

全新卫星双向时间比对调制解调器设计

王学运^{1,2},王海峰^{1,2},张升康^{1,2},袁媛¹,王宏博^{1,2},王超¹,王亮¹

(1. 北京无线电计量测试研究所,北京 100854; 2. 计量与校准技术国家级重点实验室,北京 100854)

摘要: 卫星双向时间频率传递是目前被广泛应用的远距离高精度时间频率量值传递方法,其核心组成设备是双向时间比对调制解调器. 文章介绍了由北京无线电计量测试研究所研制的卫星双向时间比对调制解调器,该设备采用直接序列扩频(DSSS)和二进制相移键控(BPSK)方式完成时间信号的调制,采用快速傅里叶变换(FFT)算法实现对信号的快速搜索和捕获;利用二阶锁频辅助三阶锁相环路达到动态性能和跟踪精度的平衡;采用二阶延迟锁定环(DLL)来实现对码相位的精密跟踪和测量. 采用两个1.2m口径天线的双向比对地球站进行短基线卫星双向时间比对试验,试验结果表明当系统工作在2.5MChip/s码速率时,该调制解调器的时间比对精度(标准偏差 1σ)能够达到0.13ns.

关键词: 卫星双向时间频率传递; 调制解调器; 捕获; 相位锁定环路; 延迟锁定环路

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2017)10-2555-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.034

Design of a New Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Modem

WANG Xue-yun^{1,2}, WANG Hai-feng^{1,2}, ZHANG Sheng-kang^{1,2},
YUAN Yuan¹, WANG Hong-bo^{1,2}, WANG Chao¹, WANG Liang¹

(1. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement (BIRMM), Beijing 100854, China;

2. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: Two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) is general used in high-precision time and frequency transfer, the key equipment of TWSTT system is the modem. Nowadays, a new time transfer modem for TWSTFT has been developed at BIRMM. The direct sequence spread spectrum (DSSS) and binary phase shift keying (BPSK) modulation techniques are used to generate a pseudo-random noise (PRN) signal. A fast Fourier transform (FFT) parallel algorithm is applied to achieve fast acquisition of the PRN modulated receiving signal. A 2nd order frequency lock loop (FLL) assisted 3rd order phase lock loop (PLL) is designed to keep both of the performance of loop dynamic stress and carrier phase tracking accuracy, and a 2nd order delay lock loop DLL is used to track and measure the code phase. A short baseline TWSTFT experiment was done with two 1.2m very small aperture terminal (VSAT) earth stations and a commercial geosynchronous orbit communication satellite to evaluate the modem's performance. The result shows very low noise with the standard deviation (1σ) equal to 0.13ns at a 2.5MChip/s code rate.

Key words: two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT); modem; acquisition; phase lock loop; delay lock loop

1 引言

卫星双向时间频率传递(TWSTFT)是一种高精度的远程时间频率传递技术,被广泛应用于时间频率计量^[1,2],卫星导航地面站时间同步^[3]等领域. 卫星双向时间比对性能优于GPS共视技术^[4,5],而在实时性方面

相较于GPS载波相位时间传递技术又具有很大的优势^[6,7]. 因此,世界上许多时频计量实验室都建立了卫星双向时间比对链路. 卫星双向时间比对原理可由式(1)表示:

$$\begin{aligned}
 T_A - T_B = & \frac{1}{2}(\Delta T_A - \Delta T_B) + \frac{1}{2} [(\tau_A^U + \tau_B^D) - (\tau_B^U + \tau_A^D)] \\
 & + \frac{1}{2}(\tau_{AB} - \tau_{BA}) + \Delta\tau_R \\
 & + \frac{1}{2} [(\tau_A^{TX} - \tau_A^{RX}) - (\tau_B^{TX} - \tau_B^{RX})] \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: $T_A - T_B$ 表示 A 站原子钟与 B 站原子钟之间的时差; $\Delta T_A - \Delta T_B$ 表示 A、B 两站调制解调器测量值之差; $(\tau_A^U + \tau_B^D) - (\tau_B^U + \tau_A^D)$ 表示信号在两个方向上传输的延迟之差; $(\tau_{AB} - \tau_{BA})$ 表示两条链路的卫星转发器之差; $\Delta\tau_R$ 表示地球旋转引起的链路非对称误差; $(\tau_A^{TX} - \tau_A^{RX}) - (\tau_B^{TX} - \tau_B^{RX})$ 表示 A、B 两站的发射、接收部分延迟差的差值。

卫星双向时间比对的精度之所以能够达到纳秒量级,主要是受惠于收发链路的对称性。但实际上双向比对中两站间的钟差测量还是受到空间链路时延和地球站通道时延等不对称因素的影响,这些因素主要包括电离层时延、对流层时延、Sagnac 效应、卫星轨道摄动、地面站变频设备时延及调制解调器自身时延等。而在众多误差来源中,地面站收发链路时延不对称对时间比对精度的影响最大,因此双向系统中对时间比对调制解调器的设计要求也更高。

对于目前主流的调制解调器来说,由于受到接收通道的限制,多站间的卫星双向时间比对需要借助于链路切换开关来完成。一般一个卫星双向时间比对主站只能同时与三个站进行时间比对,而要与另一组 TWSTFT 站进行比对则需要改变 Tx 和 Rx 设置,但这通常需要大约 40 秒至 1 分钟的时间来重新建立比对链路,因此这种时分比对方案会使卫星双向时间比对的比对效率降低。

为提高卫星双向时间比对的效率,北京无线电计量测试研究所研制出一种新的多通道的调制解调器。其发射单元采用直接序列扩频和 BPSK 调制设计,而在信号接收端采用 FFT 并行捕获算法实现对接收信号快速搜索和捕获;采用二阶锁频辅助三阶锁相环路设计达到动态性能和跟踪精度的平衡;采用二阶延迟锁定环(DLL)来实现对码相位的精密跟踪和测量。调制解调器的解调测量单元的硬件设计采用现场可编程门阵列(FPGA)和数字信号处理芯片(DSP)的全数字结构,提高信号处理能力,能够实现最多六个站间的同时比对。

此外,为完成对 BIRMM 调制解调器的性能评估,进行了短基线卫星双向时间比对试验。该验证系统采用两个铷原子频标分别作为两个 BIRMM 调制解调器的时间和频率参考,利用两个 1.2 米直径天线的地球站和中星 10 号同步卫星建立卫星双向时间比对链路。一

方面通过双向比对调制解调器测量两原子钟的钟差,而与此同时,利用外部高精度的商用时间间隔计数器直接测量两个 1 PPS 信号,然后对这两个测量结果作求差运算,结果显示其差值具有非常小的不稳定性,在 2.5MChip/s 码速率时其标准偏差(1σ)约为 0.13ns。

2 调制解调器设计

2.1 调制解调器结构

调制解调器主要由伪码调制单元、解调测量单元、内嵌铷原子频标单元,时间间隔测量单元,频率分配放大单元、小数频率综合单元,倍频单元,BDS/GPS 接收单元等组成。图 1 显示了调制解调器的结构框图及其内在联系。内嵌铷原子频标单元是内部各功能单元的频率参考,伪码调制单元通过扩频和 BPSK 调制将时间信号和数据信息调制到中频 70MHz 载波。其接收到的 70MHz 中频信号通过自动增益控制(AGC)单元将信号电平稳定到 A/D 转换芯片的输入范围内。解调测量单元通过欠采样将模拟信号转换为数字信号并进行信号的捕获、载波和码相位精密跟踪、码相位测量信号等工作。BDS/GPS 接收单元用于两地数据处理的时标的毫秒级同步。

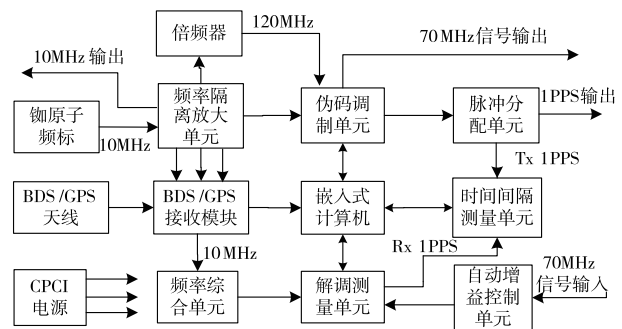


图1 BIRMM 调制解调器功能框图

2.2 信号调制

本地 1PPS 信号和测量数据通过伪码调制单元调制到伪随机序列上,然后通过 BPSK 调制将基带信号转变为 70MHz 的中频信号。图 2 是伪码调制单元的功能框图。嵌入式计算机通过串行通信端口(COM)向 FPGA 发送控制命令,选择系统工作的码速率、码型、输出功率等系统参数。待工作状态确定后,在 1PPS 脉冲沿控制下开始组帧,数据帧主要包含帧头信息、时间戳、解调测量信息及循环冗余校验位(CRC)等。最终将数据帧调制到中频输出。图 3 和图 4 分别为数据帧格式和中频信号输出频谱。

2.3 FFT 快速捕获

解调测量过程中首先需要进行信号的捕获,为了提高捕获速度,我们采用 FFT 快速捕获算法,在频域实现对码相位和多普勒频率的二维搜索,从而实现信号

在捕获模块完成伪码相位的预测之后,本地伪码和接收信号的伪码完成粗对齐,误差在 $1/4$ 码片之内. 随后转入码跟踪过程,进一步精确对准码相位. 由于系统中存在多普勒频率,这使得伪码码率也增加了码多普勒频率. 在本系统中采用载波辅助窄相关 DLL 技术,来消除大部分的码多普勒频率,这样可以降低伪码相位跟踪环的阶数,简化伪码相位跟踪环设计. 而码跟踪环路的鉴别器算法采用归一化的非相干超前减滞后幅值法,这种算法对幅度变化不敏感. 码的环路滤波器的传递函数为:

$$y(k) = y(k-1) + \frac{(\sqrt{2}\omega_n + \omega_n^2 T)}{K} e_c(k) - \frac{\sqrt{2}\omega_n}{K} e_c(k-1) \quad (2)$$

式中, ω_n 为环路滤波器的自然角频率; $\omega_n = 1.89B_{LF}$; B_{LF} 为环路带宽; T 为环路滤波器输入采样时间间隔(等于环路更新时间).

3 主控软件

主控软件的功能主要是完成主控机与调制解调器各功能模块的数据交互及控制指令的发送,并监测系统工作状态,完成双向比对数据的计算处理并画出钟差数据曲线. 为满足无人值守的需要,提供了自动比对功能,可以以天循环或小时循环模式自动完成对码型、码速率、输出功率等参数的设置. 其工作界面如图 9 所示.



图9 软件界面

4 试验验证

为了评估 BIRMM 调制解调器的性能,进行了短基线卫星双向时间比对试验. 所使用的设备和实验系统的连接如图 10 所示. 在该系统中,地球站由 Anacom 公司的 Ku 波段的变频设备(transceiver)和 1.2 米直径的天线组成. 两个 BIRMM 调制解调器使用内置铷频率标准作为时钟参考连接到地球站. 两个比对站通过中星 10 号通信卫星建立了卫星双向时间比对链路. 图 11 显示了建筑物屋顶的试验系统,两套地面站之间距离大概 3 米左右. 信号到达时间差,电离层时延, Sagnac 效

应,卫星轨道摄动等对两个比对站的影响是等效的,因此这些方面的影响可以忽略不计. 测量时,两台 BIRMM 调制解调器通过卫星双向时间比对法测得两站的钟差为 ΔT_M ,外部高分辨力时间间隔计数器 CNT91R(用铷钟作为外标)测得两站的 1 PPS 时差为 ΔT_R . 从理论上来说,外部计数器的测量结果与双向时间比对的测量结果应该完全相同,但实际上由于中频设备时延和线缆时延的不对称性会导致双向比对测量结果存在偏差,而 $\Delta T_M - \Delta T_R$ 的变化则反映了卫星双向时间比对系统的性能.

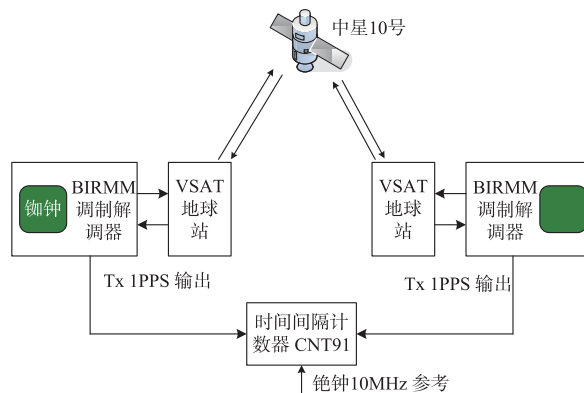


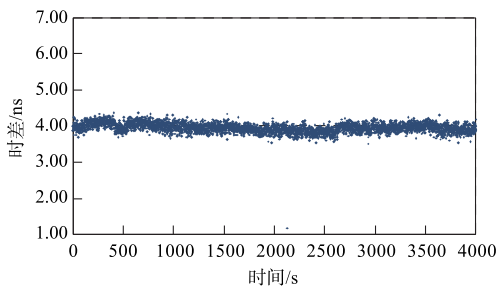
图10 短基线系统试验框图



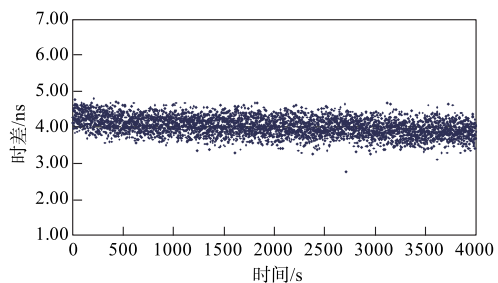
图11 系统试验室外设备(两个1.2m口径天线,两个变频设备,红色框图内设备为自研的BIRMM调制解调器)

图 12 是在 1Mchip/s 、 2.5Mchip/s 两种码速率下的测量结果,试验测试中,每次测量时间保证在 1h 以上,从图中可以看出测量数据比较稳定,经计算可知,在 2.5Mchip/s 码速率下,测量偏差平均值在 4ns 左右,测量结果标准偏差(1σ)为 0.13ns ,而在 1Mchip/s 码速率下,测量偏差平均值基本保持不变,但其测量抖动有所增大,测量结果标准偏差(1σ)为 0.26ns .

为了进一步评估 BIRMM MODEM 的性能水平,与 Timetech 公司的 SATRE 设备进行了比较试验. 该试验采用如图 13 的系统连接方式,试验中必须保证两个实验的时间和频率源相同,我们将 BIRMM MODEM 的 10MHz 信



(a) BIRMM 调制解调器 2.5MChip/s 码速率测量结果



(b) BIRMM 调制解调器 1MChip/s 码速率测量结果

图 12 计数器与双向比对系统钟差测量值的差值

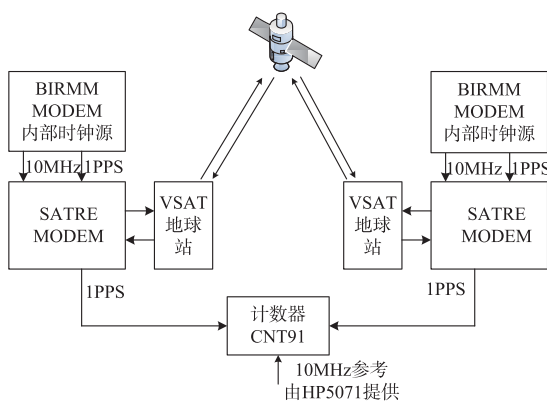


图 13 对比实验方案

号和 1PPS 信号同步给 SATRE. 同时,将两台设备的 1PPS 信号时间源输入给外部高精度的时间间隔计数器 CNT91,并选用 HP5071 作为其外部参考,通过比对调制解调设备给出的时差测量结果与外部时间间隔计数器的时差测量结果,比对两种设备的测量性能.

图 14,图 15 分别显示了两种设备的测量比对结果,其中每条曲线为两种设备双向比对测量值与外部时间间隔计数器的差值.

对测试数据进行标准偏差计算,可以得到如表 1 中的结果.

表 1 标准试验系统结果数据

码频率	SATRE 标准差	BIRMM 标准差
2.5MChip/s	0.14ns	0.13ns
1MChip/s	0.25ns	0.26ns

在对 BIRMM 调制解调器测试过程中所使用的数

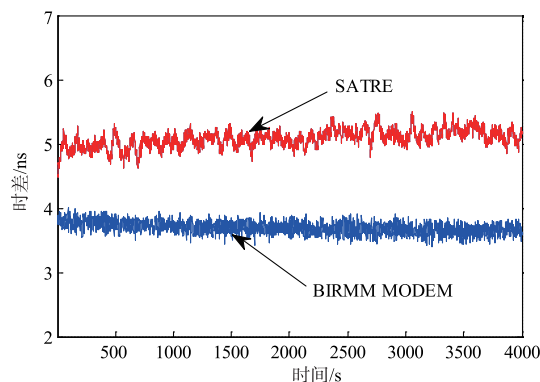


图 14 2.5MChip/s 码速率比较

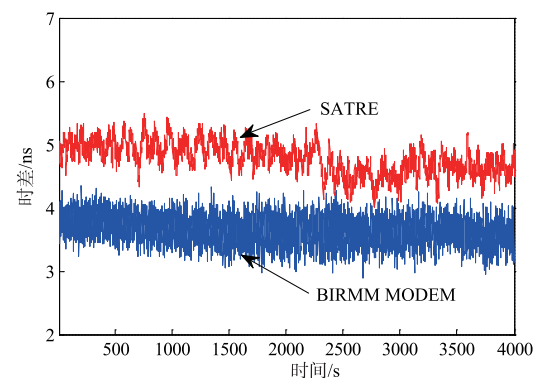


图 15 1MChip/s 码速率比较

据都是每秒钟得到的实时数据,并未经过平滑滤波的处理.而实际上,采用 N 秒数据的平滑滤波后会大大提升设备的性能.以 2.5MChip/s 的码速率测量结果为例,如果采用 100s 的平滑滤波处理,其测量结果标准偏差 (1σ) 会降为 50ps 左右.

5 结论

文章介绍了卫星双向时间比对系统中频信号处理设备的工作原理,并对短基线卫星双向时间比对试验结果进行了分析,测试结果表明该调制解调器的性能与国外主流产品的性能指标相当.卫星双向时间比对除了可实现远距离高精度时间同步外,还可以实现原子钟频率准确度和长期频率稳定度的传递,但是由于系统附加短期频率稳定度较差(秒稳只达到 E-10 量级),因此该技术不适合完成原子钟短期频率稳定度的远程传递.

参考文献

[1] Zhang Victor, Lombardi Michael A. Time and frequency transfer activities at NIST [A]. 40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting [C]. Reston, Virginia, 2008. 623 - 639.

[2] Imae Michito, Hosokawa Mizuhiko, Imamura Kuniyasu.

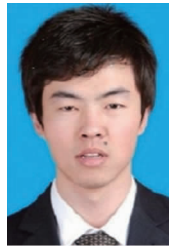
- Two-way satellite time and frequency transfer networks in Pacific Rim region[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 559 – 562.
- [3] Zhang Shengkang, Zhang Li, Yang Yujie. Ultra-short term clock offset prediction for two-way satellite time synchronization[A]. European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)[C]. Prague, 2013. 335 – 338.
- [4] Tseng W H, Lin S Y, Peng H M, Lin H T, Liao C S. The comparison between TWSTFT and GPS time transfers on inter-continental baseline links[A]. Proceedings of 20th European Frequency and Time Forum[C]. Braunschweig, 2006. 557 – 561.
- [5] Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W J. GPS: Primary Tool for Time Transfer[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(1): 163 – 172.
- [6] Yao J, Levine J. GPS measurements anomaly and continuous GPS carrier-phase time transfer[A]. 46th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting[C]. Boston, Massachusetts, 2014. 164 – 169.
- [7] Yao J, Levine J. A new algorithm to eliminate GPS carrier-phase time transfer boundary discontinuity[A]. 45th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting[C]. Bellevue, Washington, 2013. 292 – 303.
- [8] Kirchner D. Two-way time transfer via communication satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 983 – 990.

作者简介



王学运 男, 1982 年 1 月出生, 河北唐山人. 2008 年毕业于北京交通大学, 获得硕士学位. 高级工程师, 主要研究方向为远程时间频率传递.

E-mail: wxy203_3@126.com



王海峰 男, 1986 年 12 月出生, 北京人. 2012 年毕业于北京航空航天大学, 获得硕士学位. 工程师, 主要研究方向为远程时间频率传递.