● NAME OF A

国防科技大学学报 Journal of National University of Defense Technology ISSN 1001-2486,CN 43-1067/T

# 《国防科技大学学报》网络首发论文

题目:	氢铯联合的卫星双向钟差比对链路噪声校正方法		
作者:	李骁逸,张耀宗,崔星		
收稿日期:	2024-10-21		
网络首发日期:	2024-12-31		
引用格式:	李骁逸,张耀宗,崔星.氢铯联合的卫星双向钟差比对链路噪声校正方法		
	[J/OL]. 国防科技大学学报.		
	https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20241230.1517.002		



# www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

# 氢铯联合的卫星双向钟差比对链路噪声校正方法

### 李骁逸\*,张耀宗,崔星

(中国北方车辆研究所,北京 100071)

摘要:针对卫星双向钟差比对链路噪声不具有严格的周期性特征,导致通过最小二乘拟合求得氢原子钟的频漂时,往往将部分链路噪声值算入其中,使链路噪声计算出现偏差的问题。可以通过本地守时站内氢钟-铯钟钟差比对,求得氢原子钟准确的频率漂移。进而获得异地跨站氢钟钟差数据的准确频漂,降低频漂对最小二乘拟合结果的影响,可以获得更加准确的总和噪声数据。计算结果证明,这一氢铯联合卫星双向时频传递链路噪声校正方法,相比于完全依靠氢原子钟的计算方法,噪声计算偏差由 1 ns 左右缩减至 0.1 ns 左右,有效提升了链路噪声计算精度和校正效果。

关键词:卫星双向时频传递;噪声校正;氢铯联合中图分类号:TN961 文献标志码:A

# A link noise correction method of two-way satellite time and frequency transfer through combination of hydrogen maser and cesium clock

#### LI Xiaoyi<sup>\*,</sup>, ZHANG Yaozong<sup>1</sup>, CUI Xing<sup>1</sup>

(China North Vehicle Research Institute, Beijing, 100071, China; )

Abstract: Due to the lack of strict periodicity in link noise of two-way satellite time and frequency transfer, when calculating the frequency drift of hydrogen atomic clocks through least squares fitting, some link noise will be included, resulting in bias in the calculation of link noise. Regarding this issue, the accurate frequency drift of the hydrogen atomic clock could be worked out by comparing the clock bias between the hydrogen and cesium clocks within the local timekeeping station. Furthermore, frequency drift of hydrogen clocks across different sites could be obtained. This method could reduce the impact of frequency drift on least squares fitting and obtain more accurate total noise data. The results indicate that this hydrogen-cesium joint two-way satellite time and frequency transfer noise correction method reduces the noise calculation deviation from 1 ns to 0.1 ns compared to the calculation method only relying on hydrogen atomic clocks, effectively improving the calculation accuracy and correction effect of link noise.

Key words: Two-way satellite time and frequency transfer; link noise correction; combination of hydrogen maser and cesium clock

卫星双向时频传递技术是一种高精度时间 传递技术,北斗三号系统采用该方法建立不同地 面守时站之间的远程钟差比对链路<sup>[1]</sup>。在卫星双 向时频传递链路的运用中,链路噪声的校正决定 了时频传递的性能<sup>[2]</sup>。常用卫星双向时频传递链 路的链路噪声校正技术主要分为噪声建模和噪 声加权平均两类<sup>[1]</sup>。

在噪声建模方法中,需要首先分析链路噪声 的成因。然后根据噪声源的物理和数学特征,建 立链路噪声的数学表达式。当前研究认为卫星双 向比对的噪声主要源于地面站设备误差、大气层 误差、星上设备误差和卫星运动误差<sup>[3]</sup>。武文俊 等人的研究表明室外设备温度时延波动近似为 周期性变化,变化周期包括24小时左右的短周 期,以及月份、季节等因素导致的长周期变化<sup>[4]</sup>。 大气层误差主要包括对流层时延和电离层时延, 由于地面站的上下行信号使用不同频段,导致两 路信号的对流层和电离层时延无法彻底抵消,需

收稿日期: 2024-10-21

基金项目:国家部委基金资助项目(LZY2023043022)

<sup>\*</sup>**第一作者:** 李骁逸(1990-),男,云南丽江人,中级工程师,博士,E-mail: 409668744@qq.com

要其他方法进一步校正[4]。常用的电离层改正方 法为经验模型方法,改正精度约为60%<sup>[5]</sup>。北斗 三号系统中播发了北斗全球电离层延迟修正模 型,可以达到60%的校正精度,在国内及周边地 区可以达到 75%[6-8]。使用全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 双频 接收机基于双频伪距观测值求出电离层延迟的 方法则受到伪距测距精度的影响而存在误差<sup>[9]</sup>。 星上设备误差主要指卫星转发器引起的噪声,其 时延波动取决于卫星转发器受阳光照射的情况 [4]。武文俊等人通过正弦波拟合的方法对其进行 了校正,校正后的残差波动峰峰值在 0.4 ns 左右 [4]。由于卫星的定轨精度及各种摄动力的影响, GEO 卫星在运行中无法稳定于理论轨道,而在 一定范围内做周期运动。这一周期运动从两个方 面对卫星双向钟差比对造成影响。第一是 Sagnac 效应, 第二是信号上下行路径不对称<sup>[5]</sup>。研究表 明 GEO 卫星运动导致的 Sagnac 效应和上下行 路径不对称导致的时延均为周期等于地球自转 周期的正弦曲线,幅值约为 0.1 ns<sup>[5]</sup>。根据以上 研究结果,噪声建模校正方法修正后的校正残差 在1ns以内, 残差曲线近似为正弦曲线, 无法实 现对链路噪声的彻底校正。

国际计量局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 通过多个地面守时站之间跳 转的方式,在两个地面守时站之间建立多条相互 独立的卫星双向时频传递链路,通过多条相互独 立的传递链路加权平均的方法降低两个地面守 时站之间的链路噪声,但该方法受到能够建立的 链路数量限制[10-12]。杨文可用多个卫星,在异地 守时站之间建立多个卫星双向比对链路,通过多 个卫星双向比对链路之间加权平均的方法降低 两个异地守时站之间的链路噪声[13]。但多个卫 星双向比对链路均使用两个地面守时站内的上 下行设备,上下行设备所处的工作环境相同,具 有近似的链路噪声,无法通过多链路加权平均而 消除。李骁逸提出了一种将链路噪声全部引入异 地跨站原子钟钟差数据内,通过最小二乘拟合扣 除原子钟频漂频差,求得原子钟噪声与链路噪声 的总和噪声数据,进而通过总和噪声数据加权平 均求得链路噪声的方法[1]。但是该方法受到原子 钟性能的制约,李骁逸采用了氡原子钟以便获得 精确的链路噪声数据,而铯原子钟由于自身噪声 较大,难以采用该方法[1]。但氢原子钟存在原子 钟老化等因素导致的频率漂移,同时由于链路噪 声并非理想的周期性曲线,曲线均值并不恒定, 所以最小二乘拟合无法分辨链路噪声的均值波 动和氢原子钟的频率漂移。因此采用该方法会使 最小二乘拟合结果隐匿部分链路噪声。针对氢原 子钟存在频漂,最小二乘拟合无法分辨频漂和链 路噪声均值波动,而铯原子钟虽无频漂但自身噪 声过大,无法参与链路噪声计算的问题,本文改 进了文献[1]提出的链路噪声加权平均校正方法, 提出了一种氢铯联合的链路噪声加权平均校正方法, 提出了一种氢铯联合的链路噪声加权平均校正方法, 最出了一种氢铯联合的链路噪声加权平均校正方法, 有法。通过两个守时站各自的铯原子钟,求得各 自氢钟的频率漂移。随后在每一组异地跨站钟差 数据中,根据求得的氢原子钟频漂来计算总和噪 声,可以更加准确的求得链路噪声数值,解决最 小二乘拟合隐匿噪声曲线的问题。

### 1 基于站间钟差总和噪声数据加权平均的 链路噪声校正方法

#### 1.1 包含链路噪声的异地站间钟差数据

图 1 为分布在两个地面站的异地钟组。两个 钟组通过卫星双向时频传递链路实现了异地钟 差比对。地面站 A 中的守时氢原子钟 A<sub>1</sub>、...、 A<sub>n</sub> 与地面站 A 中的氢参考钟 A<sub>0</sub> 分别产生钟差 比对数据 a<sub>1</sub>、...、a<sub>n</sub>,守时铯原子钟 D<sub>1</sub>、...、D<sub>n</sub> 与地面站 A 中的氢参考钟 A<sub>0</sub> 分别产生钟差比对 数据 d<sub>1</sub>、...、d<sub>n</sub>。地面站 B 中的守时氢原子钟 B<sub>1</sub>、...、B<sub>n</sub>与地面站 B 中的守时氢原子钟 B<sub>1</sub>、...、B<sub>n</sub>与地面站 B 中的守时氢原子钟 E<sub>1</sub>、...、C<sub>n</sub>,守时铯原子钟 E<sub>1</sub>、...、 E<sub>n</sub>与地面站 B 中的氢参考钟 B<sub>0</sub> 分别产生钟差比 对数据 e<sub>1</sub>、...、e<sub>n</sub>。参考钟 B<sub>0</sub> 与参考钟 A<sub>0</sub> 通过 卫星共视比对链路产生钟差比对数据 ab。



图 1 卫星双向时频传递链路示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-way satellite time and

frequency transfer

上述钟差数据可表示为:

$$\begin{cases} a_{i} = A_{i} - A_{0}; i = 1, \dots, n; \\ d_{i} = D_{i} - A_{0}; i = 1, \dots, n; \\ b_{j} = B_{j} - B_{0}; j = 1, \dots, n; \\ e_{j} = E_{j} - B_{0}; j = 1, \dots, n; \\ ab' = B_{0} - A_{0}; \\ ab = ab' + \xi(t); \end{cases}$$
(1)

其中, $\xi(t)$ 为卫星双向链路的链路噪声,ab'为参 考钟 B<sub>0</sub>与参考钟 A<sub>0</sub>不包含链路噪声时的比对 钟差。可以获得如式(2)所示的原子钟 B<sub>1</sub>、…、B<sub>n</sub> 相对于 A<sub>0</sub>的钟差  $ab_1$ 、…、 $ab_n$ 。

$$ab_{j} = b_{j} + ab = (\mathbf{B}_{j} - \mathbf{B}_{0}) + (\mathbf{B}_{0} - \mathbf{A}_{0}) (2)$$
  
+ $\xi(t) = \mathbf{B}_{j} - \mathbf{A}_{0} + \xi(t); j = 1,..., n;$ 

进一步可以获得如式(3)所示的原子钟 B<sub>j</sub>; *j* = 1,...,*n* 与原子钟A<sub>j</sub>; *j* = 1,...,*n* 之间的钟差比对 数据 *a<sub>j</sub>b<sub>j</sub>*,即为含有比对链路噪声的异地跨站站 原子钟钟差数据。

$$a_{j}b_{j} = ab_{j} - a_{j} = B_{j} - A + \xi(t) - (A_{j} - A)$$
  
=  $B_{j} - A_{j} + \xi(t); j = 1,...,n$  (3)

氢原子钟之间进行钟差比对,产生的钟差数 据可以由二阶多项式 $x(t) = x_0 + y_0 t + z_0 t^2 + \varepsilon(t)$ 表达, 其中 $x_0$ 为两个氢原子钟之间的初始相位差, $y_0$ 为 两个氢原子钟之间的初始频差, $z_0$ 为两个原子钟 之间的初始频漂差, $\varepsilon(t)$ 为两个氢原子钟的总噪 声<sup>[12]</sup>。因此式(3)可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$a_{j}b_{j} = x_{0,j,j} + y_{0,j,j}t + z_{0,j,j}t^{2} + \varepsilon_{j,j}(t) + \xi(t); j = 1,...,n$$
(4)

若为铯原子钟之间进行钟差比对,产生的钟 差数据可以由一阶多项式 $x(t) = x_0 + y_0 t + \varepsilon(t)$ 表 达,其中 $x_0$ 为两个铯原子钟之间的初始相位差,  $y_0$ 为两个铯原子钟之间的初始频差, $\varepsilon(t)$ 为两个 铯原子钟的总噪声<sup>[14]</sup>。因此式(3)可以表示为:

$$a_{j}b_{j} = x_{0,j,j} + y_{0,j,j}t + \varepsilon_{j,j}(t) + \xi(t); j = 1,...,n$$
(5)

当一台氢原子钟与一台铯原子钟之间进行 钟差比对时,钟差数据 d<sub>i</sub>和 e<sub>j</sub>应包含氢原子钟 与铯原子钟之间的相位差、频差,以及氢原子钟 的频漂 z<sub>0</sub>。其表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} d_i = x_i + y_i t + z_i t^2 + \varepsilon_i(t); i = 1, ..., n \\ e_j = x_j + y_j t + z_j t^2 + \varepsilon_j(t); j = 1, ..., n \end{cases}$$

(6)

1.2 求得包含有链路噪声的钟差数据总和噪声 序列

景月娟<sup>[5]</sup>、刘禹岑<sup>[15]</sup>等人研究了卫星双向时 频传递中的链路噪声成因及其数学特征,指出地 面站设备噪声、大气层噪声、卫星运动的 Sagnac 效应共同组成了卫星双向时频传递的链路噪声。 上述噪声均具有周期和幅度小范围变化的近似 周期性波动,可以正弦曲线近似表示<sup>[15-16]</sup>,由上 述噪声构成的链路噪声*ξ*(*t*)因此同样具有周期 和幅度小范围变化的近似周期性波动,可以式(7) 表示链路噪声。

$$\xi(t) = p_1 \times \sin(\frac{t_1}{q_1}) + p_2 \times \sin(\frac{t_2}{q_2})$$
(7)

其中 p<sub>1</sub>、p<sub>2</sub>为伪正弦曲线幅值,其数值在 1 ns 左 右波动,q<sub>1</sub>为伪正弦曲线周期,其数值在 22 h 至 26 h 之间波动<sup>[15-16]</sup>,q<sub>2</sub>表示以年为周期的长期温 度波动引起的大气层和设备温度时延,设置为 365×24h<sup>[4]</sup>。根据以上数值,产生链路噪声模拟 曲线如图 2 所示。





Fig.2 Noise simulation curve

若链路噪声均值在 0 s 附近保持稳定, 文献 [1]所述通过最小二乘拟合扣去异地钟差比对数 据  $a_jb_j$ 中的初始相位差、初始频差、频漂,可以 得到如式(8)所示的原子钟  $B_j$ ; j = 1,...,n 相对于原 子 钟  $A_j$ ; j = 1,...,n 钟 差 数 据 的 总 和 噪 声 序 列  $\varepsilon_{ab,j,j}'(t)$ ,其中仅包含各原子钟钟差数据内的原 子钟自身噪声 $\varepsilon_{ab,j,j}(t)$ 以及链路噪声 $\xi(t)$ 。

$$\varepsilon_{ab,j,j}'(t) = \varepsilon_{ab,j,j}(t) + \xi(t); j = 1, ..., n$$
(8)

但若噪声如图 2 所示,均值不在 0 s 附近, 且由于多个正弦曲线的叠加,使其在计算时长内 呈现出螺旋递增或递减,则上述最小二乘拟合方 法无法求得正确的频率漂移。其最小二乘拟合结 果中不仅含有氢原子钟的频率漂移,同时还包含 有链路噪声在当前计算时长内的递增/递减速度 值。当以该值作为氢原子钟频漂,在异地跨站钟 差内扣除原子钟频漂时,会同时扣除一部分链路 噪声数值。导致扣除后所得的总和噪声数值无法 完整包含链路噪声。

文献[1]提出的解决方法是:将尽可能多的 历史数据纳入当前计算时长,使用更长的历史数 据来提升计算时长内链路噪声的周期性特征,以 便最小二乘拟合能够尽量少的包含链路噪声。但 这一方法会大大增加需要使用的历史数据长度。 增加计算量的同时,使计算结果受到较多的历史 数据影响,不能充分反映链路噪声的当前特征。

针对这一问题,本文通过两个地面站各自内部的氢钟-铯钟钟差数据,求得各个氢原子的准确频漂数值。对于构成异地跨站氢原子钟对的两个异地氢原子钟,可以通过两个守时站各自求得氢钟频漂的方法,获得异地跨站氢原子钟钟差数据的总频漂。即通过铯原子钟 $D_i$ ;i=1,...,n与原子钟 $A_0$ 之间的钟差比对数据 $d_i$ ;i=1,...,n,减去氢原子钟 $A_i$ ;i=1,...,n与原子钟 $A_0$ 之间的钟差比对数据 $d_i$ ;i=1,...,n,减去氢原子钟 $A_i$ ;i=1,...,n与原子钟 $A_0$ 之间的钟差比对数据 $d_i$ ;i=1,...,n,减去氢

$$= \mathbf{A}_{i} - \mathbf{D}_{i}$$

$$= x_{i} + y_{i}t + z_{ia}t^{2} + \varepsilon_{i}(t); i = 1,..., n;$$
(9)

由于铯原子钟不含有频漂,因此对式(9)所 示氢-铯钟差数据进行最小二乘拟合,可以精确 求得氢原子钟A<sub>i</sub>;*i*=1,...,*n*的频漂*z<sub>ia</sub>*。同理对地面 守时站 B 内拥有的氢原子钟和铯原子钟采用以 上方法,求得氢原子钟B<sub>j</sub>;*j*=1,...,*n*的频漂*z<sub>ib</sub>*。 对于氢原子钟 $A_i; i=1,...,n$ 和氢原子钟  $B_j; j=1,...,n$ 构成的异地跨站原子钟对,其异地 跨站钟差数据的总频 漂  $z_{iab} = z_{ia} + z_{ib}; i = 1,...,n;$ 即可求得。

基于总频漂 z<sub>iab</sub> 对跨站异地钟差数据 a<sub>j</sub>b<sub>j</sub> 进行趋势项扣除,即可获得更加完整的总和噪声数 值序列。

#### 1.3 总和噪声加权平均的链路噪声校正

在守时系统中,各个原子钟噪声状态相互独 立,而噪声分布近似。n组独立同分布数组求平 均,所得的均值数组,其方差为原独立同分布数 组方差的 1/n。因此多个相互独立的原子钟钟差 数据进行平均,所得结果中的原子钟自身噪声

 $\varepsilon_{ab,j,j}(t)$ 会被削弱为 $\sqrt{n}$ ,  $\overline{\varepsilon_{ab,j,j}(t)}$ 为 n 组钟差数据的平均噪声强度。由于链路噪声在所有钟差数据的总和噪声序列中完全一样,因此不会被平均计算削弱。对 n 组总和噪声序列进行平均后的结果如式(10)所示:

$$\varepsilon'(t) = \frac{\overline{\varepsilon_{ab,j,j}(t)}}{\sqrt{n}} + \xi(t)$$
(10)

可以看出 n 越大,则平均结果中的原子钟自 身噪声分量越少。当 n 趋于无穷大时,平均结果 中的原子钟自身噪声分量趋于 0。

将式(2)与式(10)联立即可得到噪声校正后 异地站各原子钟B<sub>j</sub>; j=1,...,6 与本地参考钟 A<sub>0</sub>之

间的钟差序列 ab, 的表达式。如式(9)所示:

$$ab'_{j} = x_{ab0,j} + y_{ab0,j}t + z_{ab0,j}t^{2} + \varepsilon_{ab,j}(t) + \xi(t) - \frac{\overline{\varepsilon_{ab,j,j}(t)}}{\sqrt{n}} - \xi(t)$$
  
=  $x_{ab0,j} + y_{ab0,j}t + z_{ab0,j}t^{2} + \varepsilon_{ab,j}(t) - \frac{\overline{\varepsilon_{ab,j,j}(t)}}{\sqrt{n}}; j = 1, ..., 6$   
(11)

从式(11)中可以看到,在ab,'中卫星共视比

对链路的链路噪声 $\xi(t)$ 已被百分之百校正。同时 式(11)表明,在采用本文提出的链路噪声校正方 法时会损失一部分原子钟自身噪声,损失量为  $\overline{\epsilon_{ab,j,j}(t)}/\sqrt{n}$ 。噪声损失会使钟差数据的频率稳定 度性能表现出提升。但是这一频率稳定度提升是 虚假的,并非原子钟钟差数据性能的真实提升, 增加参与计算的原子钟数目可以减少这一虚假 提升。

#### 2 计算结果分析

本文以仿真产生的氢原子钟和铯原子钟计 算了前文提出的校正方法,氢原子钟和铯原子钟 的参数设置参考刘阳等人的设置方法<sup>[17]</sup>。当采 用文献[1]的方法和本文提出的方法,每个地面 站内的氢原子钟数量从2台增加至7台时,所得 各原子钟与链路的总和噪声序列加权平均结果 如图3所示(曲线过多使图像难以观察,因此图 3仅以2到4台氢原子钟举例说明)。





Fig.3 Noise curve and the result of weighted average 图 3 中黑色曲线为噪声曲线,图中其余不同 颜色的曲线,表示参与计算的氢原子钟数目由 2 台逐步增加至 7 台。基于异地钟差进行最小二乘 拟合求得频漂计算值的方法,在图中以"+"标 记。基于本地氢-铯钟差进行最小二乘拟合求得 频漂计算值的方法,在图中以"o"号标记。可 以看出基于本地氢-铯钟差进行最小二乘拟合求 得频漂计算值的方法,所得的链路钟差计算值更 加接近真实噪声曲线。基于异地钟差进行最小二 乘拟合求得频漂计算值的方法,其所得计算结果 偏离真实噪声曲线更远。

图 4 所示为两种方法下,随着参与计算的氢 原子钟数目的增加,计算得到的链路噪声计算值, 与真实链路噪声之差的最大值的波动曲线。



图 4 两种方法下噪声计算偏差随原子钟数目变化 Fig.4 The deviations of noise calculation with different

numbers of atomic clocks by different ways

图 4 可以看出,两种方法下,随着原子钟数 目的增加,链路噪声求得值与真实噪声值之间的 偏差均逐渐下降。然而通过异地跨站钟差数据进 行最小二乘拟合,求取频漂计算值的方法,其所 得的计算结果与真实噪声值之间的偏差,始终比 本文提出的通过本地氢-铯钟差求取频漂计算值 的方法,所得的计算结果与真实噪声值之间的偏 差,大1ns左右。前种方法仅当每个地面守时站 内的氢原子钟数目大于等于7台时,方可使偏差 稳定小于1ns。而本文提出的方法,能够更加精 确地求得链路噪声计算值,即使每个地面守时站 内的氢原子钟数目仅有2台,仍可实现0.2 ns 的 计算偏差。在本文提出的方法下,当氢原子钟数 目大于等于7台时,可以使计算偏差稳定的小于 0.1 ns。

图 5 为不同数目的氢原子钟参加计算时,两 种方法校正前后,异地跨站氢原子钟频率稳定度 对比。由于曲线较为密集,曲线数量过多严重不 利于观察,因此图 5 以 2 组氢原子钟对、3 组氢 原子钟对、4 组氢原子钟对举例显示。





Fig.5 Frequency stability of clock difference data before

#### and after calibration

图 5 中黑色曲线为不包含链路噪声的异地 跨站氢原子钟组的频率稳定度。红色曲线为加入 链路噪声后的异地跨站氢原子钟组的频率稳定 度。通过本文所提方法求得链路噪声计算值并进 行噪声校正后,获得的异地跨站氢原子钟钟差数 据的校正后频率稳定度曲线为图中蓝色曲线。通 过文献[1]所提方法求得链路噪声计算值并进行 噪声校正后,获得的异地跨站氢原子钟钟差数据 的校正后频率稳定度曲线为图中浅蓝色曲线。图 中不同曲线标志,表明不同数目的氢原子钟参与 了噪声计算。图5所示曲线之间的详细差异如表 1 所示。

表	1	两种方法的频率稳定度差异

Tab.1 Differents of frequency stability deviation between

two methods					
参与计算	亚海市	参考文献	本文方		
的原子钟	一用少	[1]方法/	法/10 <sup>-15</sup>		
数/个	式/19	10-15秒	秒		
	千	4.29	4.29		
2	万	1.34	1.34		
2	十万	0.631	0.608		
	四十万	2.02	1.87		
	千	4.96	4.96		
2	万	1.52	1.52		
3	十万	0.704	0.681		
	四十万	1.81	1.66		
	Ŧ	5.27	5.27		
4	万	1.60	1.60		
4	十万秒	0.749	0.725		
	四十万	1.70	1.54		

表1中的数据差异表明,由于使用铯原子钟 计算了氢原子钟的长期频飘,因此降低氢原子钟 的长期频飘引起的链路噪声计算误差。表明本文 提出的链路噪声校正方法可以更加准确的计算 出链路噪声的长期缓慢波动。从而使校正后的异 地钟差数据比文献[1]所得的校正后数据,具有 更加优良的长期频率稳定度。表1同时也表明, 对氢原子钟长期频飘的计算,和对链路噪声长期 缓变成分的校正,对于异地钟差数据的短期频率 稳定度没有影响。本文所提方法可以获得和文献 [1]所提方法完全一致的万秒及更短平滑步长下 的频率稳定度。

图 5 和表 1 表明,对于氢原子钟长期频飘的 计算,以及对于链路噪声长期缓变成分的校正, 主要提升异地钟差十万秒及更长平滑步长下的 频率稳定度性能。图 6 和表 2 选择十万秒平滑步 长下的校正后异地钟差频率稳定度性能为对比 条件,比较了随着原子钟数目的增加,两种方法 取得的校正后异地跨站钟差频率稳定度,与不含 链路噪声的异地跨站钟差频率稳定度之差。



图 6 不同原子钟数量下的十万秒频率稳定度偏差 Fig.6 Frequency stability deviation in 100000s Smooth time with different numbers of clocks

通过图 6 和表 2 可以确认,本文提出的本地 氢-铯钟差求得氢钟频漂的方法,校正后的钟差 数据稳定度,相比于文献[1]所提出的方法获得 的校正后频率稳定度,更加贴近氢原子钟对的自 身性能,更进一步削弱了链路噪声对异地跨站氢 原子钟钟差数据频率稳定度指标的影响。与此同 时,两种方法均表明,参与计算的氢原子钟对越 多,则获得的链路噪声校正效果越好。但就性能 提升程度而言,两种方法均表明,当参与链路噪 声计算的氢原子钟数目超过 7 对时,进一步增加 氢原子钟数目,获得的频率稳定度性能提升已非 常微弱。

#### 表 2 不同原子钟数量下的十万秒频率稳定度偏 差

Tab.2 Frequency stability deviation in 100000s Smooth

time with different numbers of clocks

氢原子钟数 目	本地氢铯钟差 求得氢原子钟 频漂方法/10 <sup>-16</sup> 秒	异地钟差求得氢 原子钟频漂方法 /10 <sup>-16</sup> 秒
2 对氢原子钟	3.90	3.67
3 对氢原子钟	3.17	2.94
4 对氢原子钟	2.73	2.49
5 对氢原子钟	2.62	2.38

6 对氢原子钟	2.42	2.18
7 对氢原子钟	2.41	2.18
8 对氢原子钟	2.44	2.22
9 对氢原子钟	2.76	2.53
10 对氢原子 钟	2.08	1.85

### 3 结论

本文的计算结果表明,相比于文献[1]方法 所得结果,本文所提方法,能够更加有效的校正 链路噪声内的长期缓变噪声。可以使总和噪声加 权平均结果与模拟链路噪声之差减小 0.9 ns 左 右,由1ns上下,降低至0.1 ns以内。校正后异 地钟差数据的长期频率稳定度,更加接近未受链 路噪声影响的钟差数据真实频率稳定度性能。以 上结果证明了本文提出的方法对链路噪声具有 更加精确的校正效果。

此外,本文提出的方法和文献[1]提出的方 法均表明,当两个异地守时站用于构建异地钟差 数据的氢原子钟数目超过7对时,不论是从总和 噪声加权平均结果贴近模拟链路噪声的角度,还 是从校正后钟差数据频率稳定度的角度来看,进 一步提升氢原子钟数目带来的链路噪声校正效 果的提升已经较为轻微。现实系统的构建中,可 以根据需要达到的性能指标和系统建设成本综 合考虑,选择合适的氢原子钟对数目。

## 参考文献(References)

- 李骁逸. GNSS 联合守时关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
   LI X Y. Key technologies of Internal units united time keeping in GNSS system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
   ① 仇三山, 于雯, 孙长军,等. 基于卫星双向时
- 2] 机三面,于变,孙长年,等. 錾子卫星双间的 间比对的无中心站间时间同步[J]. 电子技术 应用, 2024, 50(6): 107-110. QIU S S, YU W, SUN C J, et al. The no-center time synchronization based on two-way satellite time transfer[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(6): 107-110. (in Chinese)
- [3] 张继海. 基于北斗三号的 PPP 时间比对方法 研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2022.

ZHANG J H. The research on PPP time comparison technology with BeiDou-3 [D]. Xi'an.

National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

- [4] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究
  [D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2012.
  WUWJ. Research on two-way satellite time and frequency transfer errors[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [5] 景月娟. 动态站的卫星双向时间传递关键技术研究[D]. 西安:中国科学院国家授时中心, 2016.

JING Y J. Study on key technologies of two-way satellite time transfer based on mobile station[D]. Xi'an. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

- [6] YASYUKEVICH Y V, ZATOLOKIN D, PADOKHIN A, et al. Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRIplas, NeQuick2, and GEMTEC ionospheric models: a comparison in total electron content and positioning domains[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4773.
- [7] 鲍任杰,唐成盼,胡小工等.北斗广播电离层
   模型精度评估研究[J/OL],北京航空航天大学
   学报. (2023-12-07)[2024-09-22]. https://doi.or
   g/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588.

BAO R J, TANG C P, HU X G, et al. Stu dy on the accuracy evaluation of BeiDou br oadcast ionospheric model[J/OL], Journal of Beijing University of Aeronautics and Astron autics. (2023-12-07)[2024-09-22]. https://doi.or g/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588.(in Chine se)

- [8] TIAN Y, LI S H, SHEN H, et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models[J]. Astrophysics and Space Science, 2022, 367(8): 78.
- [9] 广伟. GNSS 时间互操作关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2019.
   GUANG W. Research on key technologies of GNSS time interoperability[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [10] JIANG Z, PETIT G. Redundancy in the TAI TWSTFT time transfer network[C]//Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum. 2006: 468-475.
- [11] ZHOU M D, JI X, ZHANG M Y, et al. Accuracy analysis of timing comparison for BDS-3 and GPS based on satellite common view algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2410(1): 012017.
- [12] TSENG W H, LIN S Y, FENG K M, et al.

Improving TWSTFT short-term stability by network time transfer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(1): 161-167.

- [13] 杨文可.高精度站间双向时间频率传递关键 技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
  YANG W K. Research on key technologies of high precision inter-station two-way time and frequency transfer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] HUTSELL S T. Ideas for future GPS timing improvements[C]//Proceedings of 27th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, 1995: 63-74.
- [15] 刘禹岑. 高精度卫星时间同步技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
  LIU Y C. Research on high precision satellite time synchronization technology[D]. Changsha:
- National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese) [16] WER J H. "China's BeiDou navigation satellite system" white paper published[1]. AEROSPACE
- system" white paper published[J]. AEROSPACE CHINA, 2016, 17(2): 67.
- [17] 刘阳. 基于虚拟钟的联合守时算法研究[D].长沙:国防科技大学, 2019.

LIU Yang. Research on joint time-keeping algorithm based on virtual clocks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)