

基于微波光子融合的时频数据一体化传输技术

李昌瑾^{1,2}, 刘海锋^{1,2}, 韩航程³, 闫宝罗^{1,2}, 李晓龙^{1,2}, 林 炜^{1,2}, 刘 波^{1,2*}

(1.南开大学 现代光学研究所,天津 300350;

2.天津市光电传感器与传感网络重点实验室,天津 300350;3. 北京理工大学 信息与电子学院,北京 100081)

摘要:高精度、高稳定性的时频信号传输是在轨卫星能够正常工作的可靠保证,传统的采用冗余编码方式进行的时频传递系统传输链路带宽均在吉比特每秒以上。设计了一种新型时频传输系统,在带宽受限条件下对编码和解码方式进行了优化设计,实现在 5 MHz 链路带宽下的频标信号高精度传输,并利用微波光子融合技术实现了时频的高精度传递。结果显示该时频传输系统达到了 1.65 ns 的时间抖动和 $1.39 \times 10^{-11}/s$ 、 $3.45 \times 10^{-12}/(10\text{ s})$ 的频率稳定度。

关键词:光通信;时频传递;微波光子融合

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)09-0048-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Integrated transmission technology of time-frequency data based on microwave photon fusion

LI Changjin^{1,2}, LIU Haifeng^{1,2}, HAN Hangcheng³, YAN Baoluo^{1,2}, LI Xiaolong^{1,2}, LIN Wei^{1,2}, LIU Bo^{1,2*}

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin key Laboratory of photoelectric sensor and sensor network, Tianjin 300350, China; 3. School of information and electronics, Beijing institute of technology, Beijing 100081, China)

Abstract: High-precision and high-stability time-frequency signal transmission is a reliable guarantee for the normal operation of on-orbit satellites. The transmission link bandwidth of time-frequency transmission system using redundant coding method is above Gb/s level. In this paper, a new time-frequency transmission system is designed, which optimizes the encoding and decoding methods with limited bandwidth, and achieves high-precision transmission of frequency standard signals under the bandwidth of 5 MHz link. The high precision transmission of time-frequency is realized by microwave photon fusion. The results showed that the time jitter of the time-frequency transmission system reached 1.65 ns and the frequency stability of $1.39 \times 10^{-11}/s$ and $3.45 \times 10^{-12}/(10\text{ s})$.

Key words: optical communication; time-frequency transmission; microwave photon fusion

0 引言

授时是指利用无线电波发射标准时间信号的工作。授时技术解决两大问题:第一是频率信号传输,即解决时钟快慢问题;第二是时间信号传输,即解决时钟对齐问题。近年来,光网路发展迅速,应用光网络进行时频传输,传输损耗小、可靠性高,能够达到 $1 \times 10^{-15}/s$ 的水平。

基金项目:科技部重点研发项目(2018YFB1802302)资助。

作者简介:李昌瑾(1996—),男,硕士研究生,2018 年于长春理工大学获得理学学士学位,现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业,主要研究方向为自由空间光通信及相参时频同步。参与多项国家项目。注重面向国家重大需求和战略开展研究工作。

* 通信作者:刘波(Email: liubo@nankai.edu.cn)。



$10^{-15}/s$, 可用于传输高稳定的原子钟产生的频率信号^[1-5]。

在近年来的诸多国际重大科学仪器项目中都拟采用光信号实现频率传输和时间同步。2012 年,欧盟启动的联合研究项目“NEAT-FT”目标建设一个频率传输稳定度优于 $1 \times 10^{-17}/d$, 时间同步精度优于 100 ps 的时频光纤同步网络。澳大利亚等国也计划利用光纤替代电缆实现平方公里天线阵列(SKA)的相位同步。2012 年,美国阿拉巴马汉茨维尔大学的 J.Nie 等人利用半导体激光器在 60 m 的大气中调制 80 MHz 的射频频率信号,频率传输稳定度达到 $1 \times 10^{-10}/s$ 。2015 年,美国国家标准与技术研究院的 F. R. Giorgetta 等人^[6]在传输距离 4 km 的条件下,将时间同步精度提高到

4 fs/min、50 fs/40 h。可以看出, 利用光信号实现时频同步在国际上的热度很高, 涉及越来越多的重大项目, 用以传输高稳定的原子钟产生的频率信号。但是, 这些研究并没有考虑到链路带宽的实际占用情况, 在实际带宽受到限制的条件下进行时间同步时, 性能与带宽之间的取舍需要综合考虑。

为此, 本文提出一种基于微波光子融合的新型集成化平台间时频传输系统, 对时频信息进行调制后通过自由空间链路(FSL)实现时钟同步。

1 系统时频传输原理

本文时频传输系统单向工作原理如图 1 所示。基于本地 100 MHz 时钟基准, 主站利用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)从码表中读出伪码, 在带宽受限条件下对时频信号和数据信息进行调制, 产生二进制开关键控(OOK)伪码调制信号, 该信号通过激光器发射进入自由空间传输。辅站光电探测接收并放大整形信号后, 进行捕获及解码工作: 辅站将接收到的伪码序列与本地码序列进行相关运算, 利用伪码具有良好的自相关特性获得信号中包含的主站发送时间戳, 从而实现时频传输。

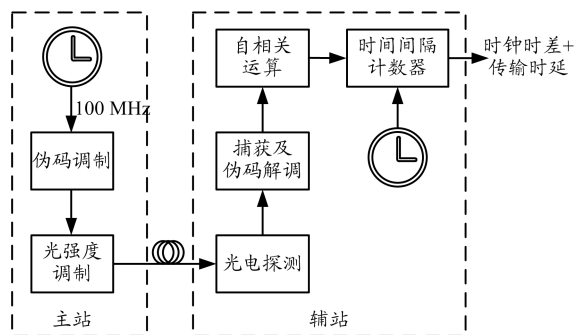


图 1 单向工作原理示意图

实际上, 在上述时频传输单向系统中, 将辅站收到的主站时间戳与辅站时钟进行比较得到时钟时差与传输时延之和, 而 FSL 中的传输时延受到大气湍流等多方面因素的影响, 难以预测。因此, 本文采用了双向时频传输技术(TWTFT), 即在时间同步过程中, 主站时频信号发送到辅站的同时将辅站时频信号发回主站, 得到 4 个时间戳(按主站时钟记录的发射时戳 T_{AA} 、按辅站时钟记录的接收时戳 T_{AB} 、按辅站时钟记录的发射时戳 T_{BB} 和按主站时钟记录的接收时戳 T_{BA})。这个过程如果在 400 μ s 内完成^[7], 2 个时频信号在光链路中经过了相同的空间湍流, 因此有相同的链路延迟。本文可以计算主站和辅站的时钟时差 ΔT_{AB} :

$$\Delta T_{AB} = \frac{T_{BA} - T_{AA}}{2} - \frac{T_{AB} - T_{BB}}{2} - \Delta T_{cal} \quad (1)$$

其中, ΔT_{cal} 为固定的接收器延迟。

1.1 时频调制单元

主站与辅站的时频调制单元采用相同的结构, 由定时模块、码片定时脉冲产生模块、伪码产生模块、数据生成模块、扩频与调制模块和数据缓存及重采样模块 6 个部分组成, 模块设计如图 2 所示。

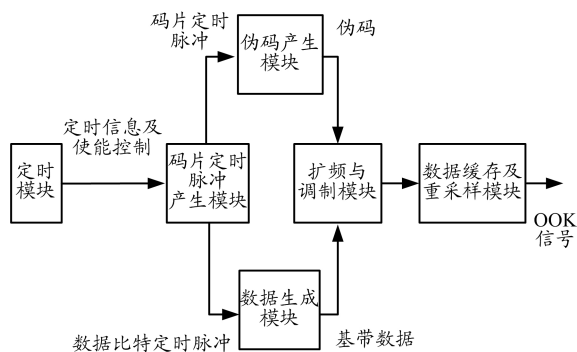


图 2 时频调制单元结构图

在发射端, 定时模块用来产生定时信息, 包括本地秒脉冲、本地秒计数器和本地数据比特定时脉冲(10 ms 脉冲)、本地数据比特计数器。据此构建发射端时间系统, 作为数据收发、时钟同步的时间标准。另外, 根据静态码表产生毫秒定时脉冲、毫秒计数和 10 ms 内时钟周期计数的这些信息将作为标记同步脉冲到来时刻的时间标准。码片定时脉冲产生模块产生发送伪码定时脉冲以及数据比特定时脉冲, 作为生成伪码和基带数据的时钟基准。获得伪码及基带数据后, 在扩频与调制模块利用伪码对基带数据进行扩频, 得到 10 Mb/s 通信速率下的原始码元, 包含巴克码、测控帧头、时间戳、自检信息和控制信息等测控自用信息。扩频之后的信号将存入随机存取存储器(RAM)中等待发送时延模块在扰码模块插入一定长度扰码之后进行发送。原始码元送入数据缓存及重采样模块中, 产生 OOK 信号输出, 实现时间同步信息的伪码调制。

1.2 时频解调单元

本时频传输系统采用基于 OOK 的直接序列扩频技术(DSSS)。接收端模/数(A/D)转换器采样后得到的信号采样率为 100 MHz, 该信号是不含载波信息的基带信号, 可以直接在接收到扩频信息后进行捕获及解码工作。其中, 捕获是指利用伪码良好的自相关特性, 对接收到的伪码信号中的时频信息进行提取, 分为粗捕获和细捕获 2 个阶段。

◆粗捕获只需要获得信号大概的相位信息, 对 A/D 接收信号进行降采样后, 通过与本地伪码进行滑动卷积找到最大相关峰的位置, 并计算最大相关峰的峰均比值, 如果连续 3 次的峰均比值均大于门限则认为捕获成功。完成粗捕获后, 得到误差不超过 0.5 码片的粗捕获结果, 这一结果将会在下一次信号伪码相位到达起始位置时送入细捕获模块, 进一步减小误差。

◆细捕获以码片为单位, 为了降低码相位误差, 按照本地伪码与粗捕获得的码片头位置关系, 将本地伪码分别超前(或滞后)1~5 位, 对粗捕获数据头与本地伪码进行自相关运算, 得到 11 个相关结果, 取其中的最大值作为细捕获的结果。细捕获示意图如图 3 所示。细捕获将捕获的码相位误差降低到 0.1 码片。细捕获完成后将会给出标志信号, 进行后续的数据解调(即解码)。解码是指在捕获过程找到接收端收到的数据的准确位置后, 通过对伪码进行解调, 获得测控信息的起始位置, 还原出未经扩频的原始通信数据和用于信号跟踪的再生伪码。其具体步骤包括: 在细捕获阶段结束后, 使用频率控制字生成一串与收到的扩频数据每个码片位置对齐的脉冲信号; 然后接收信号与

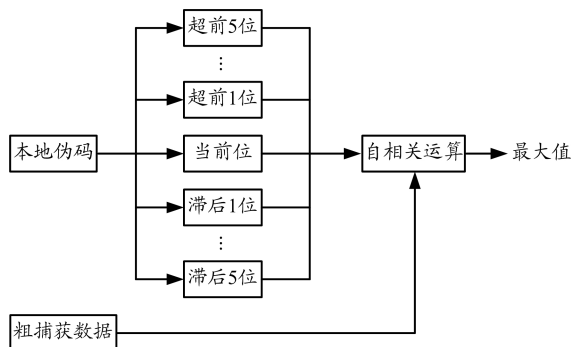


图3 细捕获结构示意图

本地伪码做卷积运算, 当解码得到的原始发射信息连续 7 位为巴克码 1110010 时, 即找到了测控信息的起始位置; 继续还原出原始通信数据(包括原始测控信息和原始用户信息)。

2 基于 FSL 的时间同步硬件系统

时间同步系统按照功能单元可以将主站和辅站分解为 3 个单元: 激光收发单元、时钟数据处理单元和时钟比对单元, 时间同步系统硬件设计如图 4 所示。激光收发单元为激光前端, 实现激光发射和接收功能; 时钟数据处理单元主要由主站和辅站组成, 负责激光信号 OOK 调制和时钟数据伪码解调等处理分析, 通过对比主站时钟与辅站时钟, 获得实际链路抖动信息, 实现对远端时钟的校准; 时钟比对单元是收到时钟数据后通过该单元进行鉴相运算和数据分析, 实现对异端时钟的同步。

2.1 激光收发单元

发射与接收单元的主要元件有激光器和光电探测器。光调制器将时钟信息通过 OOK 调制的方式加载到激光器中, 激光器发射的激光脉冲通过 FSL 传输后被光电探测器接收, 完成时钟信息的发射与接收。在该系统中, 本地端与远端各有 1 套发射与接收单元, 从而上行链路和下行链路可实现同时工作。其中, 实验系统参数如下: 发射光功率为 1 W, 发散角为 2° , 调制带宽为 20 MHz。

2.2 时钟数据处理单元

时钟数据处理单元主要包括光调制/解调、时钟变换和时钟恢复模块 3 部分。光调制/解调模块负责将信息加载到激光中; 时钟变换模块负责将原子钟中的时间信息变换为数字信号; 时钟恢复模块负责将 OOK

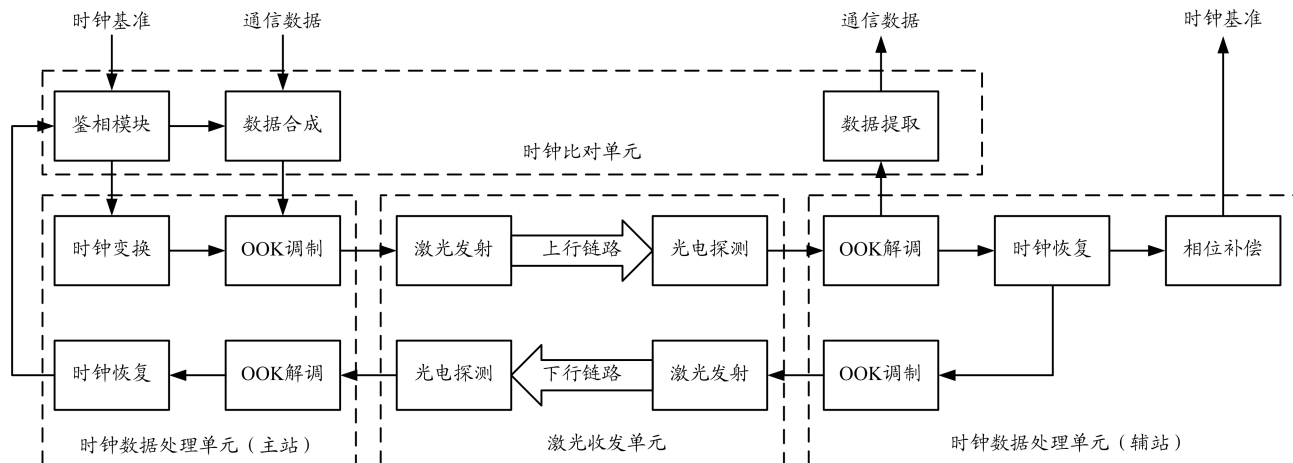


图4 时间同步系统硬件设计

信号恢复为时钟信号。在该系统中,本地端与远端各有 1 套时钟数据单元,独立构成时钟系统。

2.3 时钟比对单元

时钟比对单元中的鉴相模块负责对 2 路时钟信号进行高精度时钟比对,输出电压正比于相差或时延,并由此获得实际链路抖动信息;与本地端相比,远端时钟数据单元的鉴相模块具有相位补偿功能,可以实现对始终基准的反馈调节。时钟比对单元通过分析 2 个时钟数据单元的时钟数据,比对主(辅)站发射与辅(主)站接收的时钟信号,得到时钟比对数据。

3 实验结果与结果分析

为了验证系统的可靠性,本文对系统时频同步的技术指标进行了测试,内容主要包括相参保持精度(定相精度)和时钟系统稳定性。

3.1 相参保持精度

相参保持精度是指 2 个平台间传输频率基准时的定相精度,可以体现 2 个频率基准间的相位同步特性。对于振荡信号而言,相位对时间的微分即对应频率变化。因此,定相精度可以用频率稳定度来进行表征^[8-9]。一般情况下,可以采用 Allan 方差来评估频率稳定度^[10]。图 5 是对辅站基准信号测试得到的 Allan 方差数据。可以看出,当平均时间 $T=1$ s 时,频率稳定度为 $1.39 \times 10^{-11}/s$;当平均时间 $T=10$ s 时,频率稳定度为 $3.45 \times 10^{-12}/(10 \text{ s})$ 。

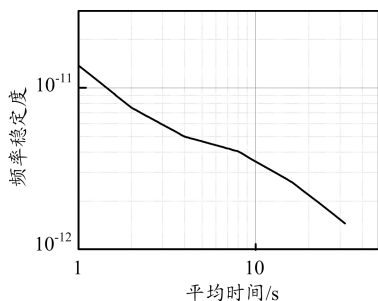


图 5 频率传输稳定度结果

3.2 时间系统稳定性

在实际系统数据和时钟的传输过程中,存在许多时延环节^[11](如收发系统硬件不理想、环境因素和目标回波位置变化等),这会造成数据附加了随机的时间延迟。因此,在辅站接收到时间信息后,所恢复出的同步时间脉冲信号与主站相比存在一定的时间抖动。时间抖动参数的测量可以直接通过高速示波器进行测量。以主站同步时间脉冲 A 为基准触发,利用示波器对辅站恢复出的同步时间脉冲 B 进行测量。在一定时间内,经过示波器多次的触发后,就能累积足够多的时钟周期,测量余辉宽度即可得到辅站相对于主站的同步时间抖动。本文对辅站 FPGA 恢复出来的时钟进行计数,每 10 ms 产生一个上升沿,观察相对主站时钟

的时间抖动。在系统稳定状态下,测量 100 s 后拍到的波形抖动及其余辉,时间抖动测试结果如图 6 所示。可以看出,在测量时间内,时间抖动为 1.65 ns。

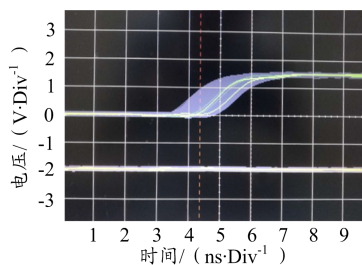


图 6 时间抖动测试结果

4 结束语

本文提出了一种基于伪码调制技术的自由空间时频数据一体化传输技术,采用微波光子融合技术,利用 FPGA 对时钟和数据信号进行 OOK 伪码调制和解调,实现了带宽受限条件下的时钟同步。本文介绍了时频信号调制/解调的原理,并搭建了基于 FSL 时间同步系统,实现了双向时频一体化传输。实验结果表明:系统频率稳定度为 $1.39 \times 10^{-11}/s$, $3.45 \times 10^{-12}/(10 \text{ s})$,时间抖动为 1.65 ns。本文提出的时频一体化传输技术可以应用在空间探测、精确制导、基础物理和地球科学等研究领域。

参考文献:

- [1] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(4): 2231–2258.
- [2] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析 [J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207–217.
- [3] RIEHLE F. Optical clock networks [J]. Nature Photonics, 2017(11): 25–31.
- [4] 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.
- [5] TAKENAKA H, TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y. Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks [J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15301–15308.
- [6] DESCHENES J D, SINCLAIR L C, GIORGETTA F R, et al. Synchronization of Distant Optical Clocks at the Femtosecond Level [J]. Physics, 2015, 6(2): 519–530.
- [7] 刘杰. 光纤光学频率传递研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2016.
- [8] 仲崇霞, 夏振华. 短期频率稳定度时频域转换的验证 [C] // 全国频率控制技术年会, 2008 年 11 月 21–22 日, 北京, 中国. 北京: 中国宇航学会, 2009: 51–57.
- [9] ALLAN D W J P I. Statistics of Atomic Frequency Standards [J]. 1966, 54(2): 221–230.
- [10] 郭树怀, 王天鹤, 冀霞, 等. 1Gbps 实时传输的自由空间光通信链路损耗 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 401–407.