

卫星间自主时间同步方法研究^{*})

黄飞江^{1,2,3} 卢晓春¹ 吴海涛¹ 边玉敬¹

(中国科学院国家授时中心 陕西临潼 710600)¹ (中国科学院研究生院 北京 100039)²

(长沙学院电子与通信工程系 长沙 410003)³

摘要 卫星时间同步是实现自主导航的关键技术之一。提出了利用高轨卫星的转发和跟踪功能实现星间连续、实时双向时间同步的方法。详细阐述了这种方法的原理,分析了该同步方法的误差。结果表明该方法可用于星间自主相对时间同步。

关键词 卫星,导航,自主时间同步,双向同步,钟差

Study on Autonomous Time Synchronization Method Based on Inter-satellite

HUANG Fei-jiang^{1,2,3} LU Xiao-chun¹ WU Hai-tao¹ BIAN Yu-jing¹

(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600, China)¹

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)²

(Department of Electronics and Communication Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China)³

Abstract The inter-satellite time synchronization is one of the key techniques to implement the autonomous navigation. A new method of time synchronization is put forward. This method uses transmission of satellite in the high orbit and its tracking function, in order to realize inter-satellite time synchronization in a way of succession, real time, and two way. It explains in detail the principle and synchronization error of the method. The results show that this method can be applied in inter-satellite autonomous relative time synchronization.

Keywords Satellite, Navigation, Autonomous time synchronization, Two-way synchronization, Clock correction

1 引言

随着空间技术和各种地面配套设施的完善,空天一体化正成为空天领域发展的基本趋势,如何实现空天各种飞行器之间和飞行器与地面设施之间的时间同步,使得各系统在同一时间下协同工作,成为空天一体化过程中必须要解决的问题。现有高精度星间时间同步方法中,星地双向时间比对方法是常用的一种卫星和地面时间同步站的同步方式之一。但是在这种同步方法中,由于地球曲率的限制,地面时间同步站的可视范围不能覆盖整个卫星运行空间,在很长的弧段内,卫星间的时间同步不是连续、实时的,卫星间的钟差主要依赖于卫星钟差预报模型来获得^[1,2];另外当时间同步信号通过大气层时,由于受电离层和对流层的干扰和衰退,时间同步必须要采用合适的模型对大气层的干扰所引起的时间同步信号的延迟做精确的修正,时间同步精度受到限制。这种同步方法在短期的时间同步精度较高,但在较长的时段内由于靠钟差预报模型来预报卫星钟差,时间同步精度很大程度上依赖于钟差预报模型和大气层延迟修正模型的准确程度。

因此,有必要探讨一种能长时间、实时进行高精度星间时间同步,同时又能有效克服空间大气层对时间同步信号的干扰和衰退,提高时间同步精度的方法。本文提出了一种利用地球同步静止轨道卫星的转发和跟踪功能来实现中、低轨卫星之间连续、实时的时间同步方法。

2 星间时间同步卫星相互位置关系分析

2.1 卫星位置关系分析

为减少星间时间同步对星载钟差预报模型的依赖,卫星间可以进行连续、实时的时间同步,要达到这一目标,实现时间同步的卫星必须能够长期处于相互的可视范围内,对处于同一轨道距离相对不变的卫星来说,这个条件容易满足,但对处于不同轨道的星座卫星来说,这个条件一般来说是不满足的,或者相互间的可视时段范围很有限。

要减少地球大气层对时间同步信号的影响,则必须使时间同步信号尽量不经过大气层,也就是卫星间的时间同步要在大气层之外进行,这样不仅能减轻地面时间同步站的负担,而且也有利于提高时间同步精度。

地球同步静止轨道卫星处于高轨,可以俯视中、低轨卫星,用很少的卫星就可以实现对中、低轨卫星的全弧段跟踪。以 TDRSS 为例,其对 200km~1200km 高度目标的覆盖率在 85%以上,对 1200km~12000km 高度目标的覆盖率则达到 100%,对中低速率数据的目标可跟踪 12000km 高度的用户,其可用性与成功率在 98%以上^[3]。因此,如果能以几颗地球同步静止轨道卫星作为中继,就可以形成一个由高轨静止卫星和中、低轨卫星构成的连续、实时通信网络,实现时间同步的卫星位置关系如图 1 所示。

^{*}基金项目:国家自然科学基金资助项目(10673011),中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目。黄飞江 讲师,博士研究生,研究方向为计算机网络应用、空天时间同步与导航;卢晓春 硕士生导师,研究方向为高精度时间比对方法与技术;吴海涛 博士生导师,研究方向为时间频率与导航;边玉敬 博士生导师,研究方向为时间频率测量与控制技术。

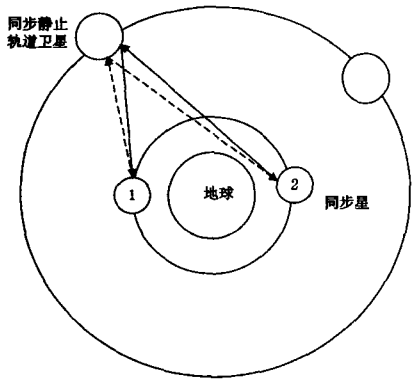


图1 星间双向时间同步示意图

2.2 基于同步静止轨道卫星的星间双向时间同步

根据以上卫星位置关系分析,利用地球同步静止轨道卫星可以达到对中、低轨卫星间连续、实时的时间同步信号的转发和跟踪,从而实现中、低轨卫星之间连续、实时的时间同步,而且这种利用高轨卫星转发和跟踪功能的时间同步方法,时间同步信号的路径主要在地球大气层外。这种方法可以克服由于地球曲率的限制,建在地球表面的时间同步站对中、低轨航天器的同步时间短,时间同步站利用率低,全球设立时间同步站,初建投资和运行维护费用高等缺点^[4];也可以不用考虑大气层对时间同步信号的延迟修正,避免了星地时间同步中大气层修正模型对时间同步精度的影响。考虑到以上两方面的优点,我们提出利用地球同步静止轨道卫星具有的转发和跟踪功能,实现星间连续、实时的双向时间同步。

3 星间双向时间同步原理

从导航定位原理的伪距公式分析可得,卫星相互间时间是否同步是影响导航定位结果的重要因素,而卫星钟平均时间与导航系统时间之间存在的偏差对定位结果不会造成影响^[5]。因此,对于导航星座的时间同步要求,主要是保持星座内的卫星钟之间相对时间同步。要保证星座内的卫星之间连续的时间同步,可以由两颗需要时间同步的卫星同时向地球同步静止轨道卫星发射时间同步信号,由地球同步静止轨道卫星完成转发后被对方接收,各自完成发射与接收时间同步信号的时间差的测量,并将测量的结果同时返回给地球同步静止轨道卫星,由地球同步静止轨道卫星完成对钟差的解算后,得到两星之间的钟差,完成星间的相对时间同步。

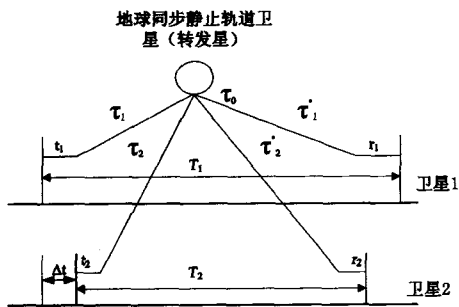


图2 星间双向时间同步原理图

星间双向时间同步原理如图2所示^[6];在卫星1,2上安装无线电发射机和接收机,用来发射时间同步信号和接收对方发射的时间同步信号,卫星1通过地球同步静止轨道卫星向卫星2发射时间同步信号,同理卫星2通过同一地球同步静止轨道卫星向卫星1也发射时间同步信号,可以得到如下方程:

$$T_1 = \Delta t + (t_2 + \tau_2) + \tau_0 + \tau'_1 + r_1 + \delta_1 \quad (1)$$

$$T_2 = -\Delta t + (t_1 + \tau_1) + \tau_0 + \tau'_2 + r_2 + \delta_2 \quad (2)$$

式中 Δt 为同步星1和2的钟差, T_1 为卫星1发射定时信号与接收卫星2发射的定时信号的时间差, t_2 为卫星2发射设备时延, τ_2 为卫星2到转发卫星的时延, τ_0 为转发卫星时延, τ'_1 为转发卫星到卫星1的时延, r_1 为卫星1接收设备时延, δ_1 为其它时延; T_2 为卫星2发射定时信号与接收卫星1发射的定时信号时间差, t_1 为卫星1发射设备时延, τ_1 为卫星1到转发卫星的时延, τ_0 为转发卫星时延, τ'_2 为转发卫星到卫星2的时延, r_2 为卫星2接收设备时延, δ_2 为其它时延。为求得两颗卫星的钟差 Δt , 将(1)-(2)得:

$$T_1 - T_2 = 2\Delta t + (t_2 - t_1) + (r_1 - r_2) + (\tau_2 - \tau_1) + (\tau'_1 - \tau'_2) + (\delta_1 - \delta_2) \quad (3)$$

整理(3)式得到两卫星钟差为:

$$\Delta t = \frac{T_1 - T_2}{2} + \frac{t_1 - t_2}{2} + \frac{r_2 - r_1}{2} + \frac{(\tau_1 + \tau'_2) - (\tau_2 + \tau'_1)}{2} + \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \quad (4)$$

(4)式中, T_1, T_2 可以通过卫星1,2测量,然后通过卫星链路上发到地球同步静止轨道卫星, t_1, t_2, r_1, r_2 可以在地面根据卫星发射信号的频率事先标定。当卫星1,2互发定时信号的频率接近,互发信号的时刻同步误差很小时 $(\tau_1 + \tau'_2) \approx (\tau_2 + \tau'_1)$, 同时可以忽略其它时延的影响,即可求得两个卫星钟差 Δt 。

4 星间双向时间同步方法误差分析

由(4)式可以看出,基于地球同步静止轨道卫星的星间时间同步需要考虑如下几个方面的误差:1)设备时延误差;2)卫星运动引起的误差;3)噪声误差。

4.1 设备时延误差

设备时延误差对应于(4)式中的1,2和3项,主要包括卫星时间差测量误差、卫星发射和接收时延误差。卫星时间差测量一般由高精度的计数器测量得到,而现代化的高精度计数器的测量精度已经达到几十皮秒,因此,这项误差对于纳秒级的精度可以忽略^[7]。

对于卫星发射和接收时延误差,包括发射接收系统的电缆时延、时间同步信号调制解调器时延,它们都可以事先通过测定,并加以扣除。如果采用高精度的调制解调器,对于星地的双向时间同步一般误差不超过30ps~100ps,电缆时延误差一般在0.2ns~0.5ns之间^[7],但由于卫星所处的环境跟地面不同,并且设备时延与气象因素有关,误差跟地面有所不同,故卫星上的设备时延在地面的测定应严格模拟卫星在空间的环境下进行,以便做出更精确的误差扣除。

4.2 卫星运动引起的误差

卫星运动误差对应(4)式中的第4项,包括卫星运动引起的相对论误差、时间同步信号传播路径不同而带来的时延误差和互发时间同步信号的钟面时不同步引起的误差。

根据爱因斯坦的狭义相对论,在惯性参考系中以一定速度运行的时钟,相对于同一类型的静止不动的时钟,存在着时钟频率之差。根据广义相对论,在空间强引力场中的振荡信号,其波长大于在地球上用同一方式所产生的振荡信号波长。对于相对论效应产生的误差,可以根据相对论理论对卫星进行相应的频率补偿,并做相应的时间延迟估计^[8]。

卫星的运动使得两卫星时间同步信号实际的传播路径并不一样,因此会产生路径时延误差。一方面这种路径时延误差可以通过微调卫星发射时间同步信号的时延来进行补

偿^[7];另一方面,必须要对此误差进行修正,采取的方法是进行连续、实时的比对,对比对的结果形成一系列的数据 $(t_i, \Delta t_i)$,然后对此同步数据通过一定的算法进行拟合,对拟合结果进行平滑处理,得到一段时间内路径误差为最小的卫星钟差^[9]。

在采取微调卫星发射时间同步信号的时延来进行补偿后,由于卫星钟是不同步的,因此卫星之间发射时间同步信号的时间也不相同,这仍然会导致一定的误差。当卫星间互发时间同步信号的钟面时同步越精确,时间同步信号所经过的路径越相同,这将大大消除传播路径误差和卫星运动的影响。因此应用该方法时,应该先采用其它方法,使得卫星之间完成时间的粗同步,以尽量减小卫星钟面时不同步对时间同步精度的影响。

4.3 噪声误差

噪声误差对应(4)式中的第5项,主要源于天线噪声和环路噪声,以及卫星所处空间的太空背景噪声,比如天电干扰、银河噪声和太阳噪声等,噪声对时间同步精度的影响取决于噪声功率相对于时间同步信号功率的大小,因此为尽量消除该项误差,可以增大信号的发射功率,还可以在保证正常接收信号的前提下,尽量压缩收发系统的带宽^[8]。

从以上星间双向时间同步的误差讨论可知,影响该方法的主要误差源是卫星运动引起的时间同步信号传播路径的不同而产生的时延误差,通过连续、实时的时间同步,按一定的算法处理后,能够把该误差的影响控制在同步误差范围内。

其它的误差源在纳秒量级的时间同步中,或者影响较小,

或者通过准确测量和计算即可得到相应的时延。

结束语 基于地球同步静止轨道卫星的星间时间同步方法完成时间同步的区域在大气层外,可以不用考虑大气层对时间同步信号的延迟,降低了时间同步精度依赖大气层时间延迟模型修正的准确程度,提高了时间同步精度;可以对中、低轨卫星之间进行连续、实时的时间同步,减少了时间同步精度对卫星钟差预报模型的依赖程度,因此这种方法可用于星间自主相对时间同步。

参考文献

- [1] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 170-171
- [2] Lauf J, Calhoun M, Diener W, et al. Clocks and Timing in the NASA Deep Space Network[C]// IEEE Proceedings of the 37nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. 2005: 830-835
- [3] 孙白波. 关于开发适合我国国情的 TDRSS 的设想[J]. 遥测遥控, 1999, 11: 25-30
- [4] 夏南银, 等. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 487-499
- [5] 徐冬梅, 杨龙. 利用条件平差实现导航星座自主守时方法[J]. 中国空间科学技术, 2006, 6: 18-23
- [6] 黄秉英, 等. 时间频率的精确测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1986: 182-184
- [7] 刘利, 韩春好. 卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 219-226
- [8] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 365-369
- [9] 郭廷源. 星上导航信息处理演示系统研制[D]. 四川大学硕士论文. 2005, 6: 48-54

(上接第 109 页)

将文献[6]中的结论扩展到无线网络,得到下面的引理。

引理 1 对于 $1 \leq h' \leq h \leq v, v = |E(G)|$, 假定 $S_{h',h}$ 表示无线网络中从 h' 到 h 的链路集合, 其元素 $\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ 满足 $h' = e_1 < e_2 < \dots < e_k = h$. $H_t = \{h_1, \dots, h_k\}, h_1, \dots, h_k$ 是接收节点 $t \in T$ 的 k 条输入链路, 其中 $1 \leq h_1 < \dots < h_k \leq v$. 则

$$|AG_{H_t}| = \sum_{\substack{\{h'_1, \dots, h'_k\}, \\ 1 \leq h'_j \leq A_j, \\ h'_i \neq h'_j, \forall i \neq j}} \left| \begin{array}{ccc} a_{h'_1} & \dots & a_{h'_k} \\ \vdots & & \vdots \end{array} \right| \sum_{\substack{\{e_1, \dots, e_k\}, j=1 \\ e_j \in S_{h'_j, h_j}, \\ e_i \cap e_j = \emptyset \\ \forall i \neq j}} \prod_{j=1}^k g(e_j)$$

引理 1 与网络信息流密切相关,在 k 冗余多播网络中,存在信源 s 到每一接收节点 $t \in T$ 的 k 条离散路径,保证接收节点译出信源信息,完成网络编码。

定理 2 对于无线网络中的 k 冗余多播网络,当且仅当每一个接收节点 $t \in T$ 满足下面表达式时,网络编码是有效的。

$$|AG_{H_t}| = |A_{l_1, \dots, l_k}| \prod_{j=1}^k g(e_j) = \left| \begin{array}{ccc} a_{l_1} & \dots & a_{l_k} \\ \vdots & & \vdots \end{array} \right| \prod_{j=1}^k g(e_j) \neq 0$$

其中 A_{l_1, \dots, l_k} 是矩阵 A 中相应于链路 $\{l_1, \dots, l_k\}$ 的列向量构成的子矩阵,而链路 $\{l_1, \dots, l_k\}$ 是接收节点 t 离散路径族中的 k 条源链路, $e_j = \{l_j, \dots, h_j\} (1 \leq j \leq k)$ 是从源链路 l_j 到接收节点 t 输入链路 h_j 的一条路径。

证明:从 k 冗余多播网络的定义可知,在一个 k 冗余多播网络中,对于每一个接收节点 $t \in T$,存在从信源 s 输出的 k 条离散路径,其中路径族中的 k 条源链路 $\{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ 是确定性的。根据引理 1, $|AG_{H_t}|$ 展开后只存在一个行列式分量

$$|AG_{H_t}| = |A_{l_1, \dots, l_k}| \prod_{j=1}^k g(e_j) =$$

$$\left| \begin{array}{ccc} a_{l_1} & \dots & a_{l_k} \\ \vdots & & \vdots \end{array} \right| \prod_{j=1}^k g(e_j)$$

当且仅当该行列式非零时,接收节点 t 可以得到信源 s 发出的 k 个符号,完成网络编码。

结束语 网络编码技术已成为通信领域中的一个研究热点,由于网络编码在传输效率、可靠性、安全性、鲁棒性、普适性及低计算复杂性等方面具有路由方法无可比拟的优越性,网络编码必将在网络通信中扮演越来越重要的角色。本文提出了一种借助节点基本图构造无线网络空间模型的方法,通过节点基本图的加入和离开模拟无线网络的动态变化。 k 冗余多播网络采用网络编码可实现最大多播速率 k 的信息传输。从网络信息流分解的观点出发,给出无线网络中 k 冗余多播网络的一种网络编码算法。

致谢 非常感谢蔡宁教授在文章写作过程中提出的许多宝贵意见。

参考文献

- [1] Ahlswede R, Cai Ning, Li S-Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [2] Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding [J]. IEEE Trans. on Communications, 2005, 53(11): 1906-1918
- [3] Zhu Ying, Li Baochun, Guo Jiang. Multicast with network coding in application-layer overlay networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(1): 107-120
- [4] Che Shuling, Wang Xinmei. Network coding in wireless network [A]// Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communication [C]. Beijing, 2004
- [5] Koetter R, Medard M. An algebraic approach to network coding [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2003, 11(5): 782-795
- [6] Ho T, Karger D R, Medard M, et al. Network coding from a network flow perspective [A]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory [C]. Yokohama, Japan, 2003
- [7] Sanders P, Egner S, Tolhuizen L. Polynomial time algorithms for network information flow [A]// Proceedings of 15th ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures [C]. 2003