

基于 IM/DD 体制的星间激光通信测距技术

陶坤宇^{✉1}, 付 森¹, 杨 奇², 曹哲玮¹, 沈 勤³, 王元祥²

(1 上海无线电设备研究所 上海 201109

2 华中科技大学 武汉 150001

3 上海航天技术研究院 201109)

摘要: 随着当前低轨卫星组网星座计划的日益增加,对卫星间高精度校时、测距需求也越来越迫切。提出基于直调直检 IM/DD (Intensity Modulation with Direct Detection) 的测距技术的实现方法,使其能同时兼顾测距精度及系统成本。基于 IM/DD 的测距是利用高精度的秒脉冲到达时间来测量距离。使用 IM/DD 光通信的数据传输方式,在正常的通信帧传输中插入少量的测距信息,无需中断正常的通信模式,也无需网络时钟频率同步,数据帧的发送周期也无需与秒脉冲保持同步关系,即可使用双向单程测距方法进行测距。使用秒脉冲对本地时钟进行频率测量,对测距过程参数进行修正,只需要采用普通晶体振荡器作为本地时钟源,不需要使用高精度测距通常所需的全网络同步时钟信号或者高稳定度时钟源,便可以达到 IM/DD 通信码元时间量级的测距准确度和精确度,同时降低了时频同步系统的复杂度、对元器件的要求以及整个通信测距系统的成本,解决了现有技术中测距精度及系统成本不易同时兼顾的问题。

关键词: IM/DD; 秒脉冲; 高精度测距; 激光通信

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0113-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220523001

引用格式:陶坤宇,付森,杨奇,等.基于 IM/DD 体制的星间激光通信测距技术[J].遥测遥控,2022,43(4):113-118.

Research on laser communication and ranging based on IM/DD mode

TAO Kunyu¹, FU Sen¹, YANG Qi², CAO Zhewei¹, SHEN Qin³, WANG Yuanxiang²

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 150001, China;

3. Shanghai Research Institute of Aerospace Technology 201109, China)

Abstract: With the increasing constellation plan of low-orbit satellite networking, the demand for high-precision time calibration and ranging between satellites is becoming more and more urgent. This paper proposes the implementation of IM/DD to balance the ranging accuracy and system cost. Distance measurement of high precision pulse of time based on IM/DD is used to measure the distance. It employs the data transmission method of direct modulation and direct detection optical communication, inserts a small amount of ranging information into the normal data frame transmission, without interrupting the normal communication mode, and without the need to synchronize the frequency of the network clock, and the transmission period of the data frame has no need to be related to the second pulse. Keeping the synchronization relationship, the two-way one-way ranging method can be used for ranging. It uses the second pulse to measure the frequency of the local clock and correct the parameters of the ranging process. It only needs to use the ordinary crystal oscillator as the local clock source, and does not need to use the full network synchronization clock signal or high stability usually required for high-precision ranging. The clock source can achieve the ranging accuracy and precision of the time level of the direct adjustment and direct detection of the communication symbol, and at the same time reduce the complexity of the time-frequency synchronization system, the requirements for components and the cost of the entire communication ranging system. The problem in the prior part that ranging accuracy and system cost are not easy to be taken into account at the same time is solved.

Key words: IM/DD; PPS; High-precision ranging; Laser communication

✉通信作者: 陶坤宇 (3times@vip.sina.com)

收稿日期: 2022-05-23 收修改稿日期: 2022-06-23

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220523001

Citation: TAO Kunyu, FU Sen, YANG Qi, et al. Research on laser communication and ranging based on IM/DD mode[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 113–118.

引言

在 5G 通信技术中, 通信对象集中在陆地地表上 10 km 以内高度的有限空间范围, 还无法实现“空天海地”无缝覆盖的通信愿景^[1]。但随着移动通信技术的发展, 现今对第六代移动通信技术(6G)的研究正在持续开展。6G 网络将是一个把地面无线通信以及卫星通信相集成的全连接网络, 通过将卫星通信整合到 6G 移动通信, 实现全球无缝覆盖^[2]。6G 核心技术已被列入多国创新战略, 成为大国科技博弈和全球抢占的高精尖领域战略制高点^[3]。在卫星通信领域中, 可选的两种通信方式为无线通信和光通信, 两者比较而言, 光通信的传输容量比无线通信高几个量级以上, 并且安全性和可靠性更好^[4]。对于 6G 等需要大容量卫星通信的需求而言, 卫星与卫星之间、卫星与地面之间的骨干通信方式首选光通信技术路线^[5]。由于卫星运行轨道的环境恶劣, 卫星上的元器件的品类受限, 元器件选型比较困难, 并且由于商业化的需求, 对成本、使用寿命等方面有着迫切的要求。由于 IM/DD 光通信在成本、可靠性等方面优势显著^[6], 对于以低轨卫星作为主要部署方式且需要大容量通信的应用场景, IM/DD 光通信是首选技术体制。

卫星之间相对位置信息的获取是保证编队星座正常运行的前提, 因此卫星需要自行完成星间和星地精密测距, 以确定编队星座中的星间相对状态或星地状态。将光通信技术与测距技术相结合, 实现星间、星地之间互相通信, 并准确测量卫星轨迹的系统^[7,8], 具有巨大的潜在效益和广阔的应用前景, 但是如何兼顾测距精度和系统成本, 是一个需要解决的问题^[9-11]。

1 基于 IM/DD 直接调制方式测距原理

1.1 测距原理

针对当前卫星组网中对星座内卫星之间的测距定位所需解决的问题, 本文提供一种基于 IM/DD 的测距技术, 其能同时兼顾测距精度及系统成本。美国曾在 2011 年实施了月-地激光通信任务, 实现了从月球到地球之间的高速激光通信, 并且通过该测距技术对月地距离实现了精确测量^[12,13]。

基于 IM/DD 的测距是利用高精度的秒脉冲到达时间来测量距离。使用 IM/DD 光通信的数据传输方式, 在正常的帧传输中插入少量的测距信息, 无需中断正常的通信模式, 也无需网络时钟频率同步, 数据帧的发送周期也无需与秒脉冲保持同步关系, 即可使用双向单程测距方法进行测距。

此外, 使用秒脉冲对本地时钟进行频率测量, 对测距过程参数进行修正, 只需要采用普通晶体振荡器作为本地时钟源, 取消使用高精度测距通常所需的全网络同步时钟信号或者高稳定度时钟源, 便可以达到 IM/DD 通信码元时间量级的测距准确度和精确度, 同时降低了时频同步系统的复杂度、对元器件的要求以及整个通信测距系统的成本, 解决了现有技术中测距精度及系统成本不易同时兼顾的问题^[14]。

基于 IM/DD 的测距技术的原理较为简单, 即两台双向传输的终端通过相互交换测距信息, 来完成星间测距^[15]。如果星间激光链路是对称的或者近似对称的, 那么双向信号传输的延迟将会抵消。测距原理如图 1 所示。图中大写字母表示时间段, 小写字母表示时刻, 阴影表示物理帧帧头。

图 1 中各个参数含义: t_{SB} 、 t_{RB} 分别代表终端 B 的发送时刻和接收时刻; t_{SA} 、 t_{RA} 分别代表终端 A 的发送时刻和接收时刻; T_{SA} 、 T_{RA} 代表终端 A 的发送时延和接收时延; T_{SB} 、 T_{RB} 代表终端 B 的发送时延和接收时延; ΔT 为两终端的时钟误差; T_{L1} 表示

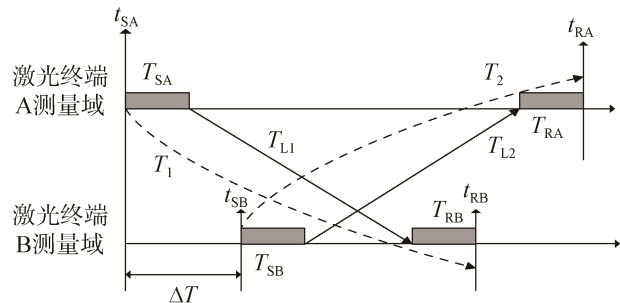


图 1 测距原理示意图

Fig. 1 Principle of Distance measurement

终端 A 的测距信号在空中传播的时延； T_{L2} 表示终端 A 的测距信号在空中传播的时延； T_1 、 T_2 分别代表终端 A 和终端 B 的“本地测距值”。各个参数的计算流程如下：

激光终端 B 测量获得的“本地测距值”为：

$$T_1 = t_{RB} - t_{SA} = T_{SA} + T_{L1} + T_{RB} + \Delta T \quad (1)$$

激光终端 A 测量获得的“本地测距值”为：

$$T_2 = t_{RA} - t_{SB} = T_{SB} + T_{L2} + T_{RA} - \Delta T \quad (2)$$

由公式 (1) 和公式 (2) 得出，星间传输时延 T_L ，以及激光终端 A 和激光终端 B 之间的钟差 ΔT ：

$$T_L = \frac{T_{L1} + T_{L2}}{2} = \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{T_{SA} + T_{RB} + T_{SB} + T_{RA}}{2} \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_2}{2} - \frac{T_{SA} - T_{SB}}{2} - \frac{T_{RB} - T_{RA}}{2} - \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4)$$

公式 (3) 和公式 (4) 中， T_{SA} 、 T_{RA} 、 T_{SB} 、 T_{RB} 为固定值， T_1 和 T_2 为测量值。

2 基于 IM/DD 激光测距算法

2.1 测量过程

基于 IM/DD 的测距技术具体测距过程如图 2 所示。

S1：主要是采用秒脉冲到达时间测量方法，使用数字逻辑电路内具有确定性时延的逻辑电路进行级联，组成延迟链，使用时钟对延迟链的多级抽头进行并行采样，根据数字逻辑电路时序分析的结果，确定每级延迟链的延迟时间 T_{tap} ，对数量为 N_{TAPS} 的多级延迟链的多级抽头进行并行采样得到采样值 $D_{tap} \in [0, N_{TAPS} - 1]$ ，查找出逻辑值跳变的位置 n_{pulse} ，如果存在跳变，则秒脉冲到达标志 FLAG_1PPS 有效，同时计算得出秒脉冲到达时间为 T_{pps} ，发送时钟和接收时钟各自输出对应的秒脉冲到达时间 T_{pps_s} 和 T_{pps_r} ，以及秒脉冲到达标志 FLAG_1PPS_S 和 FLAG_1PPS_R。

S2：发送时钟使用秒脉冲到达标志 FLAG_1PPS_S，并输出时钟频率测量值 F_s 。其中，每当一个秒脉冲到达标志有效时，结束上一次的频率计数，并输出结束计数时的计数值作为发送时钟的时钟频率测量值 F_s ，同时重置该计数器，重新开始计数。

同时，在发送时钟的秒脉冲到达标志 FLAG_1PPS_S 有效时，启动测距帧发送计数器，并在测距帧发送标志有效时停止测距帧发送计数器，以得到测距帧发送时钟数 n_{send} 。然后便可以根据公式 (5) 计算测距帧发送时间 T_s 。其中， n_{send} 为测距帧发送时钟数， F_s 为发送时钟的时钟频率测量值， F_{s_norm} 为发送时钟的标称频率值。

$$T_s = \frac{(n_{send} \times F_s)}{(F_{s_norm})^2} - T_{pps_s} \quad (5)$$

S3：按照发送时钟的操作，对接收时钟进行相应的操作，最终得到接收时钟的输出时钟频率测量值 F_r 以及测距帧接收时钟数 n_{recv} 。再结合并行同步比特滑动值 N_r 、并行数据宽度 N_{BITS} 和接收时钟的标称频率值 F_{r_norm} ，便可以根据公式 (6) 计算测距帧到达时间 T_r 。其中， n_{recv} 为测距帧接收时钟数， F_r 为接收时钟的时钟频率测量值， F_{r_norm} 为接收时钟的标称频率值， N_r 为并行同步比特滑动值， N_{BITS} 为并



图 2 测距流程示意图
Fig. 2 Diagram of ranging process

行数据宽度。

$$T_r = \frac{\left[\left(n_{\text{recv}} + \frac{N_r}{N_{\text{BITS}_s}} \right) \times F_r \right]}{\left(F_{r_norm} \right)^2} - T_{\text{pps}_s} \approx \frac{n_{\text{recv}} \times F_r}{\left(F_{r_norm} \right)^2} + \frac{N_r \times F_{r_norm}}{N_{\text{BITS}}} - T_{\text{pps}_s} \quad (6)$$

S4: 两终端中的第一终端根据公式 $T_{d1} = T_{r1} - T_{s2}$ 计算第一伪距值 T_{d1} 。其中, T_{r1} 为第一终端计算的测距帧到达时间, T_{s2} 为第二终端计算的测距帧发送时间。两终端中的第二终端根据公式 $T_{d2} = T_{r2} - T_{s1}$ 计算第二伪距值 T_{d2} 。其中, T_{r2} 为第二终端计算的测距帧到达时间, T_{s1} 为第一终端计算的测距帧发送时间。然后根据公式 (7) 计算测距值 T_{dist} 。

$$T_{\text{dist}} = \frac{(T_{d1} + T_{d2})}{2} \quad (7)$$

此外, 由于计算出来的测距值中包含了两个终端内的固有传输和处理延时 T_{ditem} , 为了得到更精确的测量结果, 还根据公式 (8) 对测距值 T_{dist} 进行修正得到测距修正值 $T_{\text{dist_correct}}$ 。

$$T_{\text{dist_correct}} = T_{\text{dist}} - T_{\text{ditem}} \quad (8)$$

考虑到光在传输介质中的速度为 c' , 从而可根据公式 (9) 计算得出测距的距离值 D 。

$$D = T_{\text{dist_correct}} \times c' \quad (9)$$

以上就是基于 IM/DD 的测距技术在一般情况下的测距过程, 在实际应用中, 需要根据具体情况对测距过程进行灵活调整。

2.2 测试实验搭建

本文所进行的实验都是通过将客户侧数据分别发送给设备 a 和设备 b, 两台设备分别对客户侧数据进行一定的处理, 然后将处理好的数据分别传输给对方, 由对方经过还原后传输回客户侧。实验示意图如图 3 所示。

通过设备之间的相互传输, 确保整个通信链路形成回环, 这样既能保证两台通信设备均可计算出测距结果, 又能够通过观察客户侧结果来判断通信链路是否正常, 以保证设备所计算出的结果是真实可靠的。通信设备实物如图 4 所示。

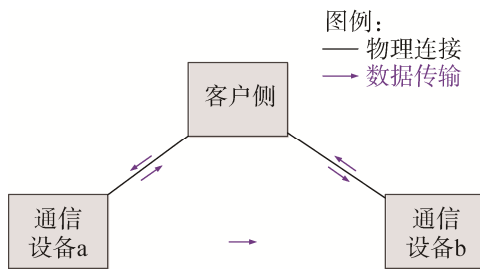


图 3 实验装置连接示意图

Fig. 3 Diagram of the test equipment connection



图 4 通信测试设备实物图

Fig. 4 Photo of communications test

2.3 测试结果分析

为了更好地验证测距的精度, 本文分别在不同的传输速率情况下测量了不同距离下的测距值及其误差。

在传输速率分别为 10 Gbps、5 Gbps 和 2.5 Gbps 的情况下, 对每种速率分别进行三组测距实验。先测量出设备间初始的距离, 并以此时的距离作为基准, 在此基础上分别移动 0.36 m、1.10 m 和 2.07 m, 通过三组不同距离的实验来检验测距算法的合理性, 每组实验进行 10 次, 计算出 10 次测距的平均值, 并与基准距离相减, 得到差值。每一组实验的差值与所移动的距离进行对比。实验得到的数据见表 1。

表 1 实验数据

Table 1 Test results in dynamic scenarios

传输介质	双边距离变化 (ns)	10 Gbps 测距值 10次平均 (ns)	抖动 (ns)	5 Gbps 测距值 10次平均 (ns)	抖动 (ns)	2.5 Gbps 测距值 10次平均 (ns)	抖动 (ns)
单边: 光纤 +0 m	0	1 746.1	+0.1/ -0.1	3 462.7	0/ -0.1	6 896.0	+0.2/ -0.2
单边: 光纤 +0.36 m	0.9	1 747.0	0/ -0.0	3 463.5	+0.1/ -0.0	6 896.9	+0.3 /-0.1
双边距离差 (ns)		0.9		0.8		0.9	
误差 (ns)		0		-0.1		0	
单边: 光纤 +1.10 m	2.8	1 749.0	0/ -0.1	3 465.3	+0.2/ -0.1	6 899.2	+0.2/ -0.1
双边距离差 (ns)		2.9		2.6		3.2	
误差 (ns)		0.1		-0.2		0.4	
单边: 光纤 +2.07 m	5.2	1 751.2	0/ -0.0	3 467.9	+0.1/ -0.1	6 900.9	+0.1/ -0.2
双边距离差 (ns)		5.1		5.2		4.9	
误差 (ns)		-0.1		0.0		-0.3	

由表 1 中数据可以看出, 当处于 10 Gbps 速率时, 三组测距实验的误差值在 ± 0.1 ns 之内。当处于 5 Gbps 速率时, 三组测距实验的误差值在 ± 0.2 ns 之内。当处于 2.5 Gbps 速率时, 三组测距实验的误差值在 ± 0.4 ns 之内。虽然不同的速率下测距误差有所不同, 但测距误差范围均小于 1 ns。通过表中数据可以得到结论: 基于 IM/DD 激光通信的测距技术具备较高的测距精度, 能够满足当前卫星测距相关性能要求。

3 结束语

本文对基于 IM/DD 激光通信的测距技术进行了研究, 阐述了其基本原理及其实际的测距流程。通过多组实验数据分析, 可以看出基于 IM/DD 的测距技术具备有较高的测距精度。在现有的卫星平台中, 本技术的测距精度有望保持在 1 ns 之内, 并且其测距精度不会随着时间的推移而降低, 可以很好地实现卫星长期的在轨自主测距, 以保证编队星座的长期正常运行。

参考文献

- [1] 赛迪智库无线电管理研究所. 6G 概念及愿景白皮书[R]. (2020-03-01)[2022-05-23]. <https://wenku.baidu.com/view/58e3efe988d63186bceb19e8b8f67c1cfad6ee02.html>.
- [2] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
WU Xiaowen, JIAO Zhenfeng, LING Xiang, et al. Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 1-14.
- [3] 吴勇毅. 6G: 未来国之重器全球抢占的战略制高点[J]. 通信世界, 2019(31): 39-40.
- [4] 赵永利, 马壮壮, 井音吉, 等. 高动态卫星激光组网关键技术研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(8): 8-13.
ZHAO Yongli, MA Zhuangzhuang, JING Yinji, et al. Research on key technologies of high dynamic satellite laser networking[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(8): 8-13.
- [5] FUCHS C, MOLL F. Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(12):1148-1159.
- [6] 杨超. 直接检测光通信技术的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [7] 孟庆喆. 激光通信测距发展及应用研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(5): 31.

- [8] ROBINSON B S, BOROSON D M, BURIANEK D A, et al. The lunar laser communications demonstration[C]// 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications(ICSOS), 2011.
- [9] 胡玮, 蒋大钢, 邓科, 等. 无线激光通信与测距一体机的测距精度分析[J]. 红外与激光工程, 2008, (S3): 245–248.
HU Wei, JIANG Dagang, DENG Ke, et al. Accuracy analysis on a prototype which combined with optical wireless communication and laser rangefinding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, (S3): 245–248.
- [10] 赵馨, 牛俊坡, 刘云清, 等. 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 81–87.
ZHAO Xin, NIU Junpo, LIU Yunqing, et al. Laser communication/ranging integrated technology and link characteristics in navigation satellite system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 81–87.
- [11] APPLEBY G, NOLL C, PAVLIS E, et al. Current trends and challenges in satellite laser ranging[C]// IVS 2016 General Meeting Proceedings, 2016.
- [12] KAM A, PLICE L, GALAL K, et al. LADEE flight dynamics: Overview of mission design and operations[C]// 2015 AAS-AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2015.
- [13] 杨红宇, 邓科, 么周石, 等. 星间激光通信兼测距新技术研究[J]. 光通信技术, 2006, 30(11): 50–52.
YANG Hongyu, DENG Ke, YAO Zhoushi, et al. Study on new technology of inter-satellite laser communications and laser range finding, Optical Communication Technology, 2006, 30(11): 50–52.
- [14] 刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147–153, 167.
LIU Xiangnan, LI Yingfei, XIANG Chengyong, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147–153, 167.
- [15] 盛均峰. 基于 IM/DD 光通信系统的同步技术[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2018.

[作者简介]

- 陶坤宇 1967 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达、激光通信。
付 森 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星激光通信。
杨 奇 1981 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为激光通信。
曹哲玮 1988 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为激光通信、微波光子。
沈 勤 1971 年生, 博士, 主要研究方向为卫星通信。
王元祥 1983 年生, 博士, 主要研究方向为激光通信。

(本文编辑: 傅 杰)