

# 一种MEO卫星星地时间同步的新方法

陈祝明, 郭廷源, 江朝抒

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**在双向时间比对法的基础上,采用最小二乘法拟合多项式的方法对对比数据进行处理,获得了MEO卫星与地面相对运动引起的钟差的变化曲线;对多项式求导获得了卫星在地面观测站过顶点上的最小钟差值,实现了卫星时钟的星地时间同步。该方法可以应用于MEO卫星导航定位系统中。

**关键词** 时间同步; 双向比对; 最小二乘; MEO卫星

中图分类号 TN98

文献标识码 A

## A New Method for Clock Synchronization of MEO Satellite

CHEN Zhu-ming, GUO Ting-yuan, JIANG Zhao-shu

(School of Electronic Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** Based on the two-way time transfers, this paper presents a method processing contrast value that adopts a quasi-polynomial formed by least square estimation, in order to obtain the varying law of the clock difference between satellite and ground station because of the relative move between satellite and ground. Then the accurate clock difference when the satellite is over the top of ground station can be obtained through the differential of the polynomial, thereby the synchronization of satellite clocks is realized. This method may be applied to MEO satellite navigation and position system.

**Key words** clock synchronization; two-way time transfers; least square estimation; MEO satellite

在卫星无源导航定位系统中,卫星与地面系统之间时间同步的好坏对导航系统定位的精度和性能有重要影响。要实现星地时间的精确同步,必须选择合适的方法,减小由于电离层、对流层、地球自转、多普勒效应、相对运动等引起的误差。常用的星地时间同步的方法主要有单向时间同步、双向时间比对同步和激光时间同步<sup>[1]</sup>。单向时间同步的同步精度较低,约为5~10 ns;激光时间同步的同步精度虽然很高,但受天气的影响很大,并且工程上实施很复杂;相比而言,双向时间比对同步技术可以达到较高的精度,在工程上不难实现,比较适合用来实现星地时间的精确同步<sup>[2]</sup>。目前国内外的文献对星地双向时间比对同步技术的介绍主要集中在GEO卫星的星地时间同步<sup>[3-5]</sup>,很少涉及MEO/LEO卫星的星地时间同步问题。由于MEO卫星的星地时间同步的好坏对无源导航系统定位的精度和性能有较大影响,因此对于MEO卫星的星地时间同步方法的研究尤为重要。本文提出了一种基于双向时间比对技术,通过拟合多项式来处理数据以获取较高精度的星地钟差的方法,从而提高MEO卫星的星地时

间同步精度。

### 1 星地时间双向比对基本原理

将卫星原子钟秒信号按一定的格式编入下行电文,并记录星上的秒数,由发射机发向地面。地面接收后,与地面原子钟的时间对比,得到卫星到地面的信号传输时间对比值 $T_E$ 。同时也将地面观测站原子钟的秒信号按一定的格式编入上行电文,并记录地面观测站的秒数发送给卫星。卫星收到该信号后,通过与星上原子钟时间对比,得到地面到卫星的信号传输时间对比值 $T_S$ 。如果星地间信号传播路径相同,上下行电磁波的频点非常接近,则电离层和对流层对信号传播时延的影响可以相互抵消。再考虑星地接收机和发射机的设备时延,可得星地间的时间差为:

$$\Delta t = \frac{T_E - T_S}{2} + \frac{r_E - r_S}{2} \quad (1)$$

式中  $r_E$ 、 $r_S$  分别为地面和星上接收机和发射机的设备时延。

式(1)直接求解高精度的星地间钟差的条件是:

星上和地面各自观测到的比对值所对应信号传播路径相同,因此这种方法比较适用于GEO卫星。

## 2 MEO卫星的星地时间同步

由于MEO卫星是相对于地球高速运动的,而卫星和地面站分别以对秒信号的检测时刻作为时间比对的采样点,因此在比对时刻,其星地间信号传播路径一般是不同的,星地间存在变化的钟差,所以不能再用双向时间比对法来直接实现星地同步。如图1所示,图中实线表示上行路径,虚线表示下行路径。为此,本文在双向时间比对技术的基础上,提出了一种通过拟合多项式来处理上下行时间比对数据,提高MEO卫星的星地时间同步精度的方法。

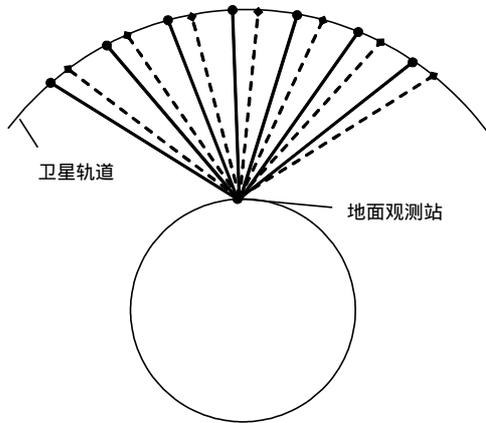


图1 MEO的双向时间比对示意图

### 2.1 原理与方法

从图1可以看出,由于星地间上下行传播路径的不同,导致卫星上行接收比对时刻与下行比对信号的发射时刻有固定的时差。卫星离观测站对应的过顶点越近,其上下行的传播路径差越小,得到的钟差越精确。本文根据星上和地面站按一定时间间隔测得的各自比对值,采用最小二乘法拟合的方法<sup>[6]</sup>,利用一个多项式来描述星上或地面时间比对值的变化规律,然后求出星上和地面的最小时间比对值,并由此进一步由式(1)得到星地间的钟差。

现取地面钟为基准,在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内,进行 $N$ 次双向时间比对,地面站能够得到 $N$ 个比对值 $T_E$ 及其相对应的地面站时间 $t_e$ 。同一时间段内,星上也同样得到一组比对值 $T_S$ 及其相对应的星上时间 $t_s$ 。然后分别对地面及星上观测到的这些比对值和相应的时间进行多项式拟合,可得:

$$T_E(t_e) = a_0 + a_1 t_e + a_2 t_e^2 + \dots + a_n t_e^n \quad (2)$$

$$T_S(t_s) = b_0 + b_1 t_s + b_2 t_s^2 + \dots + b_n t_s^n \quad (3)$$

式中  $n$  为多项式拟合的阶数;  $a_i, b_i (i=1, 2, \dots, n)$  为多项式的参数。式(2)是地面站得到的比对值与地

面时间所构成的函数,式(3)是星上得到的比对值与星上时间所构成的函数。

拟合后,对式(2)中的任一地面比对值,在式(3)中都会对应存在一个与其信号传播路径相同的星上比对值。由于星地间存在着钟差,拟合函数只能反映出卫星和地面站观测到的伪距的变化(比对值乘以光速就是伪距),很难直接从中提取出信号传播路径相同的时刻。为此,通过观测卫星在地面站过顶前后一段时间的时间比对值,使其包括卫星与地面站间相对距离最小的时刻,即对应于式(2)~(3)的极小值。因此,分别对式(2)~(3)求导,可得:

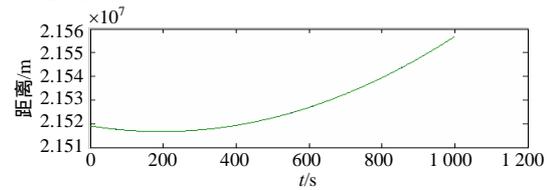
$$\frac{\partial T_E(t_e)}{\partial t_e} = a_1 + a_2 t_e + \dots + n a_n t_e^{n-1} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_S(t_s)}{\partial t_s} = b_1 + b_2 t_s + \dots + n b_n t_s^{n-1} \quad (5)$$

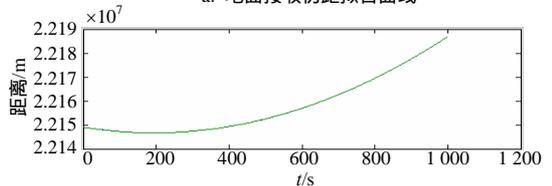
令式(4)~(5)为零求解,可以得到式(2)~(3)的极点。对于卫星与地面站间,这对极点就是各自观测到的比对值或伪距最小的时刻。由于在伪距达到最小值的时刻,星地间的信号传播路径是基本相同的,所以这一对极点所对应的时刻就是星地间信号传播路径基本相同的时刻。利用该时刻的比对值,由式(1)求出的MEO卫星星地间的钟差最精确。

### 2.2 拟合多项式法与不拟合法的仿真结果比较

卫星的轨道采用开普勒方程描述,为了系统仿真中坐标换算的方便,采用天球坐标系<sup>[3]</sup>。假设地球是静止的,忽略地面和星上接收机和发射机的设备时延,忽略电离层和对流层对信号传播时延的影响相互抵消后剩余的残差,只考虑卫星与地球间的相对运动。



a. 地面接收伪距拟合曲线



b. 星上接收伪距拟合曲线

图2 卫星与地面站观测值的伪距拟合曲线

当 $\Delta t = 0.00105 + t \times 10^{-11} + t^2 \times 10^{-15}$ 时,卫星超前。 $T$ 为卫星在轨道上运动的时间, $t=0$ 时卫星位于近地点。接收机的接收误差为均值在3~20 ns间的随机误差,多项式的阶数为15,本文以地面时钟为

参考时钟。设定地面观测站的坐标为(-239 461.03, 3 748 085.58, 2 972 578.86), 则地面接收伪距曲线的极小值所对应的地面时间为195.738 684 687 s; 卫星接收伪距曲线的极小值所对应的星上时间为

195.557 590 441 s。拟合的曲线如图2所示。在同等条件下, 单个观测站不经过拟合多项式得到星地钟差和经过拟合多项式得到星地钟差的结果比较如表 1~2所示。

表1 不经拟合得到的星地钟差

地面比对时刻/s	星上比对时刻/s	实际钟差/s	比对钟差/s	比对误差/s
2.071 729 894 780 93	2.073 829 873 843 18	-0.001 050 000 224 945 58	-0.001 049 989 531 123 56	1.069 4×10 <sup>-8</sup>
106.071 723 732 973 00	106.073 823 736 867 00	-0.001 050 010 737 783 39	-0.001 050 001 946 914 85	8.790 9×10 <sup>-9</sup>
195.071 722 057 068 00	195.073 822 076 615 00	-0.001 050 019 906 116 52	-0.001 050 009 773 649 66	1.013 2×10 <sup>-8</sup>
264.071 723 021 505 00	264.073 823 064 486 00	-0.001 050 027 123 170 07	-0.001 050 021 490 613 06	5.632 6×10 <sup>-9</sup>
288.071 723 818 088 00	288.073 823 873 148 00	-0.001 050 029 655 769 57	-0.001 050 027 530 226 32	2.125 5×10 <sup>-9</sup>
457.071 736 260 673 00	457.073 836 346 354 00	-0.001 050 047 815 661 02	-0.001 050 042 840 262 22	4.975 4×10 <sup>-9</sup>

表2 采用多项式拟合后得到的星地钟差

地面比对时刻/s	星上比对时刻/s	实际钟差/s	比对钟差/s	比对误差/s
195.969 553 928 742 000 00	195.411 884 852 748 000 00	-0.001 050 019 906 116 52	-0.001 050 019 952 764 37	-4.664 78×10 <sup>-11</sup>

表1所示为未经拟合、直接比对得到的钟差, 表中的数据是对1 000个比对点随机抽取的。表2所示为拟合多项式极值处得出的钟差。通过比较表1和表2中的数据可知拟合多项式极值处, 得到的钟差比直接比对得到的钟差的精度高很多, 可以达到0.05 ns内。经拟合多项式的方法后, 采用双向时间比对技术能够得到高精度的MEO卫星的星地钟差。

### 3 上下行频差对拟合结果的影响

上述分析是在假定上下行电磁波的频点相同的前提下进行的, 此时的电离层对信号传播时延的影响就可以相互抵消。但在实际系统中, 由于收发隔离的需要, 上下行频点不可能完全相同, 而上下行频差的不同导致电离层对信号传播的时延的不同, 所以拟合时不能完全忽略电离层对信号传播时延的影响相互抵消后剩余的残差。在实际应用中, 对上下行频差影响较大的因素是接收机中的滤波器以及信号的带宽等。

假设电离层在50~1 000 km之间的电子密度均匀, 电子密度为 $N_e=2\times 10^{12}/\text{m}^3$ 。电磁波在电离层中的传播延迟为:

$$\Delta\rho = -40.28 \times \frac{\int_s N_e dS}{f^2} \quad (6)$$

设接收机中的滤波器的参数 $Q=60$ , 矩形系数 $r=1.5$ , 上行频率为1 200 MHz, 不同频差通过拟合多项式比对得到的钟差如表3所示。

表3 不同频差时得到的星地钟差

信号带宽/MHz	下行频率/MHz	上下行频差/MHz	比对误差/s
5	1 207.5	7.5	-5.792 6×10 <sup>-10</sup>
10	1 215.0	15.0	-1.788 5×10 <sup>-9</sup>
20	1 230.0	30.0	-4.153 5×10 <sup>-9</sup>
30	1 245.0	45.0	-5.198 1×10 <sup>-9</sup>

由表3中的数据可知, 上下行信号频差对比对误差的影响很大, 且两者呈正比关系。在实际系统中, 应尽可能选择相近的上下行电磁波的频率, 以减小电离层对信号传播时延的影响。如果能够利用其他技术手段获得电离层的电子密度, 就可以根据式(6)对比对值进行修正, 以减小上下行信号频差对比对误差的影响, 提高星地或星星时间同步的精度。

### 4 结 论

本文在双向时间比对的基础上, 采用最小二乘拟合多项式的方法来处理数据, 得到了MEO卫星的高精度星地钟差。该方法基于成熟的双向时间比对法, 在工程上比较容易实现, 对于建立卫星无源导航定位系统中的星地时间同步和卫星自主导航系统中的星间测距有一定的参考价值。在实际的工程应用中, 可以采用增加观测站的方法来观测不同时间段内各时刻的钟差, 找出星地钟差变化的规律, 从而提高星地钟差测量的精度和可靠性。

(下转第39页)

最后消失距离都在57~60 km之间, 其中13: 36观测到舰船目标远离的最远消失距离为59.5 km, 与计算的结果基本一致。

由于模型在多处使用了近似处理, 而且由于海面舰船目标RCS的复杂性, 特别是蒸发波导陷获条件下, 电磁波照射面积减小带来的RCS损失的复杂性, 必然引起模型计算结果的误差。另外由于蒸发波导本身所具有的复杂特性, 因此实际评估预测雷达对水面舰船目标的探测能力时, 要考虑的因素比本文所描述的复杂得多。

### 3 结论

本文构建的评估方法是利用电磁波传播的数值模式计算雷达电磁波单程传播损耗的空间分布, 通过雷达理论确立了单程传播损失对应的探测概率门限, 从而对雷达的探测性能进行预测评估。大量的试验数据分析验证了模型的正确性和实用性, 在计算的准确性方面还需要进一步改进和提高。雷达在蒸发波导环境中能否实现超视距探测能力, 与蒸发波导的高度、强度等特征量有关, 还与雷达参数以及波导与雷达天线的相对位置有关。限于篇幅, 更复杂的蒸发波导环境以及不同参数的雷达的超视距

探测特征没有讨论, 本文的模型和方法同样适用。

### 参 考 文 献

- [1] PATTERSON W L, HATTAN C P, LINDEM G E, et al. Engineer's refractive effect prediction system (EREPS)[R]. Space and Naval Warfare System Center, Technology Report 2648, San Diego, Calif., 1994.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [3] 戴福山. 海洋大气近地层折射指数模式及其在蒸发波导分析上的应用[J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 280-286.
- [4] 刘成国, 黄际英, 江长荫, 等. 我国对流层波导环境特性研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2002, 29(1): 119-122.
- [5] 姚展予, 赵柏林, 李万彪, 等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605-616.
- [6] BARRIOS A E. A terrain parabolic equation model for propagation in the troposphere[J]. IEEE Trans-AP, 1994, 42(1): 90-98.
- [7] DOCKERY G D. Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation[J]. IEEE Trans-AP, 1988, 36(10): 1464-1470.
- [8] BLAKE L V. Radar range-performance analysis[M]. Norwood MA: Artech. House, 1986.

编辑 漆 蓉

(上接第35页)

### 参 考 文 献

- [1] 李树洲. 卫星导航定位系统星地时间同步方法[J]. 测试技术与应用, 2002, (10): 60-63.
- [2] 张立新, 王 伟, 王 岗. 双向比对远距离时间同步技术[J]. 空间电子技术, 2002, (2): 7-9.
- [3] HAHN J, BEDRICH S. Ultra-precise clock synchronization of remonte atomic clocks with PRARE onboard ERS-2[J]. IEEE, 1996, 2: 867-871.

- [4] DIERTER KIRCHNER. Two-way time transfer via communication satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 983-990.
- [5] HANSON D W. Fundamentals of two-way time transfers by satellite[C]// 43rd Annual Symposium on Frequency Control, Denver, Colorado, 1989: 174-178.
- [6] 张金槐. 线性模型参数估计及其改进[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.

编辑 黄 莘