

## 对流层散射双向时间比对中对流层斜延迟估计\*

陈西宏<sup>1</sup>, 刘赞<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 孙际哲<sup>1</sup>, 张群<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**为精确估计对流层散射双向时间比对系统中对流层斜延迟,分析了估计卫星信号对流层斜延迟的 Hopfield 天顶延迟模型及 CFA2.2 映射函数模型并对其进行修正,从而适用于对流层散射斜延迟的精确估计。根据北纬 35°~37°范围内的三个测站 2010—2012 三年的气象数据,验证 Hopfield 模型精度范围小于 35 mm,并将三个测站按相互之间基线距离的不同分为三组比对站,利用 2012 年的气象数据,计算在不同入射角下一年的对流层散射斜延迟,并得出最大斜延迟对应的年积日和入射角。结果表明,三组比对站的最大单向散射斜延迟为 21.82~35.45 m。在双向比对抵消 90% 的情况下,时间延迟为 7.3 ns~11.7 ns;相互抵消 95% 时,时间延迟为 3.6 ns~5.9 ns。

**关键词:**对流层散射;双向时间比对;天顶延迟;映射函数;斜延迟

**中图分类号:**P228 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)02-171-06

## Tropospheric slant delay estimation in two-way troposphere time transfer

CHEN Xihong<sup>1</sup>, LIU Zan<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, SUN Jizhe<sup>1</sup>, ZHANG Qun<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to accurately estimate the tropospheric slant delay of the two-way troposphere time transfer system, the Hopfield zenith delay model and the CFA2.2 mapping function model which can estimate the tropospheric slant delay of satellite signals were analyzed and modified, and was accepted by the accurate estimation of slant delay caused by tropospheric scatter. The meteorologic data of three observation stations from 35°N to 37°N in 2010—2012 were selected to verify that the precision range of Hopfield model was less than 35 mm. Then, in order to calculate the tropospheric delay under different angle of incidence through modified model, three observation stations were distinguished by different baseline distance and the meteorologic data of those stations in 2012 were used. The day of year and the incident angle under maximum slant delay were also obtained. Results suggest that the max delay is 21.82 m to 35.45 m in a single way time transfer. In two-way time transfer, when the delay is counteracted by 90% or 95%, the time delay is 7.3 ns~11.7 ns or 3.6 ns~5.9 ns.

**Key words:** tropospheric scatter; two-way time transfer; zenith delay; mapping function; slant propagation delay

时间同步技术广泛应用于时间实验室、航空航天以及众多军事领域。双向时间比对具有的高精度、路径延迟可以大致抵消等优势使其成为高精度时间同步技术中重要的组成部分<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]结合对流层散射通信具有的强抗干扰、抗截获能力和远单跳距离等优势,提出对流层散射双向时间比对(Two Way Troposphere Time Transfer, TWT<sup>3</sup>)方案,克服了卫星信道在战时生存能力低且受制于他国、微波链路传输受到地形和地球曲率等因素影响,对高精度时间同步具有重要意义。但文献中并没有对方案中的对流层造成的时间延迟进行精确计算和分析。文献[6]中

基于比对站电磁波在对流层高 15 km 处散射时的延迟最大的假设,对对流层斜延迟进行分析,具有一定局限性。对流层散射信道属于变参数时变信道,其造成的时延实时性强,与比对站的位置、气象条件以及电磁波入射角等因素密切相关<sup>[6]</sup>,因此电磁信号在对流层传播过程中的延迟是影响 TWT<sup>3</sup> 精度的重要因素。对其进行分析,对 TWT<sup>3</sup> 系统的精度和事先校准具有重要意义。

文献[7-8]中指出,当电磁波频率低于 15 GHz 时,对流层导致电磁波的时间延迟与频率无关,因此可根据目前应用较广的卫星信号在对流层中的延迟模型对 TWT<sup>3</sup> 的对流层延迟进行分

\* 收稿日期:2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172169)

作者简介:陈西宏(1961—),男,陕西蓝田人,教授,博士,博士生导师,E-mail:xhchen0315217@163.com

析。对卫星信号的对流层天顶延迟 (Zenith Tropospheric Delay, ZTD) 模型和映射函数模型进行修正, 从而适用于对流层散射中延迟计算。结合欧洲气象中心提供的气象数据, 计算得出了 Hopfield 模型计算三站天顶延迟的精度以及不同基线距离、比对站在不同入射角下, TWT<sup>3</sup> 系统一年的对流层斜延迟 (Slant Propagation Delay, SPD)。

### 1 对流层散射的双向时间比对原理

对流层散射通信是利用对流层的不均匀性对无线电波散射或反射来实现的一种超视距通信<sup>[9]</sup>。TWT<sup>3</sup> 系统的组成如图 1 所示。

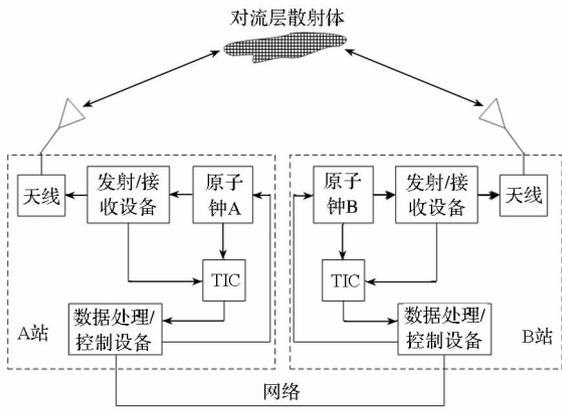


图 1 对流层散射双向时间比对组成框图

Fig. 1 Composing diagram of two-way troposphere time transfer

如图所示, TWT<sup>3</sup> 系统包括高精度原子钟、发射和接收设备、时间间隔计数器 (Time Interval Counter, TIC) 以及数据处理设备等。根据双向时间比对原理可知, 系统中的设备时延能够事先测得并很好抵消; 对流层散射信道的特点导致其产生的时延不能经双向传递很好地消除, 因此必须对电磁信号在对流层中的延迟进行精确估计。

### 2 对流层延迟分析

对流层位于大气底层, 受气象等因素影响明显。电磁波在对流层中传播速度发生变化, 产生折射现象, 导致电磁波路径发生弯曲, 从而产生时间延迟。卫星信号的对流层斜延迟可以表示为天顶方向上由对流层干、湿大气产生的延迟与映射函数的乘积<sup>[10-11]</sup>。即:

$$D^s = D_d^z \cdot M_d(\theta) + D_w^z \cdot M_w(\theta) \quad (1)$$

式中:  $D^s$  表示对流层斜延迟;  $D_d^z, D_w^z$  分别表示对流层天顶干、湿延迟;  $M_d(\theta), M_w(\theta)$  分别表示干、湿映射函数;  $\theta$  表示电磁波入射角。

### 2.1 对流层天顶延迟模型

Hopfield 模型是目前应用较为广泛的对流层天顶延迟模型, 文献[4, 10]中均证明该模型针对某些测站的精度在厘米 (cm) 量级内。模型认为对流层天顶延迟由对流层干延迟和湿延迟组成, 对流层天顶方向上电磁波传播路径不存在弯曲, 路径延迟表示为折射率的积分, 即:

$$\begin{cases} D_d^z = 10^{-6} \times \int_{h_0}^{h_d} N_{dh} dh \\ D_w^z = 10^{-6} \times \int_{h_0}^{h_w} N_{wh} dh \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $h_d, h_w$  分别表示对流层干、湿大气的层顶高度;  $N_{dh}, N_{wh}$  分别表示高为  $h$  对流层处的干、湿折射指数。其中:

$$\begin{cases} N_{dh} = N_{d0} \left( \frac{h_d - h}{h_d - h_0} \right)^4 \\ N_{wh} = N_{w0} \left( \frac{h_w - h}{h_w - h_0} \right)^4 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $N_{d0}, N_{w0}$  分别表示干、湿大气初始折射指数;  $h_0$  为当地测站海拔高度。Hopfield 模型认为:

$$\begin{cases} N_{d0} = 77.6 \frac{P_0}{T_0} \\ N_{w0} = 3.73 \times 10^5 \frac{e_{w0}}{T_0^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_0, T_0$  和  $e_{w0}$  分别表示测站的气压 (mbar)、温度 (K) 和水汽压 (mbar)。Hopfield 模型将  $h_d, h_w$  (单位为 m) 表示为

$$\begin{cases} h_d = 40\ 136 + 148.72(T_0 - 273.16) \\ h_w = 11\ 000 \end{cases} \quad (5)$$

忽略比对站高程差和天线高度, 根据对流层散射通信实现条件, 两站之间对流层散射通信的示意图如图 2 所示。

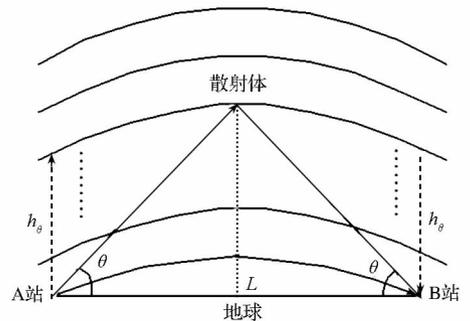


图 2 对流层散射通信原理

Fig. 2 Principle of tropospheric scatter communication

如图 2 所示,  $\theta$  表示电磁波入射角;  $h_\theta$  表示发生散射的对流层高度;  $L$  表示比对站间基线距离。结合图 2 和式(2), 将 Hopfield 模型修正为适用于

对流层散射的对流层天顶延迟模型,即:

$$\begin{cases} D_d^z = 10^{-6} \times \int_{h_0}^{h_\theta} N_{dh} dh \\ D_w^z = 10^{-6} \times \int_{h_0}^{h_\theta'} N_{wh} dh \end{cases} \quad (6)$$

式中,湿延迟分量的积分上限  $h_\theta'$  结合式(5)可得:当  $h_\theta > 11\ 000\text{ m}$  时,  $h_\theta' = 11\ 000\text{ m}$ ; 当  $h_\theta < 11\ 000\text{ m}$  时,  $h_\theta' = h_\theta$ 。

### 2.2 对流层延迟映射函数

人们根据全球测站提供的气象数据和对流层延迟数据,提出了诸多映射函数模型,如 VMF1 模型、GMF 模型等。但模型的得出大部分是基于电磁波穿透对流层。其中 CFA2.2 模型是所有映射函数模型中唯一参数确定与对流层高度有关的模型<sup>[12]</sup>,因此选其进行对流层散射斜延迟分析。CFA2.2 模型如式(7)所示:

$$M_i(\theta) = \frac{1}{\sin\theta + \frac{a_i}{\tan\theta + \frac{b_i}{\sin\theta + c_i}}} \quad (7)$$

式中:下标  $i$  区分干湿映射函数;参数  $a_i, b_i, c_i$  可表示为:

$$\begin{cases} a_i = 1.185 \times 10^{-3} [1 + 6.071 \times 10^{-5} (P_0 - 1000) - \\ 1.471 \times 10^{-4} e_{w0} + 3.072 \times 10^{-4} (T_0 - 20) + \\ 1.956 \times 10^{-2} (\beta + 6.5) - \\ 5.645 \times 10^{-4} (H_{Ti} - 11.231)] \\ b_i = 1.144 \times 10^{-3} [1 + 1.164 \times 10^{-5} (P_0 - 1000) - \\ 2.795 \times 10^{-4} e_{w0} + 3.109 \times 10^{-4} (T_0 - 20) + \\ 3.038 \times 10^{-2} (\beta + 6.5) - \\ 1.217 \times 10^{-4} (H_{Ti} - 11.231)] \\ c_i = -0.009 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\beta$  表示对流层温度随高程的衰减率,取  $\beta = 6.5\text{ }^\circ\text{C/km}$ ;  $H_{Ti}$  表示对流层干湿部分的层顶高度,修正方法同 2.1 节,使其适用于对流层散射斜延迟计算。

### 3 算例与结果分析

根据欧洲气象中心提供的测站信息和气象数据,结合目前对流层散射通信有效距离,选取处于北纬  $35^\circ \sim 37^\circ$  范围内的测站进行 TWT<sup>3</sup> 系统的对流层斜延迟分析。选取测站信息如表 1 所示。

结合测站所处纬度,取能够发生散射的对流层最大高程为 15 km。为分析不同入射角下的对流层斜延迟,假设电磁波在对流层中任意高程处

均能发生散射,实现通信。最大入射角 (MAX) 取两站之间电磁波在最高点发生散射,实现通信;最小入射角 (MIN) 取两站之间电磁波均与比对站地面相切,实现通信;临界角 (Critical Angle of Incidence, CAI) 取发生散射的对流层高程恰为湿大气层顶高度 11 000 m。三组比对站之间信息如表 2 所示。

表 1 测站信息

Tab. 1 Information of stations

名字	编号	纬度(N)	经度(E)
Tsukuba	A	36.11	140.09
Koganei	B	35.71	139.49
Usuda	C	36.13	138.36

表 2 比对站之间信息

Tab. 2 Information between stations

比对站	L/km	E/(°)		
		MIN	CAI	MAX
A&B	70.06	0.32	17.57	23.31
B&C	112.09	0.50	11.34	15.58
A&C	155.58	0.70	8.40	11.43

为验证 Hopfield 模型在三个测站天顶延迟计算的适用性,选取三站 2010—2012 年的气象数据(采样时间为 6 h),利用模型计算测站对流层天顶延迟。结果与实测天顶延迟进行对比,得出三站的年平均误差 (Mean Error, ME) 如图 3 所示。

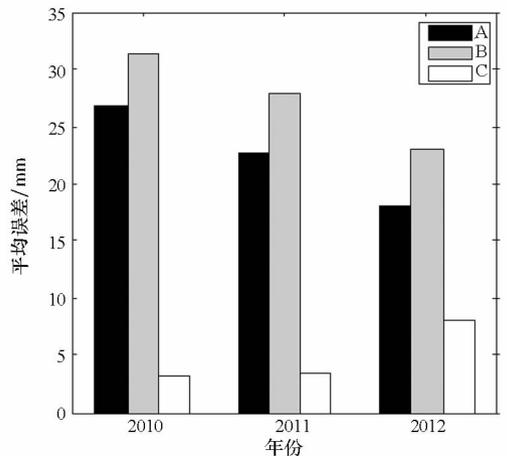


图 3 模型平均误差

Fig. 3 Mean error of Hopfield model

由图 3 可知,三个测站三年的天顶延迟年平均误差均在 35 mm 以内,满足精度要求。利用 2012 年气象数据,取入射角变化率  $\Delta E = 0.01^\circ$ ,

结合修正后的 Hopfield 模型和 CFA2.2 映射函数, 计算三组比对站一年的对流层斜延迟, 结果如图 4 所示。

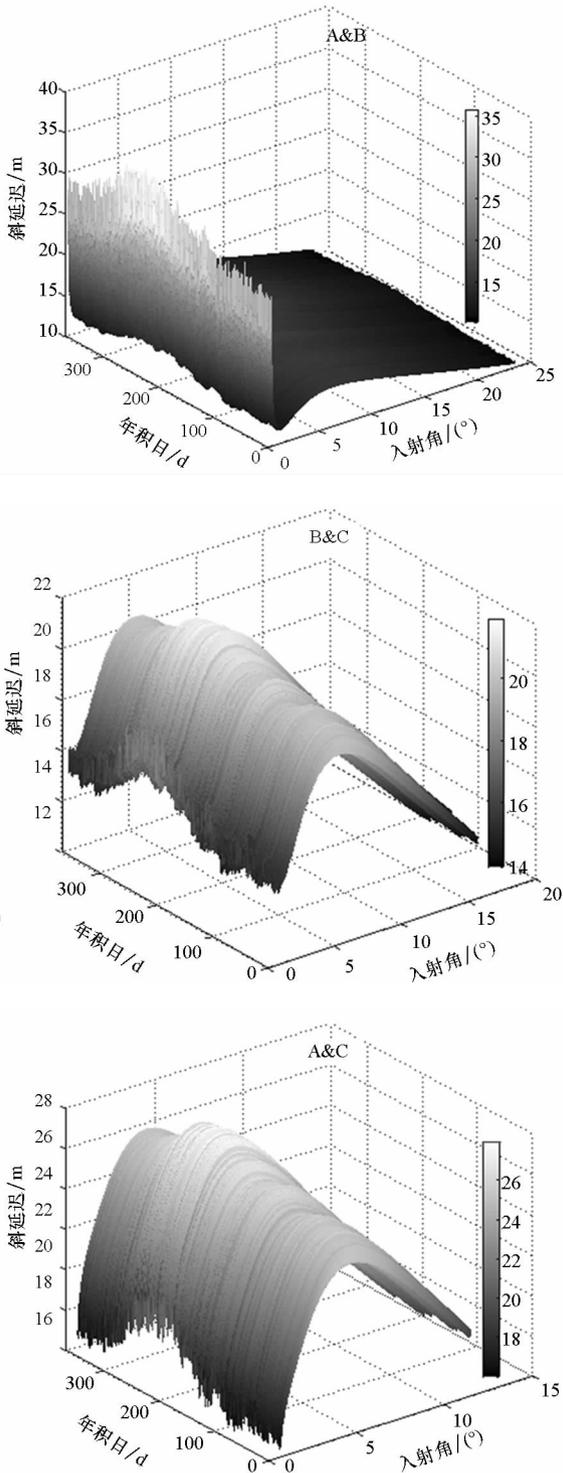


图 4 对流层散射斜延迟

Fig. 4 Slant delay of tropospheric scatter

如图 4 所示, 图中分别为比对站 A&B ( $L = 70.06$  km), B&C ( $L = 112.09$  km) 以及 A&C ( $L = 155.58$  km) 在不同入射角下一年的对流层散射斜延迟。寻得延迟最大值: 比对站 A&B 中在第 199 天的 18 时~24 时, 入射角为  $0.32^\circ$  对应最大

延迟 35.45 m; B&C 中在第 198 天的 18 时~24 时, 入射角为  $5.51^\circ$  对应最大延迟 21.82 m; A&C 中在第 229 天的 18 时~24 时, 入射角为  $4.04^\circ$  对应最大延迟 27.90 m。图 5 为最大延迟对应时刻, 不同入射角的斜延迟; 图 6 为在最大延迟对应入射角下一年的斜延迟。

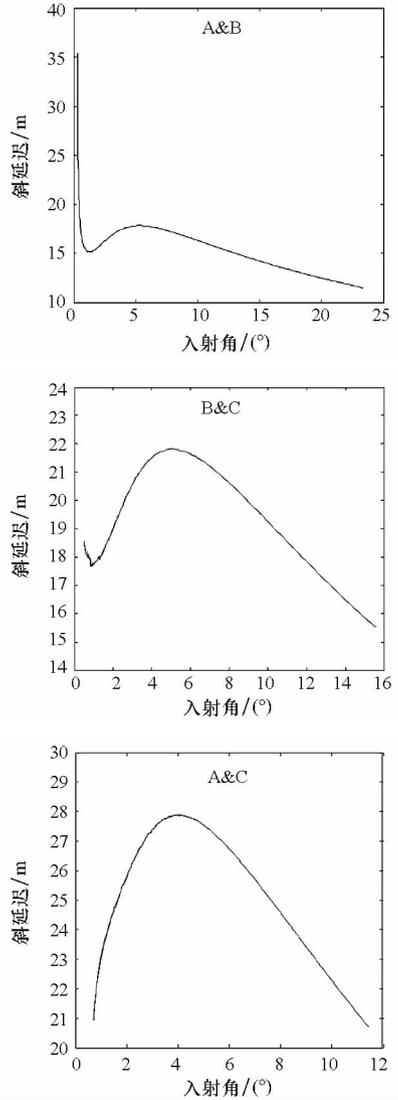


图 5 变角下对流层散射斜延迟

Fig. 5 Slant delay of tropospheric scatter under changing angle

分析上述结果, 得出如下结论:

1) 由图 4 可得, 三组比对站在不同入射角下全年的平均斜延迟分别为 13.81 m, 17.98 m 和 23.24 m, 说明随着基线距离的增加, 平均斜延迟总体上呈增加趋势。

2) 由图 4 和图 5 可得, 在比对站 A&B ( $L = 70.06$  km) 中斜延迟最大值出现在入射角最小处, 而随着基线距离的增加, 最大斜延迟对应的入射角也相应增大。小入射角对应较大的映射函数和较小的天顶延迟, 说明在短基线时, 映射函数

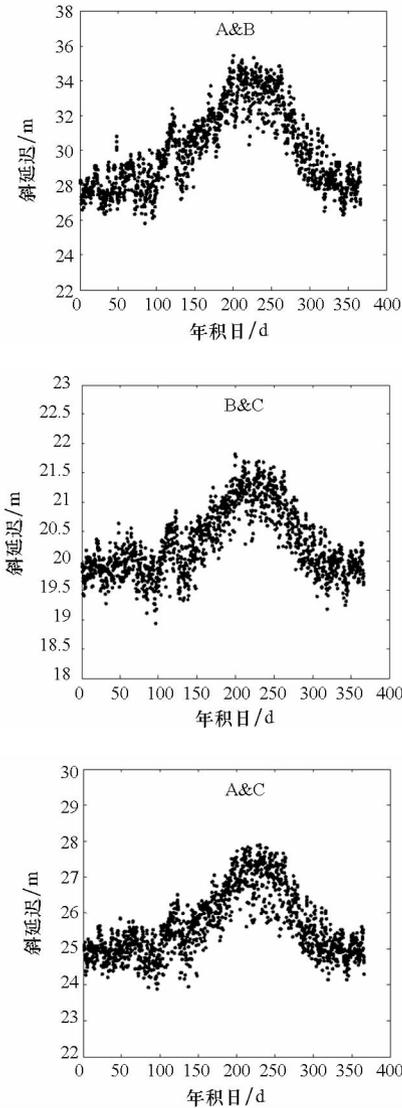


图6 不同时间下对流层散射斜延迟  
Fig. 6 Slant delay of tropospheric scatter  
under changing time

在斜延迟中所占比重较大;基线距离增加时,对应最大斜延迟的入射角增大,大的入射角对应较大的天顶延迟和较小的映射函数,说明此时斜延迟中天顶延迟所占比重较大;极值并不在入射角最大时出现,纠正了文献[4-5]中单纯用对流层天顶延迟以及文献[6]中仅用高程为15 km的对流层斜延迟估计TWT<sup>3</sup>精度的错误。

3)由图4和图6可得,三组比对站一年中斜延迟最大值均出现在夏季,与夏季的高气温等气象因素相对应。

4)由图4、图5和图6可得,三组比对站中,电磁波单向传输时,斜延迟最大分别为35.45 m ( $L = 70.06$  km), 21.82 m ( $L = 112.09$  km)和27.90 m ( $L = 155.58$  km)。双向传输中,相互抵消90%的情况下,斜延迟分别为3.5 m ( $L = 70.06$  km), 2.2 m ( $L = 112.09$  km)和2.8 m ( $L = 155.58$  km),

结合电磁波传播速度,可得时间延迟为7.3 ns ~ 11.7 ns;相互抵消95%的情况下,可得时间延迟为3.6 ns ~ 5.9 ns。综上所述,最终误差符合同步系统对精度的要求。

## 4 结论

分析了TWT<sup>3</sup>系统原理,研究了卫星信号的对流层天顶延迟中的Hopfield模型和映射函数中的CFA2.2模型,并将其修正使之适用于TWT<sup>3</sup>系统中对流层斜延迟的计算。利用欧洲气象中心提供的数据,分别计算和分析了不同基线距离下,比对站在2012年一年时间内,不同入射角对应的对流层斜延迟,为TWT<sup>3</sup>系统精度估计和事先时延校准提供一种可行的方案。

研究基线距离为70.06 km ~ 155.58 km的三组比对站,结果表明:①比对站的对流层斜延迟呈现夏季最大,冬季最小的趋势;②基线距离越大,平均对流层斜延迟越大;③最大斜延迟对应的入射角随基线距离的增大而增大;④当比对站距离较近时,映射函数所起作用较大,随着比对站的基线距离增加,天顶延迟所起作用逐渐增大;⑤当双向比对抵消90%时,时间延迟为7.3 ns ~ 11.7 ns,当相互抵消95%时,可得时间延迟为3.6 ns ~ 5.9 ns;⑥TWT<sup>3</sup>系统在实现时间同步方面,精度虽不及卫星和光纤,但在其他方案失效或不便使用的情况下,可作为一种方案实现分布式系统的时间比对。

根据气象数据和改进后的模型可得TWT<sup>3</sup>系统的对流层斜延迟,但处于任意位置的比对站以及在气象数据缺失的条件下,对流层斜延迟的精确估计需进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Hong W S, Imae M. Improvement of precision on two-way satellite time and frequency transfer[J]. Electronics Letters, 2009, 45(18): 945-946.
- [2] Gaderer G, Loschmidt P, Sauter T. Improving fault tolerance in high-precision clock synchronization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(2): 206-215.
- [3] 张启雷, 常文革, 黎向阳. 基于星载照射源的被动SAR系统时频同步误差影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(1): 77-82.  
ZHANG Qilei, CHANG Wenge, LI Xiangyang. Analysis of time and frequency synchronization error for the passive SAR system with spaceborne illuminators[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(1): 77-82. (in Chinese)
- [4] 刘强, 孙际哲, 陈西宏, 等. 对流层双向时间比对及其时延误差分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 341-347.  
LIU Qiang, SUN Jizhe, CHEN Xihong, et al. Analysis of two

- way troposphere time transfer and its delay errors[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(4): 341 - 347. (in Chinese)
- [5] 刘继业, 陈西宏, 刘强, 等. 一种双基地雷达时间同步的新方法[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4): 10 - 14.  
LIU Jiye, CHEN Xihong, LIU Qiang, et al. A novel method for time synchronization of bistatic radar system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(4): 10 - 14. (in Chinese)
- [6] Chen X H, Liu Q, Hu D H, et al. Delay analysis of two way time transfer based on troposphere gradients [C]// *Proceedings of the 10th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014)*, Beijing, China, 2014: 543 - 547.
- [7] 高兴国, 刘焱雄, 冯义楷, 等. GNSS 对流层延时映射函数影响分析比较研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(12): 1401 - 1404.  
GAO Xingguo, LIU Yanxiong, FENG Yikai, et al. Analysis of influence of mapping function on GNSS tropospheric delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(12): 1401 - 1404. (in Chinese)
- [8] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.  
WU Wenjun. Research on two-way satellite time and frequency transfer errors [D]. Xi'an: National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences University, 2012. (in Chinese)
- [9] 胡茂凯, 孙际哲, 陈西宏, 等. 对流层散射衰落信道下正交频分复用系统性能[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(1): 239 - 243.  
HU Maokai, SUN Jizhe, CHEN Xihong, et al. Performance of OFDM system under troposcatter fading channels [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(1): 239 - 243. (in Chinese)
- [10] 赵静喏, 宋淑丽, 陈钦明, 等. 基于垂直剖面函数式的全球对流层天顶延迟模型的建立[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(10): 3140 - 3153.  
ZHAO Jingno, SONG Shuli, CHEN Qinming, et al. Establishment of a new global model for zenith troposphere delay based on functional expression for its vertical profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3140 - 3153. (in Chinese)
- [11] 王威, 魏立栋, 范国清. 星地距离变化对星地双向时间比对的影响及改正[J]. *国防科技大学学报*, 2010, 32(2): 23 - 26.  
WANG Wei, WEI Lidong, FAN Guoqing. The influence and correction of satellite-to-ground range variation on two-way time comparison between satellite and ground station clocks[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(2): 23 - 26. (in Chinese)
- [12] Foelsche U, Kirchengast G. A new "geometric" mapping function for the hydrostatic delay at GPS frequencies [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(3): 153 - 157.