\tag{5}$$

(4) 调整卫星B的时间, 调整后的时间表示为

$$T_{\rm B} = T_{\rm B} - \Delta T. \tag{6}$$

此时, 完成了卫星A和卫星B的整秒对齐.

(5) 重复上述步骤, 可以持续实现两个卫星的时间同步.

根据帧协议, 测量的模糊距离为

$$L_{\text{max}} = 256 \cdot c,\tag{7}$$

其中, c为光速. 可以满足近地空间的所有测量需求.

3 基于激光诵信链路高精度时间测量原理

从第2节可以看出,时间传递的精度取决于时间测量的精度.根据时间同步过程,发射时刻与秒脉冲同步,所以发射时刻不需要测量,均为整秒时刻,其核心和难点在于接收时刻的测量.

接收时刻的测量采用与通信发射相同的时钟进行测量计时,测量分为粗测距和精测距两部分,粗测距采用匹配滤波算法,可以表示为

$$R_{AB}(n) = \sum_{m=n-31}^{n} D_{R}(m) D_{LO}(m), \tag{8}$$

其中, $D_{\rm R}(m)$ 为接收到的A星发来的二进制数据流, $D_{\rm LO}(m)$ 为B星预先存储的二进制测距同步头.

当 $R_{AB}(n) \ge 30$ 时,实现了接收帧头的同步,查看秒内帧计数和秒计数,如果与约定帧计数和秒内帧计数一致,记录该时间为接收粗时刻.

粗时刻的准确度与通信速率有关,时刻的计时单位为通信速率的倒数,表示为

$$\Delta T_{\rm c} = \frac{1}{R_{\rm h}}.\tag{9}$$

当通信速率为 R_b =1 Gbps时,粗时刻的准确度为 1 ns. 为了进一步提升时间测量的准确度,需要进行码相位的测量,借助通信系统的时钟恢复技术,恢复的时钟与接收的数据之间存在固定的关系,即恢复时钟的上升沿与数据波形的中心对齐,因此可以进一步通过比较接收恢复时钟和本地发射时钟之间的相位差实现精时刻的测量,精时刻可以表示为

$$\Delta T_f = \frac{\Delta \varphi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{R_b}.$$
 (10)

最终的时刻由粗时刻和精时刻共同组成, 表示为

$$T_{\rm RA} = \left(N_{\rm A} + \frac{\Delta \varphi_{\rm A}}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \frac{1}{R_{\rm b}},$$

$$T_{\rm RB} = \left(N_{\rm B} + \frac{\Delta \varphi_{\rm B}}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \frac{1}{R_{\rm b}}.$$
(11)

测量相位精度取决于时钟恢复精度,从时钟恢复的理论出发,时钟恢复精度与发射端和接收端时钟的抖动及锁相环的带宽有关。用于时间同步的时钟噪声可以忽略,本文只考虑锁相环带宽的影响。时钟恢复锁相环 B_{CLK} 的带宽应大于测量带宽。此时的测量精度可以表示为

$$\delta_T = \frac{1}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{h \cdot v \cdot B_{\text{CLK}}}{\eta_q \cdot \eta_h \cdot \eta_{\text{CLK}} \cdot P_r}},$$
(12)

其中, h为普朗克常数, v为激光频率, η_q 为量子效率, η_h 为外差效率, η_{CLK} 为信号跳变概率, P_r 为接收光功率.

从上式可以看出,时间测量精度与通信速率成反比,与接收光功率成反比.采用激光链路后,通信速率可以达到Gbps以上,由于要达到低误码率,此时接收光功率就会很强,因此可以获得很高的测量精度.

对于一般的通信系统,要求通信误码率小于 1×10⁻⁹, 误码率与信噪比的关系为

$$P_{\rm b} = \operatorname{erfc}(\sqrt{2 \cdot \operatorname{SNR}}),\tag{13}$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{x}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} \cdot dy, \tag{14}$$

其中, erfc(x)为互补误差函数, SNR为信噪比, 表示为

$$SNR = \frac{\eta_{\rm q} \cdot \eta_h \cdot P_{\rm r}}{h \cdot \nu \cdot R}.$$
 (15)

此时对应的测量精度变为

$$\delta_T = \frac{1}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{B_{\text{CLK}}}{\text{SNR} \cdot R_b \cdot \eta_{\text{CLK}}}}.$$
 (16)

为了提升信号跳变概率,通信系统中通常会有加扰处理,用于提升 η_{CLK} . 从上式可以看出测量精度与通信速率、信噪比、时钟跳变概率成反比,与时钟恢复环路带宽成正比.

根据用户要求,误码率为1×10⁻⁹时的信噪比需要大于9.35. 因此在通信测量一体化时,信噪比总大于该值.

以通信速率 R_b =1.0 Gbps, B_{CLK} =1 kHz, η_{CLK} =0.2, 此时信噪比和测量精度关系如图4所示. 从图中可以看出,当信噪比为9.35时,时间测量精度可以达到0.7313 ps.

在信噪比一定时,时间测量精度与通信速率的关系如图5所示. 此时选择信噪比SNR=9.35, 保证1×10⁻⁹的通信误码率.

4 实验验证

采用第2节的激光通信测量一体化的原理进行实验室测试实验.参与实验的设备为两个独立的通信测量一体化模块.具体连接关系如图6所示,实验参数如表1所示.

为了测量时间同步精度,通信测量一体化模块共 用一个原子钟,这样避免了由于不同源时钟带来的测量误差.

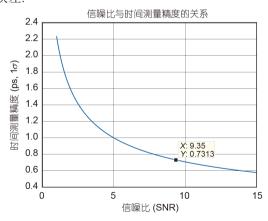


图 4 (网络版彩图)信噪比与时间测量精度的关系 Figure 4 (Color online) The relationship between SNR and time measurement precision.

实验过程中更换了两档通信速率,分别为1048.576和104.8576 Mbps,两档通信速率下的测量结果如表2和3所示.从实验结果分析可以得到两档通信速率下的测量精度分别为2.95和12.68 ps,通信误码率分别为3.7×10⁻⁴和3.1×10⁻³.从测量结果上可以看出,在相同通信误码率下,通信速率越低,测量精度越差,这一点与理论预期完全一致.

表格中测量结果的单位均为比特时间长度,转换时需要乘以该值.测距精度为时间测量精度乘以光速,分别为0.885和3.804 mm.

5 讨论和结论

本文理论分析了基于激光通信链路进行时间比对 方法,并进行了仿真分析. 结果表明在1 Gbps通信速率

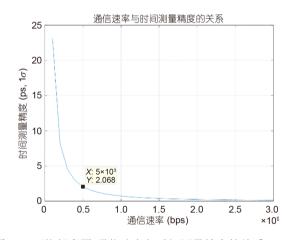


图 5 (网络版彩图)通信速率与时间测量精度的关系 Figure 5 (Color online) The relationship between data rate and time measurement precision.

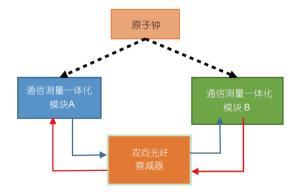


图 6 (网络版彩图)双向单程通信测量一体化实验

Figure 6 (Color online) Two one-way communication measurement setup.

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

序号	参量	参数	备注
1	工作波长	1549.72 nm 1550.52 nm	发射 接收
2	通信方式	BPSK调制零差相干探测	
3	通信接收功率	-58 dBm@1048.576 Mbps -67 dBm@104.8576 Mbps	灵敏度极限
4	通信速率	1048.576 Mbps 104.8576 Mbps	
5	帧同步头	0x1ACFFC1D	
6	频率源	铷原子钟	Navtf2000

表 2 通信速率为1048.576 Mbps时的测量结果

Table 2 The measurement results at 1048.576 Mbps data rate

测量序号	时间差 (bit)
1	-0.0224
2	-0.02942
3	-0.01868
4	-0.02522
5	-0.02537
6	-0.02669
7	-0.02215
8	-0.02342
9	-0.02564
标准差	3.09×10^{-3}

表 3 通信速率为104.8576 Mbps时的测量结果

Table 3 The measurement results at 104.8576 Mbps data rate

标准差	时间差 (bit)
1	0.00439
2	0.003039
3	0.004145
4	0.004506
5	0.003794
6	0.002088
7	0.002623
8	0.000387
9	0.002619
标准差	1.33×10^{-3}

下可以获得优于1 ps的时间测量精度,在实验室条件下开展了实际性能测试,测试结果表明,激光通信测量一体化技术可以同时解决高速率通信和高精度测量问题,对于实际应用具有重要指导意义.

需要指出的是,本文的测量量为星间伪距值,实际

时间同步精度还与激光通信终端的发射时延、接收时延、卫星平台相对运动、装载平台的非刚性等因素有关.要达到本文的皮秒级精度,在进行时间高精度同步时还需要考虑相对论效应,具体补偿方法在其他论文中已有论述,可参考文献[10].

参考文献_

- 1 Kang J, Shin J, Kim C, et al. Few-femtosecond-resolution characterization and suppression of excess timing jitter and drift in indoor atmospheric frequency comb transfer. Opt Express, 2014, 22: 26023–26031
- 2 Zhou S S, Hu X G, Liu L, et al. Status of satellite orbit determination and time synchronization technology for global navigation satellites system (in Chinese). Acta Astron Sin, 2019, 60: 59–68 [周善石, 胡小工, 刘利, 等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展. 天文学报, 2019, 60: 59–68]
- 3 Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system. Sci China-Phys Mech Astron, 2020, 63: 269511
- 4 Wang C H, Zhou M C. Novel approach to intersatellite distance measurement with high accuracy. J Guid Control Dyn, 2015, 38: 944-948

- 5 Schütze D, Stede G, Müller V, et al. Laser beam steering for GRACE follow-on intersatellite interferometry. Opt Express, 2014, 22: 24117–24132
- 6 Swann W C, Giorgetta F R, Sinclair L C, et al. Free-space optical time-frequency transfer over 2 km. In: Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics: 2013, OSA Technical Digest (online). San Jose: Optical Society of America, 2013. CM4N.4
- Bigelow M S, Guidice R, Martin K, et al. Free-space optical time transfer between an atomic frequency standard and a simple optical clock. In:

 Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics: 2019, OSA Technical Digest (online). San Jose: Optical Society of America, 2019.

 STh3G 1
- 8 Giorgetta F R, Swann W C, Sinclair L C, et al. Performance analysis of optical free-space two-way time-frequency transfer. In: Proceedings of the Advanced Solid-State Lasers Congress: 2013, OSA Technical Digest (online). Paris: Optical Society of America, 2013. LM2B.4
- 9 Gao T. Research on Time Synchronization Method Based on Ka Inter-Satellite Link (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2019. 1–5 [高天. 基于Ka星间链路的时间同步方法研究. 硕士学位论文. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2019. 1–5]
- 10 Xie Y. Relativistic time transfer for inter-satellite links. Front Astron Space Sci, 2016, 3: 1-6

Time synchronization based on intersatellite laser communication links

ZHU FuNan^{1,2†}, ZHOU LiSha^{3,4,5†}, SUN JianFeng^{1,2*} & CHEN WeiBiao^{1,2*}

Time synchronization is essential for navigation, positioning, and timing services. It is widely used in space applications. Laser communication technology is widely used and has the advantages of large communication capacity, strong confidentiality, and anti-interference. In this paper, a time synchronization technique based on laser communication links is proposed. Estimate ranging was realized using the data frame head, and precise ranging was realized by receiving the clock phase. Through theoretical analysis, the theoretical limit of time synchronization accuracy based on laser communication links was obtained, and simulation was performed. Millimeter-level measurement accuracy and picosecond-level time synchronization accuracy can be obtained at a communication rate of 1 Gbps under two-way and one-way ranging conditions. A time synchronization test based on laser communication links was conducted in a laboratory using a coherent binary phase shift keying communication system; test results are consistent with theoretical expectations.

laser communication, time synchronization, laser link, synchronization precision

PACS: 07.60.Vg, 07.87.+v, 42.62.Eh

doi: 10.1360/SSPMA-2020-0230

¹ The Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² The Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵ Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China