

文章编号: 1001 - 893X(2012)10 - 1691 - 05

卫星双向对时应用系统设计*

张沪玲, 李群续, 赵景磊

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:设计了一种用于海上活动站通过卫星信道进行时间比对的应用系统。结合目前活动站通信现状, 选择卫星双向时间比对作为对时手段, 综合分析了影响对时精度的主要因素, 并在系统的设计过程中加以克服, 使系统精度达到设计要求。实际卫星信道测试数据表明, 卫星双向对时应用系统对时精度达到微秒级, 满足海上活动站使用要求。

关键词:测控通信系统; 时间统一系统; 双向时间比对; 卫星信道; IRIG - B 码; 同步误差

中图分类号: TN96 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.026

Design of a Ship-shore Time Synchronization Application System

ZHANG Hu-ling, LI Qun-xu, ZHAO Jing-lei

(China Satellite Marine Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: A ship-shore time synchronization application system through satellite channel is designed for TT&C ship. According to actual TT&C ship ship-shore communication status, the Two Way Satellite Time Synchronization(TWSTS) method is chosen to minimize the time synchronization error. After analysis of major error affects in time synchronization, a ship-shore time synchronization application system is designed to minimize the time synchronization error. The test result through the actual satellite channel shows that the system's accuracy is up to microseconds and the demand of the ship-shore communication in TT&C ship is satisfied.

Key words: TT&C and communication system; timing system; two way satellite time synchronization; satellite channel; IRIG-B code; synchronization error

1 引言

时间统一分系统是海上活动测控站测控通信系统的重要组成部分, 其时间精度将直接影响航天测控精度。目前, 活动站采用主要的对时方式为 GPS 对时, 具有使用方便、定时精度高的优点, 但该系统的使用受美国全球战略的影响, 使用受制于人, 在过去的工作中曾发现 GPS 对时有慢秒现象。我国“北斗”导航系统计划 2020 年实现全球覆盖, 目前依然不能覆盖海上活动测控站海域, 因此研究高精度的对时方法并开发相应产品具有十分重要的现实

意义。

目前, 远距离时间比对和校准的方式很多, 主要有多台站卫星双向时间比对、单通道卫星双向时间比对、卫星共视法、载波相位法、搬运钟和广播电视信号对时等。多台站卫星双向时间比对精度最高, 但其要求多个台站共用一颗卫星。在重大试验任务中, 几个海上活动测控站分布于三大洋, 为了保障通信质量, 可能租用不同的国际通信卫星, 而多台站卫星双向时间比对要求多个台站共用同一颗卫星, 因此多台站卫星双向时间比对与实际情况不符。单通道卫星双向时间比对要求两个站共用一颗卫星, 通常海上活动测控站岸船间共用一颗通信卫星, 采用

* 收稿日期: 2012 - 03 - 31; 修回日期: 2012 - 08 - 01

卫星双向时间比对方法可以有效利用现有通信设备,同时它的时间比对精度较高,仅次于多台站卫星双向时间比对,设备和方法相对简单。卫星共视法和载波相位法实际为单收单发系统,该方法无法摆脱国外全球定位系统的限制。搬运钟和广播电视信号对时适合陆地和近海情况,对于海上活动站所在海域无法提供技术支持。

对时的基本思想是把岸站的标准时间准确无误的传递到海上活动测控站,即把携带岸站标准时间信息的数据准确传递到海上活动测控站,同步海上活动测控站本地时统。目前,海上活动站岸船通信方式主要是卫星通信,利用现有卫星通信手段实现时间信息的传递和校准具备一定的基础,因此,选择卫星双向时间比对作为对时应用系统的对时方法。

2 卫星双向对时应用原理及主要误差源

2.1 卫星双向时间比对误差数学模型

双向时间比对的原理为: A 站和 B 站“同时”发送各自的时间基准信号,经卫星转发,两站分别接收对方的时基信号。两站的同步误差为

$$\delta_t = \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{T_{AB} - T_{BA}}{2} \quad (1)$$

式中, δ_t 为两站的同步误差, T_A 、 T_B 分别为 A、B 两站测得的时间间隔, T_{AB} 、 T_{BA} 分别为 A 站到 B 站的传输时延和 B 站到 A 站的传输时延,从双向比对原理可以看出,影响双向时间比对精度的因素有两项:一是 T_A 和 T_B 的测量精度,二是双向比对链当中的不一致性。 T_A 和 T_B 的测量精度可以通过提高测量手段加以实现。

而双向比对链中的不一致性涉及因素很多^[1]。进一步细化 T_{AB} 和 T_{BA} , 如图 1 所示。图中: A 站的发射、接收设备的时延分别用 τ_{TA} 和 τ_{RA} 表示,上行到达卫星的时延为 τ_1 、下行从卫星到达 B 站的时延为 τ_4 ; B 站的发射、接收设备的时延分别用 τ_{TB} 和 τ_{RB} 表示,上行到达卫星的时延为 τ_3 、下行从卫星到达 A 站的时延为 τ_2 。A、B 站都通过卫星中继,由卫星上所配置的转发设备对信号进行转发,其时延也包括接收和发射两部分,严格来讲应有所区别,分别用 τ_{s1} 、 τ_{s2} 表示。

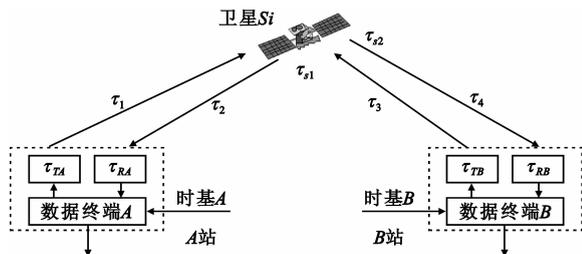


图 1 双向法站间信号流程图

Fig.1 Flowchart of two way satellite time transfer method

理想情况下, $\tau_1 = \tau_2$, $\tau_3 = \tau_4$ 。但实际上由于卫星收、发频率不相同,受大气附加延迟的影响(分别记为 $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 、 $\Delta\tau_4$)也不同,卫星的上、下行传播时延(τ_1 、 τ_2)、(τ_3 、 τ_4)会有差异。

可以看出:

$$T_{AB} = \tau_{TA} + \tau_1 + \tau_{s1} + \tau_4 + \tau_{RB} + \tau_{Sag}^{AB} \quad (2)$$

$$T_{BA} = \tau_{TB} + \tau_3 + \tau_{s2} + \tau_2 + \tau_{RA} + \tau_{Sag}^{BA} \quad (3)$$

τ_{Sag}^{AB} 和 τ_{Sag}^{BA} 为两条链路 Sagnac 效应引起的时延误差。

将式(2)、(3)代入式(1)有

$$\delta_t = \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{(\tau_{TA} + \tau_{RB}) - (\tau_{TB} + \tau_{RA})}{2} + \frac{(\tau_1 - \tau_2) - (\tau_3 - \tau_4)}{2} + \frac{\tau_{s1} - \tau_{s2}}{2} + \Delta\tau_{Sag}^{BA} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tau_1 - \tau_2 = \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2 \\ \tau_3 - \tau_4 = \Delta\tau_3 - \Delta\tau_4 \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

$$\delta_t = \frac{T_A - T_B}{2} + \frac{(\tau_{TA} + \tau_{RB}) - (\tau_{TB} + \tau_{RA})}{2} + \frac{(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) - (\Delta\tau_3 - \Delta\tau_4)}{2} + \frac{\tau_{s1} - \tau_{s2}}{2} + \Delta\tau_{Sag}^{BA} \quad (6)$$

式(6)就是卫星双向时间比对误差源数学模型。

DDN 端口速率为 9.6 kbit/s 时,表 1 列出了上述各误差源对双向时间比对的影响^[2]。

表 1 各误差源对岸船时间比对的影响

Table 1 The effect of errors on ship-shore time synchronization

误差源	影响量	
本地时间间隔 测量误差	0.2 μ s	
设备时延误差	DDN 设备采样误差	104 μ s
	DDN 分复用误差	10 μ s
	卫星转发误差	20 ns
路径时延误差	电离层等	5 ns
卫星和地面站	卫星距离误差	150 ps
	卫星位置误差	50 ps
	岸站位置误差	1 ps
运动误差	岸站位置误差	1 ps
	活动站位置误差	50 ps

2.2 误差修正方法

2.2.1 测量误差修正

在对时应用系统产品的开发中,为达到技术指标要求,就必须尽量克服系统误差中较大的误差环节,从而保证对时应用系统的对时精度。从表 1 可见,在整个系统误差中,由时钟不同源带来的 DDN 端口采样误差最大,达到 $104 \mu\text{s}$,必须采取相应的措施加以克服。

通常采用时间间隔计数器精确测量时差。在对时应用系统的设计中,选择 IRIG-B 的 1 PPS 的上升沿作计数器的开门开关,DDN 端口采样时钟上升沿作关门开关,IRIG-B 中的 5 MHz 高频信号作为采样脉冲,实现采样误差测量。经过采样误差测量,就使 DDN 端口采样误差变为时间间隔计数器测量误差。当采用 5 MHz 频率作为填充脉冲时,在开门和关门处产生的误差理论上不大于 $0.1 \mu\text{s}$,即计数器脉冲不对齐引起的误差理论上不大于 $0.2 \mu\text{s}$ 。

2.2.2 异常数据的识别与估计

在卫星双向对时应用系统的设计中,双向对时是双方经过 N 次双向测量后,双方对测量数据进行解算得出双向测量时延。测量数据往往带有误差偏大的异常值,产生异常值(野值)的原因有多种。测量数据含有的异常值,使测量值严重失真,降低了测量数据的置信度,严重影响数据处理质量。因此,在应用系统的控制处理器对双向测量数据进行处理时,必须首先对测量数据异常值进行判别和处理,以合理、可信的测量数据替代它,保证测试数据处理结果的质量。实际工程中不可能采用无限次测量,数据量多少将直接影响最后的误差修正精度。数据量越大,误差修正越精确,但数据量越大,对时时间越长。在应用系统误差处理模型设计中,综合考虑精度和对时时间,取 $N = 100$ 。

在卫星双向对时应用系统误差处理模型设计中,应用最小二乘估计和时间多项式外推后一时刻的观测数据估计值,对双向测量数据进行野值识别和估计后,对重新排序的测量数据取均值后输出双向测量时延。

3 卫星双向对时应用系统设计

卫星双向对时应用系统采用卫通信道双向时间比对的方式,时间基准为岸站,通过测量和修正岸船

传输时延,使时间同步精度达到设计要求。在系统的设计中,采用 DDN 采样误差测量和非相干误差数理统计等方法克服各种固定和抖动误差,从而实现时间信息同步。时间比对应用系统主要完成卫通信道时延双向测量、DDN 设备采样误差测量、本地 IRIG-B 码时间信息解调、产生携带双向测量时间差、采样时延误差、控制信息和本地时间信息的 IRIG-B 码等功能。

3.1 硬件设计

3.1.1 硬件组成

从原理和功能方面讲,岸船时间比对应用系统设计对于岸站和海上活动测控站稍有不同。岸站和海上活动站都是由数据接口单元、IRIG-B 时码产生单元、IRIG-B 时码解调单元、控制处理器单元、时间间隔计数器单元、DDN 采样误差测量单元以及数据显示和功能设置单元组成,但是岸站在解调单元当中不需要重新产生 IRIG-B 码,而海上活动站则必须产生新的与岸站同步的 IRIG-B 码来同步船上的时统。在系统的设计上,两者设计一致,只是岸站部分功能不使用。

海上活动(岸)站系统的具体组成结构如图 2 所示。

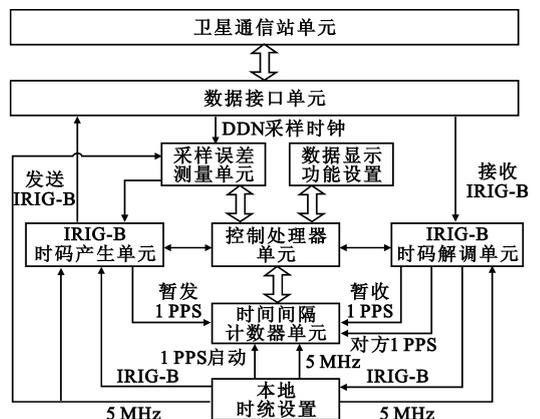


图 2 系统组成图

Fig. 2 Block diagram of time synchronization application system

3.1.2 主要功能

(1)产生与本地时统同步且携带信息的 IRIG-B 码,并将其通过数据接口设备送到卫通设备向对方发送;

(2)接收对方发来的 IRIG-B 码,并解算其携带的各种信息;

(3)通过时间间隔计数器获取本地秒脉冲与对方发送的秒脉冲的时间差;

(4)通过采样误差测量获取 DDN 设备采样时延误差;

(5)根据岸船误差模型解算岸船时间比对误差, 并进行统计;

(6)将修正过的时间信息以 IRIG-B 码的形式送海上活动站时统进行同步;

(7)提供与卫通设备的接口转换功能;

(8)实时显示系统工作状态, 提供人机交互功能。

3.2 软件流程

应用系统软件主要完成的功能是控制各个硬件单元协调工作, 正确接收、发送相关的数据, 统计、解算时延误差等。

在双向时间比对应用系统中, 岸站和海上活动站站分别有一套软件系统, 两者的基本功能相似, 都包含系统初始化功能、收发信息控制、解算与统计岸船时间误差、进行人机交互等功能。

两者的差别在于: 由于岸站作为基准站, 不需要在比对结束后对本地的时统进行修正, 而船站必须要有这项功能。

岸站、海上活动站对时应用系统软件基本流程图如图 3 所示。

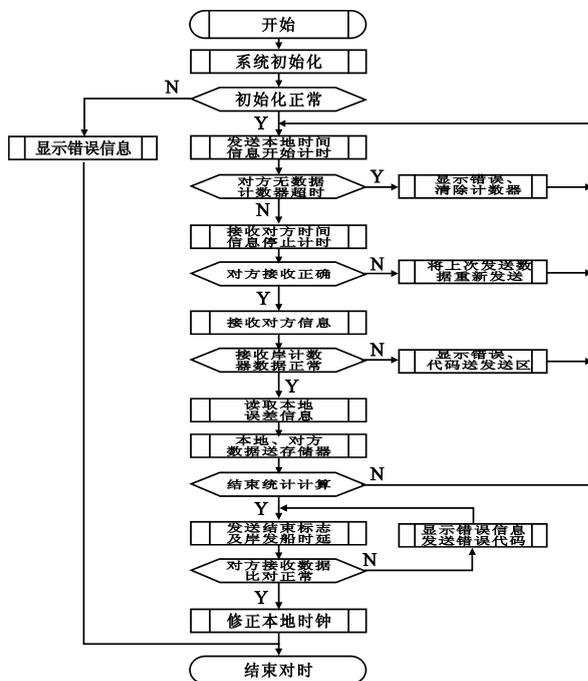


图 3 应用软件流程图

Fig.4 Software flowchart of time synchronization application system

4 系统测试

卫星双向对时应用系统设计生产完成后, 为了验证该系统的对时精度是否满足设计要求, 需要通过实际卫通信道进行实验测试。测试图如图 4 所示。

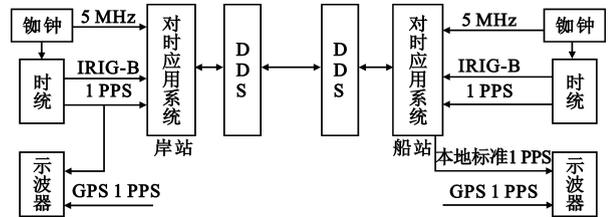


图 4 对时精度测试框图

Fig.4 Architecture of the time synchronization application system

对测试数据进行误差分析表明, 在卫星中继速率为 64 kbit/s、DDN 端口速率为 9.6 kbit/s 时, 时间同步精度优于 15 μs, 高于航天测量任务对海上活动站的时间比对要求。

5 结束语

本文选择卫星双向时间比对作为海上活动测控站对时新方法, 对卫星双向时间比对误差来源进行了分析, 提出了消除主要误差的方法, 设计了基于海上活动测控站卫星双向对时应用系统, 并通过实际卫星信道进行测试。分析测试数据表明, 卫星双向对时应用系统对时精度满足当前及后续试验任务对时需求。在后期的研究中, 应进一步考虑海上活动站运动对对时精度的影响, 对设备误差进行精细测量, 进一步提高对时精度。

参考文献:

[1] Liu Li, Han Chun-Hao. Two Way Satellite Time Transfer and its error analysis[J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(3): 219 - 226.

[2] 张沪玲, 简仕龙, 雷菁. 岸船卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 无线电工程, 2008, 38(9): 39 - 42. ZHANG Hu-ling, JIAN Shi-long, LEI Jing. Ship-shore Time Synchronization and Its Error Analysis[J]. Radio Engineering, 2008, 38(9): 39 - 42. (in Chinese)

[3] 童宝润. 时间统一系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. TONG Bao-run. Timing System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)

[4] 胡永辉, 漆贯荣. 时间测量原理[M]. 香港: 香港亚太科学出版社, 2000. HU Yong-hui, QI Guan-rong, The Principle of Time Measure

- [M]. Hongkong: Hongkong's Asia-Pacific Science Press, 2000. (in Chinese)
- [5] 左振平. 通信设备接口协议手册[M]. 北京:人民邮电大学出版社,2005.
- ZUO Zhen-ping. Interface and Protocol Manual of Communication Equipment[M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Press,2005 (in Chinese)
- [6] 曹志刚,钱亚生. 现代通信原理[M].北京:清华大学出版社,1992.
- CAO Zhi-gang, QIAN Ya-sheng. Modern communication theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1992. (in Chinese)

ZHANG Hu-ling was born in Huaxian, Shaanxi Province, in 1971. She is now a senior engineer with the M. S. degree. Her research concerns ship-shore communication.

李群续(1972—),男,山东烟台人,硕士,高级工程师,主要研究方向为航天海上测控通信;

LI Qun-xu was born in Yantai, Shandong Province, in 1972. He is now a senior engineer with the M. S degree. His research concerns spaceflight maritime tracking and controlling system and communication system.

Email: lqx100@163.com

赵景磊(1976—),男,江苏苏州人,2001年获硕士学位,主要从事通信系统软件方面的研究。

ZHAO Jing-lei was born in Suzhou, Jiangsu Province, in 1976. He received the M. S degree in 2001. His research concerns communication system software design.

作者简介:

张沪玲(1971—),女,陕西华县人,硕士,高级工程师,主要从事岸船通信方面的研究;

《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于 1958 年,由中国西南电子技术研究所主办,系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物,为中文核心期刊。目前,已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

- 电子系统工程
- 通信
- 导航
- 识别
- 飞行器测控
- 卫星应用
- 雷达
- 信息战
- 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有:系统总体、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术与工程应用、仿真、测试与试验、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

(1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼。内容应保守国家机密,并提供所在单位的保密审查证明,引用他人作品应给出来源。

(2)文稿一般不应超过 6 000 字,综述稿不超过 8 000 字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词,基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过 20 个汉字,必要时可加副标题。

(3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素,即用简洁的语言说明文章要解决的问题,主要工作过程及所采用的技术手段和方法,研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以 200~300 字为宜。

(4)关键词以 3~8 个为宜。为便于文献检索,应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。

(5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用 GB3100-3102-93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。

(6)插图和表格只给出必要的,且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳,也可采用扫描的电子文档(精度高于 400 dpi, tif, jpg, psd 等格式均可)。

(7)文稿中引用他人的成果,务请注明原作者姓名、题名、来源,一并在参考文献中给出,并在正文中相应位置进行标示,否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的,未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见 GB/T 7714-2005 文后参考文献著录规则。

(8)投稿邮箱: dxjs@china.com, 并尽量同时提供 Word 和 pdf 文档, 无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱,并注明拟投栏目。

(9)本刊编辑部将在 3 个月之内对来稿作出取舍,如逾期未收到处理意见或刊用通知,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊,本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投,否则后果自负。