

基于异步通信链路的星间基线精密测量技术研究

李雪^① 张其善^① 习清伶^② 钟兴旺^② 熊之凡^②

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(中国空间技术研究院 504 研究所 西安 710000)

摘要: 卫星成员之间信息共享、星间基线测量是分布式航天器(Distributed Spacecraft, DS)实现多星协同完成天基虚拟探测任务的关键技术。该文提出一种分布式航天器星间通信/基线测量的综合链路体制,重点研究了基于星间异步通信链路的双向异步传输帧非相干扩频测距的方法,详细给出算法的计算公式推导和模型误差分析。技术验证系统的实验结果表明该文提出的方法性能指标先进、信道利用率高、功能集成度高,为型号任务提供了一种先进的设计理念。

关键词: 分布式航天器; CCSDS 近程链路协议; 通信/基线测量综合体制; 星间异步通信/测距

中图分类号: TN927, V443.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1525-05

Inter-satellite Baseline Measurement Technology via Asynchronous Communication Link

Li Xue^① Zhang Qi-shan^① Xi Qing-ling^② Zhong Xing-wang^② Xiong Zhi-fan^②

^①(School of Electronic & Information, Beihang University, Beijing 100083, China)

^②(Xi'an Institute of Space Radio Technology, the Chinese Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Information sharing and baseline measurement inter-satellites are key technologies for the space based virtual exploring mission of Distributed Spacecraft(DS). The integrated mode of inter-satellite communication and baseline measurement for DS is proposed, the method of precisely ranging and time synchronization by bidirectional Asynchronous transfer frame via inter-satellite direct sequence spread spectrum link are researched, then the iteration algorithm of asynchronous ranging/time synchronization and model error of the algorithm is proposed and analyzed. The experiment results and analysis of experimenting system show that the integrated mode of inter-satellite communication and baseline measurement presented in the paper achieves excellent precision, functions integrated in one device with more effective utilization of radio channel, and provides a advantage design approach for the space mission of DS.

Key words: Distributed Spacecraft (DS); CCSDS proximity-1 protocol; Integrated mode of communication and baseline measurement; Inter-satellite Asynchronous Communication/Ranging Unit (ACRU)

1 引言

分布式航天器(Distributed Spacecraft, DS)是未来航天任务的主要实施模式之一,由多颗同构或者异构的成员卫星以编队组网形式实施^[1-4],作为太空分布式虚拟探测体制的主要手段,例如:分布式合成孔径雷达、天基多基地无源被动雷达、干涉式深空探测器,等等。

本文的研究旨在研究一种星间通信/基线测量的综合链路体制,在统一信道内综合实现 DS 网内任意两成员节点的星间通信、基线精密测量和时间同步。研制成功了技术验证系统并完成大量的技术试验,为研制综合链路体制的星载通信/基线测量终端提供了理论指导和设计依据。

2 星间通信/基线测量的综合链路体制

2.1 基于 CDMA/FDMA 的分布式航天器组网通信体制

基于 CDMA+FDMA 的组合多址组网模式(有中心节点或无中心节点)能够建立一种覆盖全网成员星的多址通信/基线测量综合链路体制,实现任意成员节点信息的网内实时共享、任意两节点之间精密基线测量与时间同步。

这种 CDMA+FDMA 的组合多址模式为每个节点分配一个发射载波频点,每条星间通信链路分配一个扩频伪随机码序列,对于包含 n 个成员卫星的分布式航天器,共分配 n 个载波频点 $f_j(j=1,2,\dots,n)$ 和 $n \times (n-1)/2$ 个扩频码序列 $PN_i(i=1,2,\dots,n^2/2 - n/2)$ 。这种体制能实现任意时刻全网内任意两节点的异步全双工透明通信,不受其他节点影响且不对其他节点产生影响。

2.2 综合链路体制中的星间通信与非相干测距

本论文提出的综合链路体制具有如下4个特点:

(1)两卫星之间利用星间全双工通信链路在单载波统一信道中实现异步数据交互和双向非相干测距,工作在异步全双工扩频模式,任意两卫星间通信/基线测量过程对其他节点透明;

(2)两卫星相互独立地向对方发送结构相同的传输帧,本地基带数据发送码时钟、发射载波频率由本地频率综合器产生,不与对方相参,发送方与接收方之间无频率、相位关系约束^[5, 6];

(3)两卫星相互独立地提取本地接收单元码跟踪环路的历元计数器锁存值和本地时频基准标称值,计算出历元形式(Epoch)的本地伪距,将其嵌入本地传输帧向对方发送;

(4)两卫星利用本地测量伪距和接收到对方经传输帧发来的伪距通过计算获得星间基线测量值和两本地钟差,并实现时间同步调整。

卫星在取样时刻提取的发送帧历元时与接收帧历元时代数差定义为本地伪距,包含此时刻两卫星之间的几何距离和本地钟面时偏差,二者需通过算法实现解耦。

2.3 星间通信/基线测量综合体制的数据协议

多数任务中分布式航天器编队组网的拓扑构形一般尺度不大,任意两成员星最远距离一般在几百公里左右,因此星间通信链路遵循 CCSDS Proximity-1 近程空间链路通信协议蓝皮书建议^[7],参考 Version-3 的传输帧结构设计用于通信/基线测量综合体制的传输帧(图 1),包括:24bit 的帧同步码 ASM(0xFAF320),40bit 的结构固定数据帧导头 header,长度小于 16344bit 的数据域,32bit 的 CRC 校验码。数据域前部定义为勤务段,嵌入对应链路标识符、本地钟面时编码和本地伪距编码向对方发送。一般帧长固定,帧频为整数赫兹(一般在 1Hz~20Hz)。

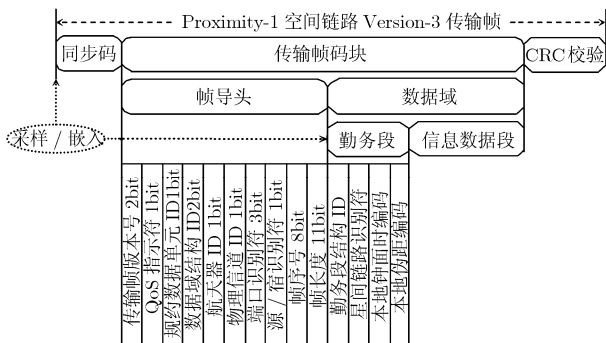


图 1 Proximity-1 链路协议定义的 Version-3 传输帧结构

3 异步体制的星间基线精密测量技术

3.1 基于异步传输帧的星间基线测量原理

本文提出的星间通信/基线测量综合链路设备称为:异步通信/测距终端(Asynchronous Communication and

Ranging Unit, ACRU),假定 DS 网内的任意成员卫星均配置了 ACRU。以两颗卫星 A, B 为研究对象,ACRU_A, ACRU_B 各自独立地向对方发送 CCSDS Proximity-1 版本-3 传输帧,在本地接收解扩/解调单元的载波跟踪环路、码跟踪环路对接收信号良好锁定、位同步帧同步条件下,于本地传输帧同步码前沿(或者后沿)的发送时刻采样本地时钟计数器、接收通道码跟踪环路的历元计数器,从当前接收对方传输帧的勤务段提取出对方帧同步码前沿发送时刻,并计算出历元形式的本地伪距值。ACRU_A, ACRU_B 各自独立地利用本地测量伪距、本地钟面时、接收到对方经传输帧发来的对方本地伪距、对方本地钟面时,通过算法计算出星间距离、同步误差(钟差)、两终端采样时间间隔,进行时间同步调整。

$$\left. \begin{aligned} \rho_A(t_1) &= t_{A_send}(t_1) - t_{B_arrive}(t_1) \\ \rho_B(t_2) &= t_{B_send}(t_2) - t_{A_arrive}(t_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中 t_1, t_2 为 ACRU_A, ACRU_B 的本地理想采样时刻(UTC 时间,单位: ns),采样时间间隔为 $\Delta t = t_2 - t_1$; $\rho_A(t_1), \rho_B(t_2)$ 为 ACRU_A, ACRU_B 测得的 t_1, t_2 时刻本地伪距(单位: ns); $t_{A_send}(t_1), t_{A_send}(t_2)$ 为 t_1, t_2 时刻被 ACRU_A, ACRU_B 采样的本地传输帧发送历元时(帧同步码前沿); $t_{B_send}(t_1), t_{B_send}(t_2)$ 为 t_1, t_2 时刻被 ACRU_A(ACRU_B)采样的 ACRU_B(ACRU_A)传输帧到达历元时。式(1)右方的各参数由 ACRU_A, ACRU_B 的本地测量获得并与对方共享。下面给出双向异步传输帧非相干测距方法的算法构造及模型误差分析。

3.2 异步测距/时间同步的理论计算模型

以 ACRU_A 为例(ACRU_B 同理)给出星间基线计算公式。根据数字微波通信和无线电测距理论^[5, 6, 8, 9],经解析分析、推导得

$$\left. \begin{aligned} \Delta t &= 0.5[\rho_A(t_1) - \rho_B(t_2) - 2\Delta t_{AB_send}(t_2) + \tau_{delay-}] \\ &\quad + (\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB+}} + \delta_{\tau-}) \\ \Delta t_{AB}(t_1) &= 0.5[\rho_A(t_1) - \rho_B(t_2) + \tau_{delay-}] + (\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB-}} + \delta_{\tau-}) \\ \tau(t_1) &= 0.5[\rho_A(t_1) + \rho_B(t_2) - \tau_{delay+}] - (\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB-}} + \delta_{\tau+}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中, $\tau(t_1), \tau(t_2)$ 为 t_1, t_2 时刻两卫星天线相位中心之间的空间距离(用电波传输时延表示,单位: ns); $\Delta t_{AB}(t_1) = t_{A_send}(t_1) - t_{B_send}(t_1)$ 为 t_1 时刻的钟差(时间同步误差); $\Delta t_{AB_send}(t_2) = t_{A_send}(t_1) - t_{B_send}(t_2)$ 为 t_1 时刻被 ACRU_A 采样的本地发送帧历元时与 t_2 时刻被 ACRU_B 采样的本地发送帧历元时之算术差; $\tau_{delay+}, \tau_{delay-}$ 为组合零值漂移,能够精确标定(一般标定后误差能够达到 $<0.1ns$)。式(2)中的“(…)”内各项为解析形式的误差项,说明如下:

$$\Delta\tau = 0.5[\tau(t_2) - \tau(t_1)] = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{v(t)}{c} dt \quad (3)$$

式(3)中, $v(t)$ 为两颗卫星之间相对速度, c 为真空光速。

$$\left. \begin{aligned}
& \delta_{\tau+} = 0.5 \left[\int_{t_1 - [\tau(t_1) + \tau_{BA_delay}]}^{t_1} \frac{\Delta f_B(t)}{f_{code}} dt + \int_{t_2 - [\tau(t_2) + \tau_{AB_delay}]}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t)}{f_{code}} dt \right] \\
& \delta_{\tau-} = 0.5 \left[\int_{t_1 - [\tau(t_1) + \tau_{BA_delay}]}^{t_1} \frac{\Delta f_A(t)}{f_{code}} dt - \int_{t_2 - [\tau(t_2) + \tau_{AB_delay}]}^{t_2} \frac{\Delta f_B(t)}{f_{code}} dt \right] \\
& \delta_{\Delta f_A} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_A(t) - f_{code}}{f_{code}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t)}{f_{code}} dt \\
& \delta_{\Delta f_B} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_B(t) - f_{code}}{f_{code}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_B(t)}{f_{code}} dt \\
& \delta_{\Delta f_{AB+}} = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t) + \Delta f_B(t)}{f_{code}} dt \\
& \delta_{\Delta f_{AB-}} = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t) - \Delta f_B(t)}{f_{code}} dt = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_A(t) - f_B(t)}{f_{code}} dt
\end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned}
& \delta_{\Delta f_A} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_A(t) - f_{code}}{f_{code}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t)}{f_{code}} dt \\
& \delta_{\Delta f_B} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_B(t) - f_{code}}{f_{code}} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_B(t)}{f_{code}} dt
\end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned}
& \delta_{\Delta f_{AB+}} = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t) + \Delta f_B(t)}{f_{code}} dt \\
& \delta_{\Delta f_{AB-}} = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta f_A(t) - \Delta f_B(t)}{f_{code}} dt = 0.5 \int_{t_1}^{t_2} \frac{f_A(t) - f_B(t)}{f_{code}} dt
\end{aligned} \right\} (6)$$

式(4)-式(6)中: $f_A(t)$, $f_B(t)$ 为 ACRU_A, ACRU_B 的本地扩频码时钟频率的真值(由各自的本地频标产生), f_{code} 为本地扩频码时钟频率的标称值(名义值), $\Delta f_A(t) = f_A(t) - f_{code}$, $\Delta f_B(t) = f_B(t) - f_{code}$ 为频率偏差; τ_{AB_delay} 为 ACRU_A 发送信号内部时延与 ACRU_B 接收信号内部时延之和; τ_{BA_delay} 为 ACRU_B 发送信号内部时延与 ACRU_A 接收信号内部时延之和。

根据式(3)-式(6)经推导得

$$\left. \begin{aligned}
& |\Delta\tau| \leq \lambda |\Delta t| \quad \left(\lambda = \max_t [0.5c^{-1}|v(t)|] \right) \\
& |\delta_{\Delta f_A}| \leq \mu |\Delta t|, \quad |\delta_{\Delta f_B}| \leq \mu |\Delta t| \quad \left(\mu = \max_t \left[\frac{|\Delta f_A(t)|}{f_{code}}, \frac{|\Delta f_B(t)|}{f_{code}} \right] \right) \\
& |\delta_{\Delta f_{AB+}}| \leq \mu |\Delta t|, \quad |\delta_{\Delta f_{AB-}}| \leq \mu |\Delta t| \\
& |\delta_{\tau+}| \leq \mu\tau, \quad |\delta_{\tau-}| \leq \mu\tau \quad \left(\tau = \max_t [\tau(t)] \right)
\end{aligned} \right\} (7)$$

式(2)给出了 t_1 时刻星间基线、钟差、采样时间间隔的计算公式(t_2 同理)。3 个等式右边第 1 项(“0.5[...]”内几项)作为算法输入量(各参数由测量、计算和地面标定获得); 第 2 项(“(…)”内几项)代表理论不确定项(算法的模型误差)。不确定项的影响与 4 个物理量相关: (1)本地频率基准的频率真值相对标称值的准确度/稳定度 μ ; (2)两终端采样时间间隔 Δt ; (3)两颗卫星在 t_1 到 t_2 时间段内的相对运动速度 $v(t)$; (4)星间几何距离 $c\tau(t)$ 。结合式(7)讨论如下:

(1)采用超稳晶振或者原子频标, 准确度/稳定度参数 $\mu \leq 1 \times 10^{-11}$;

(2) Δt 最大不超过一个传输帧周期且能被准确测量并通过时间同步调整后收敛到 0;

(3)分布式航天器成员卫星相对速度较小, 一般 $|v(t)| < 1\text{km/s}$, 即: $\lambda \leq 1.7 \times 10^{-6}$;

(4)分布式航天器编队拓扑构形的尺度不会太大, 成员卫星一般分布在几千公里范围内, 这里认为 $c\tau(t) \leq 3000\text{km}$,

即: $\tau \leq 0.01\text{s}$, 星间基线测量、钟差测量、采样时间间隔测量的算法模型误差跟 μ 和 τ 之积相关, $\mu\tau \leq 0.1\text{ps}@$
 $\mu \leq 1 \times 10^{-11}$ & $\tau \leq 3000\text{km}$ 。

结合式(2)、式(7)能够看出, 当采样时间间隔 $\Delta t=0$ 时, 其他因素引起的模型误差是 $\leq 0.1\text{ps}$ 的微小量(相当于 0.03mm 的基线测量误差)。

3.3 异步测距/时间同步的迭代算法与计算残差分析

分布式航天器实现理论意义上的时间同步是满足 $\Delta t_{AB}(t)=0\text{ns}$, $\Delta t(t)=0\text{ns}$ 的理想条件。实际操作中根据任务需求给定钟差阈值(如: $\Delta t_{AB}(t) \leq 100\text{ns}$, $\Delta t \leq 100\text{ns}$), 超出阈值时(或者定期)实施星间时间同步处理调整使星间钟差回归到某一目标值(如: $\Delta t_{AB}(t) \leq 1\text{ns}$, $\Delta t(t) \leq 1\text{ns}$)。

星间基线测量和时间同步调整采用交替过程实施计算和时间同步调整, 即: 每步处理以帧周期为节拍, 当前步利用本地传输帧同步码前沿采样发送帧和接收帧当前历元后, 先根据式(2)忽略算法的模型不确定项进行计算, 再根据采样时间间隔和钟差的当前计算结果 $\Delta t(k)$, $\Delta t_{AB}(k)$ 进行本次时间同步调整; 到下一帧周期开始时再进行同样的下一步。构造式(8)进行计算当前步的采样时间间隔、钟差、星间基线:

$$\left. \begin{aligned}
& \Delta \tilde{t}(k) = 0.5[\rho_A(k) - \rho_B(k) - 2\Delta t_{AB_send}(k) + \tau_{delay-}], \\
& \Delta \tilde{t}_{AB}(k) = 0.5[\rho_A(k) - \rho_B(k) + \tau_{delay-}], \\
& \tilde{\tau}(k) = 0.5[\rho_A(k) + \rho_B(k) - \tau_{delay+}], k = 1, 2, \dots
\end{aligned} \right\} (8)$$

利用式(8)的计算结果进行同步调整后, 根据式(2)可得同步调整残差式(9):

$$\left. \begin{aligned}
& \Delta t(k+1) = \Delta t(k) - \Delta \tilde{t}(k) = (\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB+}} + \delta_{\tau-}), \\
& \Delta t_{AB}(k+1) = \Delta t_{AB}(k) - \Delta \tilde{t}_{AB}(k) = (\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB-}} + \delta_{\tau-}), \\
& \delta\tau(k) = \tau(k) - \tilde{\tau}(k) = -(\Delta\tau - \delta_{\Delta f_{AB-}} + \delta_{\tau-}), k = 1, 2, \dots
\end{aligned} \right\} (9)$$

从式(9)看出: 本次时间同步调整后(第 k 步), 计算式(2)的不确定项(算法模型误差项)成为本次时间同步调整的残差, 即: $\Delta t(k+1)$, $\Delta t_{AB}(k+1)$, 在下一帧周期中再次进行计算-同步调整过程中消除; $\delta\tau(k)$ 为星间基线 $\tau(k)$ 的计算残差。综合式(2)-式(9), 根据最优化算法理论推导得:

$$\|\Delta t(k+1) - \alpha|\delta_{\tau-}|\| \leq \beta\|\Delta t(k) - \alpha|\delta_{\tau-}|\|, k = 1, 2, \dots (10)$$

式(10)中, $\beta = \lambda + \mu$, $\alpha = \frac{1}{1 - \beta}$; $|\Delta t(k)| \geq \alpha|\delta_{\tau-}|$ ($\forall k = 1, 2, \dots$)。迭代算法是收敛因子为 β ($\beta < 1$) 的逼近算法, 最终将收敛到 $\alpha|\delta_{\tau-}|$ 。根据式(8)-式(10)可知: 经几次计算-时间同步调整的迭代过程后两终端 ACRU_A, ACRU_B 的采样时间间隔 $\Delta t(k)$ 的计算残差(测量误差、时间同步误差)将迅速收敛到 $\alpha|\delta_{\tau-}|$; 同时, 钟差 $\Delta t_{AB}(k)$ 的理论测量误差将收敛到 $\beta(\alpha|\delta_{\tau-}|) + |\delta_{\tau-}|$, 星间基线 $\tau(k)$ 的理论测量误差 $\delta\tau(k)$ 将收敛到 $\beta(\alpha|\delta_{\tau-}|) + |\delta_{\tau+}|$ 。显然, $\Delta t(k)$, $\Delta t_{AB}(k)$, $\delta\tau(k)$ 的理论测量误差为同一量级(均 $< \alpha\mu\tau$), 前已讨论此残差为极微小量可以忽略($< 0.1\text{ps}$)。

根据式(10)对收敛性能的分析如下: 设进行时间同步调

整之前的初始值为 $\Delta t(i)$ (本地第 i 帧测量点), 则时间同步调整 k 次后的 $\Delta t(i+k)$ (本地第 $i+k$ 帧测量点)为

$$\|\Delta t(i+k) - \alpha|\delta_{\tau-}\| \leq \beta^k \|\Delta t(i) - \alpha|\delta_{\tau-}\| \quad (11)$$

若初始值 $|\Delta t(i)| = 60\text{s}$, $\alpha|\delta_{\tau-}| < 0.1\text{ps}$, $\beta = 1.7 \times 10^{-6}$, 则迭代计算-时间同步调整 $k=2$ 次后 $|\Delta t(i+2) - 0.1\text{ps}| \leq 173.4\text{ps}$; $k=3$ 次后 $|\Delta t(i+3) - 0.1\text{ps}| \leq 2.9578 \times 10^{-4}\text{ps} \approx 0\text{ps}$ (残差小于收敛点一个量级以上就可以认为已收敛到目标值), 可见收敛速度极快。

4 技术验证实验的结果与分析讨论

搭建星间组网通信/基线测量终端技术验证系统对 ACRU_A, ACRU_B 的星间通信、基线测量、钟差测量、时间同步等功能与性能技术指标进行了比较完整的测试, 这里给出部分测试结果并分析讨论。图2-图5是 ACRU_A 与 ACRU_B 星间通信/基线测量、时间同步技术验证试验的部分实测结果。试验中规定帧周期为 0.2s, 伪距和真距测量计算输出率 5Hz。考虑到测试过程某些项目需要, 计算时叠加了 600,000ns(180km)的偏置量。在本课题试验系统中, 扩频码速率为 5.115Mcps, 码长 1023, 载噪比 $C/N_0 = 48\text{dB/Hz} - 82\text{dB/Hz}$ 范围变化。采用 4096 点 FFT 实现伪码相位频域并行捕获, 载波跟踪环采用叉积鉴频+二阶锁频环(FLL)与反正切鉴相+三阶锁相环(PLL), 码跟踪环采用二阶延迟锁定环, 引入载波辅助码环跟踪技术补偿星间相对运动加速度应力引起的动态误差。在载噪比 82dB/Hz 情况下实测基线方差为 $1\sigma = 0.132\text{ns}$, 在载噪比 48dB/Hz 情况下实测基线方差为 $1\sigma = 0.316\text{ns}$, 在载噪比 82dB/Hz 情况下理论计算基线方差 $1\sigma = 0.122\text{ns}$, 在载噪比 48dB/Hz 情况下理论计算基线方差 $1\sigma = 0.297\text{ns}$, 实测基线方差与理论计算基线方差基本符合, 且动态多普勒频率跟踪能力优于 $\pm 7\text{kHz}$, $\pm 500\text{Hz/s}$ 。

图 2 给出了依次使用 10ns, 11ns, 13ns, 16ns, 20ns 精密延迟线($\pm 0.3\text{ns}$)联接 ACRU_A-ACRU_B 的测试结果。测量结果显示能清晰地分辨出 10ns~20ns 延迟线长度以及 5 根线之间的 4 个延迟跨越(1ns, 2ns, 3ns, 4ns), 统计计算出基线测量噪声方差为 $1\sigma = 0.132\text{ns}(3.96\text{cm})(\text{r.m.s.})$ 。

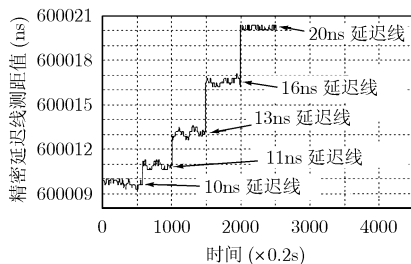


图2 不同精密延迟线下静态测距精度实验结果

图 3 给出了两终端发射通道同步模拟多普勒动态时的基线测量实测结果(局部放大显示), 模拟正弦形式多普勒的频移曲线 $\Delta f_d(t) = 6000\sin(2\pi t/T_d + \varphi)$ (Hz) ($T_d = 53\text{s}$)。模拟多普勒动态时的基线理论曲线和实测曲线相差最大为 0.35ns, 较大动态条件下的基线测量精度满意。

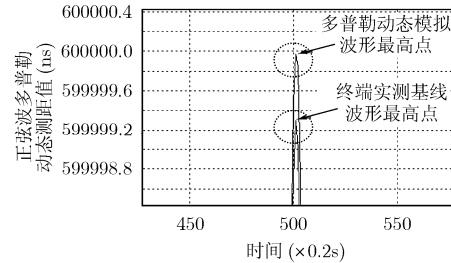


图3 正弦波多普勒条件测距精度实验结果

图 4 给出了钟差测量结果。照片显示了实测的钟差漂移波形, 并与专用时间间隔测量仪器 HP53132A 的测量输出进行了比较。从图中看出, 两者保持完全相同的斜率变化, 且保持固定的约 3.2ns 的差值, 这是由于测量方法不同、测量结果路径延时不同引起的读数偏差。

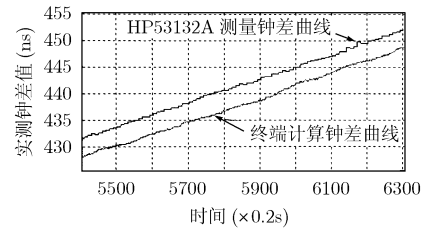


图4 钟差测量与时间同步功能实测结果

图 5 给出了根据钟差测量结果进行时间同步调整的功能测试结果, 程控设定时间同步调整阈值为 100ns, 自上次时间同步调整结束后钟差逐渐漂移增大至 100ns(跟铷原子频标的准确度和稳定度相关, 本实验中约需要 15min)即执行一次时间同步调整使得调整后的钟差目标值为 1ns 以内。

由此可见, 试验结果与本文及参考文献的理论分析的公式、结论良好符合。采用提高码片速率、提高载噪比、引入

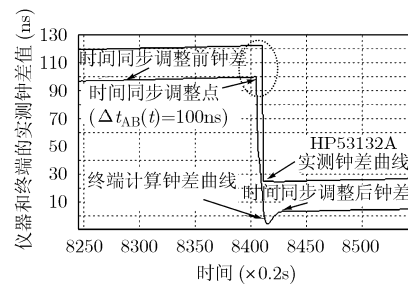


图5 时间同步调整功能测试结果

载波相位积分平滑伪距、实时统计滤波等措施能获得更微小的测量方差。

5 结束语

本论文提出一种用于分布式航天器成员星间通信/基线测量的综合链路体制, 基于码分/频分组合多址模式和CCSDS Proximity-1近程空间链路协议实现星间双向异步传输帧扩频测距/时间同步的方法, 重点讨论了技术原理并给出计算公式和测量误差分析, 从理论上证明本体制的基线测量、钟差测量和时间同步调整的算法模型能达到的理论精度。课题研究完成了两台星间异步通信/测距终端研制并构成技术验证系统, 给出了有代表性的试验结果及误差分析。实验结果表明本论文提出的方法性能指标先进, 为未来型号任务提供了一种全功能星载组网异步通信/基线测量终端的设计理念。

参考文献

- [1] Crosslink Standards Report: Distributed spacecraft crosslink communications system requirements report[R]. NASA Goddard Space Flight Center, May 2002.
[http://eed.gsfc.nasa.gov/567/CrosslinkReqsReport_v05%20\(Part%202\).pdf](http://eed.gsfc.nasa.gov/567/CrosslinkReqsReport_v05%20(Part%202).pdf) [2006-10-27].
 - [2] Stadter P A, Chacos A A, and Heins R J, *et al.* Confluence of navigation, communication, and control in distributed spacecraft systems[C]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, March 10-17, 2001, Volume 2: 563-578.
 - [3] Aung M, Purcell G H, and Tien J Y, *et al.* Autonomous formation flying sensor for the starlight mission[R]. IPN Progress Report 42-152, February 15, 2003.
 - [4] Park C W, How J P, and Apots L. Sensing technologies for formation flying spacecraft in LEO using CDGPS and an inter-spacecraft communication system[C]. ION GPS 2000, Salt Lake City, September 19-22, 2000: 1595-1607.
 - [5] Jeongrae K and Tapley B D. Simulation of dual one-way ranging measurements[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2003, 40(3): 419-425.
 - [6] Jeongrae K and Tapley B D. Optimal frequency configuration for dual one-way ranging systems[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005, 42(4): 749-751.
 - [7] CCSDS 211.1-B-4. Proximity-1 Space Link Protocol—Data Link Layer[S]. CCSDS Blue Book, Issue 4. July 2006.
 - [8] CCSDS 401.1-B-17. Radio Frequency and Modulation Systems—Part 1: Earth Stations and Spacecraft[S]. CCSDS Blue Book. Issue 1. July 2006.
 - [9] Wertz J R and Larson W J. Space Mission Analysis and Design (3rd Edition)[M]. Torrance, California: Microcosm Press/Kluwer Academic Publishers, 1999: 328-341.
- 李雪: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为分布式航天器组网通信与星间测距/时间同步的理论与技术研究。
- 张其善: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进卫星导航系统、飞行器遥测/遥控等领域的新理论、新方法与新技术。
- 习清伶: 男, 1965年生, 研究员, 星间链路分系统总工程师, 主要研究方向为星间链路组网通信、测距与时间同步相关理论与技术研究。
- 钟兴旺: 男, 1966年生, 研究员, 某型号任务主任设计师, 主要研究方向为星间链路组网通信/基线测量设备研制。
- 熊之凡: 男, 1938年生, 研究员, 总工程师, 主要研究方向为航天器系统总体技术、卫星光通信系统、深空测控与通信技术研究。