导航星座激光/微波星间链路协同时间同步方法研究

刘苏洋¹, 杨宁虎¹, 郭熙业^{1*}, 陈罡¹, 杨俊^{1,2}, 孙乐园¹

1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073;

2. 国防科技大学六十三所, 南京 210007

*联系人, E-mail: 13574832047@163.com

收稿日期: 2020-06-20; 接受日期: 2020-09-09; 网络出版日期: 2020-12-11

摘要 时间同步是卫星导航系统提供定位、导航以及授时服务的关键. 星座自主运行模式下需要通过星间链路组网进行星座整网时间同步, 以支持正常的导航定位服务. 相比于微波链路, 连续建链的激光链路可以提供时标统一的、更高精度的钟差测量结果. 本文提出一种星座自主运行模式下激光/微波星间链路协同时间同步方法. 通过连续观测的激光星间链路建立时间比对网络, 基于加权平均算法生成星间时间基准; 激光比对网络外卫星通过时分体制微波链路, 利用分布式卡尔曼滤波算法溯源至星间时间基准, 实现星座整网时间同步. 基于新一代北斗星座进行整网时间同步性能仿真, 激光/微波协同时间同步方法生成的时间基准相比微波星间链路生成的时间基准, 短期、中期稳定度均有明显提高, 整网时间同步误差标准差优于0.05 ns.

关键词 激光星间链路, 微波星间链路, 协同时间同步, 分布式卡尔曼滤波

PACS: 42.62.Fi, 07.57.Pt, 05.45.Xt, 96.25.Vt

1 引言

为了在地面监测站受限于国土之内的情况下提供有竞争力的全球服务, 我国第三代北斗卫星导航系统采用了星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)技术^[1], 通过在卫星之间建立测量与通信链路, 支持北斗系统实现“一星通, 整网通”.

导航星座的定位、导航及授时服务依赖卫星间的相对时间同步. 在自主运行模式下, 导航卫星无法通过星地时间比对同步到北斗时, 星间链路技术可以提供

双向星间时间比对, 实现钟差与距离的解耦^[2], 为导航星座的时间同步与守时提供可能^[3].

目前, 北斗三号导航卫星上搭载了高精度原子钟^[4], 采用Ka星间链路技术, 钟差测量精度优于0.3 ns (RMS)^[5]. 文献[5]比较了Ka星间链路与L波段星地链路的钟差观测数据, 处理结果表明经过系统差标定的Ka链路钟差与L链路钟差参数具有一致性, 证明了Ka星间链路时间同步的可行性. 文献[6]提出了一种直接利用原始的星地和星间单程Ka伪距测量值进行一体化定轨和时间同步的方法, 卫星钟差估计和预报精度

引用格式: 刘苏洋, 杨宁虎, 郭熙业, 等. 导航星座激光/微波星间链路协同时间同步方法研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019516
Liu S Y, Yang N H, Guo X Y, et al. Cooperative time synchronization via laser/radio inter-satellite links in navigation constellations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019516, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0221

(95%)分别为0.038和0.992 ns. 文献[7]提出了一种基于改进卡尔曼滤波的联合星地、星间测量对整网钟差估计的方法, 在地面站不可见弧段内的导航卫星钟差估计误差小于2 ns. 文献[8]提出了一种自主运行模式下基于星间测距的两步滤波时间同步算法. 文献[3]提出了一种基于Ka星间链路的导航星座自主运行联合守时方法, 生成的星间时间基准天稳达到 6×10^{-15} , 短期预报和长期预报精度分别为0.18和1.05 ns.

同时, 北斗导航卫星也正在开展激光星间链路的论证与试验. 激光链路具有大带宽、高信噪比, 为实现星间更高精度测量与高速率通信提供了可能, 微波与激光混合链路是星间链路发展的必然趋势^[9]. 激光终端波束角窄, 建链过程较为复杂, 更适合采用连续链路体制^[10,11]. 高精度时间比对与连续建链体制, 使得激光链路更适合建立并维持星上时间基准, 在自主运行模式下提供整网的时间同步参考基准. 因此, 本文提出一种导航星座激光微波星间链路协同时间同步方法, 通过激光链路时间比对建立星上时间基准, 通过切换灵活的微波链路实现整网时间同步.

2 激光/微波星间链路协同时间同步方法

2.1 星间链路钟差测量

Ka星间链路采用并发时分空分体制(Concurrent Spatial Time Division Duplexing, CSTDD), 星间双向观测模型可以表示为

$$\begin{cases} \rho_{BA} = |\mathbf{R}_A(t_{R1}) - \mathbf{R}_B(t_{S1})| + c[x_A(t_{R1}) - x_B(t_{S1})] \\ \quad + c(\tau_A^r + \tau_B^s + \tau_{BA}^{\text{cor}}) + \varepsilon_{BA}, \\ \rho_{AB} = |\mathbf{R}_B(t_{R2}) - \mathbf{R}_A(t_{S2})| + c[x_B(t_{R2}) - x_A(t_{S2})] \\ \quad + c(\tau_B^r + \tau_A^s + \tau_{AB}^{\text{cor}}) + \varepsilon_{AB}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ_{BA} , ρ_{AB} 分别表示卫星B发A收、A发B收的伪距观测值, t_{R1} , t_{R2} 和 t_{S2} , t_{S1} 分别为卫星A, B接收和发射信号时刻的系统时间, $\mathbf{R}$ 为卫星在地心天球坐标系中的三维位置矢量, $x(t)$ 表示星载原子钟相对系统时间的钟差, τ^r , τ^s 分别表示接收和发射通道时延, τ^{cor} 表示单向测距中系统误差改正项, 包括卫星天线相位中心和相对论效应等, ε 为测量噪声.

为了将距离与钟差解耦, 需要利用预报轨道和预报卫星钟差参数对双向观测值进行时标归算^[12]

$$\begin{cases} \rho_{BA} = |\mathbf{R}_A(t_0) - \mathbf{R}_B(t_0)| + c[x_A(t_0) - x_B(t_0)] \\ \quad + \Delta\tilde{R}_{BA} + \Delta\tilde{x}_{BA} + c(\tau_A^r + \tau_B^s + \tau_{BA}^{\text{cor}}) + \varepsilon_{BA}, \\ \rho_{AB} = |\mathbf{R}_B(t_0) - \mathbf{R}_A(t_0)| + c[x_B(t_0) - x_A(t_0)] \\ \quad + \Delta\tilde{R}_{AB} + \Delta\tilde{x}_{AB} + c(\tau_B^r + \tau_A^s + \tau_{AB}^{\text{cor}}) + \varepsilon_{AB}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, t_0 为归算时刻, $\Delta\tilde{R}$ 为空间距离补偿量, $\Delta\tilde{x}$ 为钟差补偿量.

解耦后卫星A相对卫星B的钟差为

$$\begin{aligned} x_{AB}(t_0) &= x_A(t_0) - x_B(t_0) \\ &= \frac{\rho_{BA} - \rho_{AB}}{2c} + \frac{\Delta\tilde{R}_{AB} - \Delta\tilde{R}_{BA}}{2c} + \frac{\Delta\tilde{x}_{AB} - \Delta\tilde{x}_{BA}}{2c} \\ &\quad + \frac{\tau_A^s - \tau_A^r}{2} + \frac{\tau_B^r - \tau_B^s}{2} + \frac{\tau_{AB}^{\text{cor}} - \tau_{BA}^{\text{cor}}}{2} + \frac{\varepsilon_{AB} - \varepsilon_{BA}}{2c}. \end{aligned} \quad (3)$$

由于历元归化后双向观测的信号传播路径近似对称, 解耦后部分误差可消除. 在残余误差中, 设备时延可以作为待估参数在后期精确标定, 系统误差改正项可精确建模修正^[13].

激光链路采用全双工连续建链体制, 以及较为固定的拓扑结构, 多条激光链路可以同时测量, 解算得到的钟差均在同一时刻. 同时, 激光链路伪距测量精度更高, 可达毫米量级, 因此可以获得更高精度的钟差. 基于以上两点考虑, 激光链路在生成星间时间基准方面更具有优势.

2.2 星载原子钟模型

星载原子钟模型包括时钟的确定性部分与随机性部分, 三阶递推模型为^[14]

$$\mathbf{X}_{i,k} = \Phi_{i,k} \mathbf{X}_{i,k-1} + \gamma_{i,k}, \quad (4)$$

其中, 下标 i 表示卫星编号, 原子钟确定性分量 $\mathbf{X}_{i,k} = [x_i(k) \ y_i(k) \ z_i(k)]^T$ 表示原子钟的钟差、频差以及频漂, 系数矩阵

$$\Phi_{i,k} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

噪声向量 $\gamma_{i,k} = [\gamma_{i,x}(k) \ \gamma_{i,y}(k) \ \gamma_{i,z}(k)]^T$ 包含三种时钟误差: 时钟频率白噪声(White Frequency Noise, WFM)、频率随机游走噪声(Random Walk Frequency Noise, RWFM)、频率随机奔跑噪声(Random Run Frequency Noise, RRFM). 噪声向量服从零均值高斯分布,

协方差矩阵为^[15]

$$\mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i1}^2\tau + \frac{\sigma_{i2}^2\tau^3}{3} + \frac{\sigma_{i3}^2\tau^5}{20} & \frac{\sigma_{i2}^2\tau^2}{2} + \frac{\sigma_{i3}^2\tau^4}{8} & \frac{\sigma_{i3}^2\tau^3}{6} \\ \frac{\sigma_{i2}^2\tau^2}{2} + \frac{\sigma_{i3}^2\tau^4}{8} & \sigma_{i2}^2\tau + \frac{\sigma_{i3}^2\tau^3}{3} & \frac{\sigma_{i3}^2\tau^2}{2} \\ \frac{\sigma_{i3}^2\tau^3}{6} & \frac{\sigma_{i3}^2\tau^2}{2} & \sigma_{i3}^2\tau \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, $\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \sigma_{i3}$ 分别表示 WFM, RWFM, RRFM 的扩散系数.

2.3 激光链路网络时间基准生成

在卫星间建立激光星间链路网络, 通过星间时间比对, 可以建立一个统一的星间时间基准, 在自主运行模式下为导航星座同步提供时间参考. 本文假设激光链路采用连续观测体制. 激光时间基准网络内, 以其中一颗卫星时钟为参考钟, 通过直接钟差观测值或间接钟差计算值(多条链路钟差观测值累加)得到其他时钟与参考钟的钟差, 基于融合卡尔曼滤波的加权平均算法^[16]生成时间基准. 由于激光链路网络内卫星数量的增加, 一方面会导致卫星至参考卫星多条链路测量误差的累积, 另一方面会增加时间基准算法计算量, 因此本文考虑仅在部分卫星间建立激光链路网络.

在自主运行模式下, 无法测量绝对时差, 时间基准可以表示为相对参考卫星时钟的形式^[3]

$$x_{e1}(t) = \sum_{i=1}^n w_i(t) [x_{i1}(t) - \hat{x}_{ie}(t)], \quad (7)$$

其中, $x_{e1}(t) = x_e(t) - x_1(t)$ 表示时间基准相对参考钟(时钟 1)的相对时差, w 表示权重, $x_{i1}(t)$ 表示星间钟差观测值, $\hat{x}_{ie}(t)$ 表示卫星时钟相对时间基准钟差的估计值.

激光链路网络内采用集中式卡尔曼滤波, 估计各个卫星相对时间基准的钟差. 卡尔曼滤波的模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \Phi_k \mathbf{X}_{k-1} + \gamma_k, \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H} \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 状态向量 $\mathbf{X}_k = [\mathbf{X}_{1,k} \cdots \mathbf{X}_{n,k}]^T$ 为参与时间基准生成的 n 台星钟相对于星间时间基准的状态, 系数矩阵

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} \Phi_{1,k} & & \\ & \ddots & \\ & & \Phi_{n,k} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

噪声向量 $\gamma = [\gamma_{1,k} \cdots \gamma_{n,k}]^T$, 其协方差矩阵为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{q}_n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

观测矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & & & & & \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$\mathbf{V}_k$ 是比对观测噪声, 假设不同链路间的观测噪声独立, 协方差矩阵为 $\mathbf{R}$.

由于星间相对观测不能对绝对钟差进行观测, 卡尔曼滤波的结果会不断发散, 但相比钟差, 频差与频漂发散速度慢得多, 因此采用频差预测值 $\hat{y}_{i,Kal}(t)$ 与频漂预测值 $\hat{z}_{i,Kal}(t)$ 估计钟差 $\hat{x}_{ie}(t)$

$$\hat{x}_{ie}(t) = x_{ie}(t - \tau) + \tau \hat{y}_{i,Kal}(t - \tau) + \frac{1}{2} \tau^2 \hat{z}_{i,Kal}(t - \tau). \quad (12)$$

时间基准的性能与权重的选择有关, 在平滑时间为 τ 时的频率稳定度最优原则下权重为^[17]

$$w_i = \frac{1 / \sigma_{i,y}^2(\tau)}{\sum_{i=1}^N 1 / \sigma_{i,y}^2(\tau)}, \quad (13)$$

式中, $\sigma_{i,y}^2(\tau)$ 表示卫星 i 的 Allan 方差.

生成时间基准后, 可计算卫星 i 相对于时间基准的偏差

$$x_{ei}(t) = x_{e1}(t) - x_{i1}(t). \quad (14)$$

从而实现激光网络内的守时与时间同步.

2.4 基于分布式卡尔曼滤波的微波链路时间同步

为了实现整网时间同步, 时间基准网络外的卫星通过星间链路和网络内的卫星进行时间比对, 间接得到与时间基准的时差. 相比于激光链路, Ka 星间链路建链更加灵活, 更容易实现与时间基准网络内卫星的时间比对, 避免激光固定拓扑结构导致的多条比对链路测量误差积累. 因此, 本文考虑采用微波链路实现激光网络外卫星的时间同步.

卫星 i 与激光网络内卫星 j 建立微波链路, 获得钟差观测值 $x_{ij}(t_k)$, 卫星 j 与时间基准的钟差为 $x_{je}(t_k)$, 则卫星 i 与时间基准的钟差

$$x_{ie}(t_k) = x_{ij}(t_k) + x_{je}(t_k). \quad (15)$$

由式(15), 时间同步的误差来源于两部分, 一是微波链路观测量 $x_{ij}(t_k)$ 的观测噪声, 另一部分来源于 $x_{je}(t_k)$, 由式(14), $x_{je}(t_k)$ 含有激光链路观测噪声, 但远小于 $x_{ij}(t_k)$ 的观测噪声. 此外, 值得指出的是, 由于Ka星间链路时分体制, 相对钟差的观测时刻与卫星 j 相对时间基准钟差的观测时刻可能不同. 可以对Ka相对钟差进行二项式拟合与插值, 得到卫星 j 相对时间基准钟差观测时刻的星间相对钟差.

为了降低星间相对观测噪声对时间同步精度的影响, 根据时钟模型, 对钟差观测值进行卡尔曼滤波. 由于各个微波卫星与时间基准的相对钟差不相关, 因此可以采用分布式卡尔曼滤波, 每颗卫星单独解算钟差.

卫星 i 时钟卡尔曼滤波模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{i,k} &= \Phi_k \mathbf{X}_{i,k-1} + \gamma_{i,k}, \\ Z_{i,k} &= \mathbf{H} \mathbf{X}_{i,k} + V_k, \end{aligned} \quad (16)$$

其中, 观测向量

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]. \quad (17)$$

滤波方程为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \Phi_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1} \Phi_k^T + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (Z_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}), \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k,k-1}. \end{cases} \quad (18)$$

3 试验验证

3.1 仿真数据

本文根据国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS) MGEX (Multi-GNSS Experiment)分析中心提供的北斗三号卫星精密钟差数据进行仿真试验, 对文中提出的协同时间同步方法进行验证.

采集了9颗北斗三号MEO卫星2019年3月1日–3月31日的MPOD钟差数据, 钟差采样间隔为30 s. 这9颗MEO卫星在31 d内没有出现相位、频率调整.

对MPOD钟差数据进行预处理, 采用二项式拟合的方式消除钟差数据两天之间的不连续, 采用频率中

位数的方法剔除粗差, 去除轨道误差周期项, 然后计算各卫星钟差的Allan方差^[3], 结果如图1所示. 根据图1的结果, 可以判断铷钟受到WFM与RWFM噪声的影响, 氢钟主要受WFM噪声的影响. Allan方差与噪声扩散系数满足

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{\sigma_1^2}{\tau} + \frac{\sigma_2^2 \tau}{3}, \quad (19)$$

取对数后对Allan方差进行分段线性拟合^[3], 确定噪声扩散系数, 各卫星的扩散系数计算结果如表1所示. 可以看出, 氢钟的长期稳定度整体好于铷钟.

本文通过卫星MPOD精密钟差相互作用差并叠加高斯白噪声的方式, 产生星间链路相对钟差观测数据. 选

图 1 (网络版彩图)卫星时钟Allan标准差

Figure 1 (Color online) Allan deviation of the nine satellite clocks.

表 1 九颗卫星原子钟类型与噪声扩散系数

Table 1 Clock types and noise coefficients of the nine satellites

卫星PRN	时钟类型	噪声扩散系数	
		σ_1 ($s^{1/2}$)	σ_2 ($s^{-1/2}$)
C19	Rb	2.47×10^{-12}	3.76×10^{-16}
C20	Rb	3.65×10^{-12}	8.62×10^{-16}
C21	Rb	3.09×10^{-12}	6.42×10^{-16}
C22	Rb	2.90×10^{-12}	7.89×10^{-16}
C26	PHM	2.48×10^{-12}	—
C27	PHM	1.77×10^{-12}	—
C29	PHM	1.69×10^{-12}	—
C30	PHM	1.87×10^{-12}	—
C37	Rb	5.28×10^{-12}	9.97×10^{-16}

择C26时钟作为参考时钟, 其余卫星均与C26作差并叠加噪声.

为了确定叠加噪声的大小, 我们将叠加噪声后的MPOD数据与Ka星间链路的实测数据进行了对比. 取31 d卫星C27相对卫星C26的星间链路钟差实测数据. 同时, 将MPOD作差后的钟差数据叠加高斯白噪声, 噪声方差为0.1 ns (RMS). 为了分析拟合残差大小, 对星间链路钟差实测数据与MPOD钟差数据进行逐日二次多项式拟合, 根据拟合后的残差计算Allan标准差. 图2展示了钟差数据拟合残差的Allan标准差. 可以看出, MPOD数据叠加噪声后与星间链路实测数据的拟合残差Allan标准差, 尤其是短期稳定度基本一致. 因此, 仿真中, 微波链路噪声标准差设为0.1 ns, 激光链路噪声标准差设为0.03 ns.

图3为生成的星间链路观测钟差二次拟合残差均方根(RMS)的统计值, 拟合数据长度为1 d. 可以看出, 微波链路相对钟差拟合残差RMS大多数在0.1–0.4 ns, 激光链路拟合残差RMS比微波链路RMS要小, 但由于MPOD数据本身存在拟合残差, 部分残差RMS明显高于整体平均水平.

3.2 时间基准仿真结果

本文选择4台氢钟组成激光链路时间基准网络, 并将生成的时间基准与9台星钟生成的时间基准比较. 以生成的时间基准天稳最优为原则选择权重, 各卫星权重如表2所示.

图2 (网络版彩图) 卫星C27相对C26的MPOD钟差与Ka星间链路实测钟差的Allan标准差. 蓝色曲线的钟差数据来自C27的MPOD钟差与C26的MPOD钟差之差; 红色曲线的钟差数据为C27相对C26的Ka星间链路实测钟差; 黄色曲线的钟差数据是在MPOD钟差数据上叠加0.1 ns (RMS) 噪声

Figure 2 (Color online) Allan deviation of the MPOD clock deviation and Ka ISL clock deviation between satellites C27 and C26. Clock deviations of the blue curve are the differences between MPOD clock deviations of C27 and those of C26; clock deviations of the red curve come from the measurement data of the Ka inter-satellite link between C27 and C26; clock deviations of the yellow curve are the MPOD clock deviations plus 0.1 ns (RMS) noise.

根据3.1节中的方式生成激光星间观测值仿真数据, 利用时间基准生成算法分别得到4台氢钟与9台星钟生成的时间基准. 图4展示了生成的时间基准的频率稳定度. 两种组合下, 时间基准的稳定度基本一致.

图3 (网络版彩图) 星间链路钟差拟合残差RMS. (a) 微波链路拟合残差RMS; (b) 激光链路拟合残差RMS

Figure 3 (Color online) The RMS of clock deviation residuals derived from ISLs. (a) The RMS of clock deviation residuals derived from radio ISLs; (b) the RMS of clock deviation residuals derived from laser ISLs.

表 2 激光链路网络卫星及权重**Table 2** Satellites in the laser ISL network and their weights

卫星PRN	权重	
	4颗卫星	9颗卫星
C19	—	0.0076
C20	—	0.0015
C21	—	0.0026
C22	—	0.0018
C26	0.0467	0.0460
C27	0.4367	0.4303
C29	0.1970	0.1941
C30	0.3196	0.3150
C37	—	0.0011

图 4 (网络版彩图) 4台氢钟与9台星钟生成的时间基准Allan标准差**Figure 4** (Color online) The Allan deviation of the inter-satellite time reference generated by 4 PHMs and 9 satellite clocks.

这是由于氢钟的天稳优于铷钟, 在天稳最优的权重选择原则下, 9台星钟中4台氢钟的权重明显高于其余5台铷钟, 因此铷钟对于时间基准的贡献较小. 由此说明, 增加激光链路时间同步网络内卫星的数量并不一定能够提高时间基准的稳定度, 同时考虑到, 增加网络内卫星数量会增加网络的复杂度, 并且在进行集中式卡尔曼滤波时会增加计算量, 因此, 本文最终选择4台氢钟生成时间基准.

将以4台氢钟激光星间观测值生成的时间基准, 与利用微波星间观测值生成的时间基准以及各时钟的

Allan标准差进行了对比(图5). 可以看出, 激光时间基准中期($1000 \text{ s} \leq \tau < 10000 \text{ s}$)、长期稳定度(10^5 s)小于各原子钟最优稳定度, 天稳达到 6.61×10^{-15} , 但短期稳定度受观测噪声影响略差于各原子钟. 由于观测噪声的影响, 微波时间基准的短稳和中期稳定度要明显劣于激光时间基准, 因此微波链路观测值不宜直接作为时间基准观测值, 需进行滤波处理.

为了分析观测噪声对时间基准稳定度的影响, 在生成时间基准之前, 对3.1节中生成的微波星间观测值与激光星间观测值分别进行了卡尔曼滤波处理. 采用时间基准生成算法, 得到滤波前后4台氢钟的时间基准, 稳定度如图6所示. 可以看出, 滤波后观测噪声减小, 微波时间基准与激光时间基准的稳定度均有改善, 其中微波时间基准的短期、中期改善明显, 中期稳定度与滤波前激光时间基准的稳定度接近. 激光时间基准滤波前后, 中长期稳定度基本一致, 短期稳定度有一定改善.

3.3 分布式卡尔曼滤波时间同步仿真结果

采用分布式卡尔曼滤波算法实现其余5颗卫星时钟至时间基准的同步. 根据MPOD精密钟差, 可以计算卫星时钟相对时间基准的钟差, 作为时间同步的参考值, 进而计算时间同步误差, 即根据同步算法得到的卫星时钟相对时间基准钟差的误差. 图7展示了滤波前后5颗卫星的同步误差, 滤波后, 虽然MPOD数据预

图 5 (网络版彩图) 星间时间基准Allan标准差**Figure 5** (Color online) The Allan deviation of the inter-satellite time reference.

图 6 (网络版彩图)滤波前后星间时间基准Allan标准差
Figure 6 (Color online) The Allan deviation of the inter-satellite time reference before and after filtering.

处理后仍残留部分误差, 导致个别时刻滤波后时间同步误差出现远高于均值的情况, 但总体上时间同步误差明显降低. 表3列出了同步误差的RMS. 可以看出, 滤波前时间同步的误差受微波链路星间观测误差影响, 均在0.1 ns左右. 滤波后, 时间同步误差RMS小于

表 3 微波链路时间同步误差RMS

Table 3 The RMS of time synchronization error through radio ISLs

卫星PRN	同步误差RMS (ns)	
	滤波前	滤波后
C19	0.0994	0.0321
C20	0.0998	0.0351
C21	0.0996	0.0338
C22	0.1000	0.0330
C37	0.1001	0.0434

0.05 ns. 说明本文提出的分布式卡尔曼滤波同步算法可以抑制观测噪声的影响, 提高时间同步精度.

4 结论

本文提出了一种基于激光/微波星间链路协同的导航星座时间同步方法, 在地面运控系统的支持下, 可以实现星间统一、稳定的时间基准以及星座时间同步. 激光星间链路网络采用连续观测体制, 基于融合卡尔曼滤波的加权平均算法生成星间时间基准, 微波链路结合分布式卡尔曼滤波算法实现其余卫星至时间基

图 7 (网络版彩图)微波链路时间同步误差. (a) 卫星C19; (b) 卫星C20; (c) 卫星C21; (d) 卫星C22; (e) 卫星C37
Figure 7 (Color online) The synchronization error through radio ISLs. The time synchronization error of satellite C19 (a), C20 (b), C21 (c), C22 (d), C37 (e).

准的时间同步. 结果表明, 基于激光星间链路生成的时间基准天稳可达到 6.61×10^{-15} , 滤波后微波链路同步精度优于 0.05 ns (RMS).

本文提出的星间协同时间同步方法具有以下优势.

(1) 相比于微波星间链路, 激光星间链路时间比对采用连续测量机制且测量精度高, 协同时间同步方法生成的时间基准短期、中期稳定度优于微波时间基准.

(2) 协同时间同步方法以较少的星上计算资源与通信代价实现了星座相对时间同步. 相比于全星座星间链路网络生成时间基准的方法, 协同时间同步方法采用部分卫星组成激光网络, 通过优选卫星可以在保证时间基准稳定度的同时降低网络复杂度, 减小卡尔曼滤波矩阵阶数, 减小星上计算量.

(3) 基于分布式卡尔曼滤波算法实现微波时间同步, 降低了时间比对观测误差对同步精度的影响.

致谢 MPOD精密钟差数据来源于武汉大学, 在此深表谢忱.

参考文献

- 1 Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 614–624 [杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48: 584–594]
- 2 Yang D, Yang J, Li G, et al. Globalization highlight: Orbit determination using BeiDou inter-satellite ranging measurements. *GPS Solut*, 2017, 21: 1395–1404
- 3 Sun L, Huang W, Gao S, et al. Joint timekeeping of navigation satellite constellation with inter-satellite links. *Sensors*, 2020, 20: 670
- 4 Wang D, Guo R, Xiao S, et al. Atomic clock performance and combined clock error prediction for the new generation of BeiDou navigation satellites. *Adv Space Res*, 2019, 63: 2889–2898
- 5 Pan J, Hu X, Zhou S, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements. *Adv Space Res*, 2018, 61: 145–153
- 6 Ruan R G, Jia X L, Zhu J, et al. Integrated orbit determination and time synchronization for BDS-3 satellites with satellite-ground and inter-satellite one-way Ka-pseudoranges (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2020, 49: 292–299 [阮仁桂, 贾小林, 朱俊, 等. 联合星地与星间Ka伪距的北斗三号卫星一体化定轨和时间同步. *测绘学报*, 2020, 49: 292–299]
- 7 Zhu J, Liao Y, Wen Y L, et al. Research on method of satellite navigation system integrated time synchronization based on satellite-to-earth and satellite-to-satellite tracking (in Chinese). In: *Proceedings of the 1st China Satellite Navigation Conference*. Beijing: Committee of China Satellite Navigation Conference, 2010 [朱俊, 廖瑛, 文媛兰, 等. 基于星地联合观测的导航系统整网时间同步方法研究. 见: 第一届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2010]
- 8 Song X Y, Jia X L, Mao Y. Two steps time synchronizing method for autonav with crosslink ranging measurement (in Chinese). *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2009, 34: 1297–1300 [宋小勇, 贾小林, 毛悦. 基于星间测距的两步滤波时间同步方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34: 1297–1300]
- 9 Liu X N, Zhao Z, Li X L, et al. Research status and key technologies analysis of inter-satellite link (in Chinese). *J Telem Tracking Command*, 2019, 40: 1–9 [刘向南, 赵卓, 李晓亮, 等. 星间链路技术研究现状及关键技术分析. *遥测遥控*, 2019, 40: 1–9]
- 10 Dong M J, Lin B J, Liu Y C, et al. Topology dynamic optimization for inter-satellite laser links of navigation satellite based on MOSA (in Chinese). *Chin J Las*, 2018, 45: 217–228 [董明俊, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化. *中国激光*, 2018, 45: 217–228]
- 11 Liu S, Yang J, Guo X, et al. Inter-satellite link assignment for the laser/radio hybrid network in navigation satellite systems. *GPS Solut*, 2020, 24: 49
- 12 Mao Y, Song X Y, Jia X L. Naturalisation method research on inter-satellite link observation data (in Chinese). *Geomatics Inf Sci Wuhan Univ*, 2013, 38: 1201–1206 [毛悦, 宋小勇, 贾小林. 星间链路观测数据归化方法研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38: 1201–1206]
- 13 Pan J Y, Hu X G, Tang C P, et al. System error calibration for time division multiple access inter-satellite payload of new-generation BeiDou

- satellites (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2671–2679 [潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定. 科学通报, 2017, 62: 2671–2679]
- 14 Greenhall C A. Forming stable timescales from the Jones-Tryon Kalman filter. *Metrologia*, 2003, 40: S335–S341
- 15 Zucca C, Tavella P. The clock model and its relationship with the Allan and related variances. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2005, 52: 289–296
- 16 Greenhall C A. Kalman plus weights: A time scale algorithm. In: *Proceedings of the 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*. Long Beach, 2001
- 17 Wu Y W. Key Technologies of GNSS Time Scale (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. 25 [伍贻威. GNSS时间基准关键技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2016. 25]

Cooperative time synchronization via laser/radio inter-satellite links in navigation constellations

LIU SuYang¹, YANG NingHu¹, GUO XiYe^{1*}, CHEN Gang¹, YANG Jun^{1,2} & SUN LeYuan¹

¹ College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

² The 63rd Institution, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China

Time synchronization is vital in positioning, navigation, and time services in satellite navigation systems. Under the autonomous operation mode, time synchronization of the entire constellation is realized via inter-satellite links to support normal navigation and positioning services. Compared with radio inter-satellite links, continuous laser links are able to provide clock deviation measurements with the same time tag and higher accuracy. In this paper, cooperative time synchronization via laser/radio inter-satellite links is proposed. First, a time comparison network based on the continuous laser inter-satellite link is established, and an inter-satellite time reference is generated using the weighted average algorithm. Then, through radio inter-satellite links, clocks of satellites outside the laser inter-satellite link network are traced to the time reference by using the distributed Kalman filter algorithm, thereby realizing time synchronization of the entire constellation. Finally, a simulation based on the new generation of BeiDou constellation is performed. Results show that the stability in the short and medium terms of the time reference generated via the cooperative time synchronization method is significantly improved compared with that generated via radio inter-satellite links. The standard deviation of the time synchronization error in the constellation is better than 0.05 ns.

laser inter-satellite link, radio inter-satellite link, cooperative time synchronization, distributed Kalman filter

PACS: 42.62.Fi, 07.57.Pt, 05.45.Xt, 96.25.Vt

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0221](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0221)