

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-02-0101-12

卫星单频近距离共视与双频单向授时站间同步性能分析

曾文帝¹, 何力¹, 刘娅²

(1. 中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057;
2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600)

摘要: 文章对双频电离层修正技术原理和卫星共视技术原理进行了论述。通过建立相应的数学模型, 对它们的电离层时延修正处理方法进行分析, 从而说明在电信网络的高精度时间传递过程中采用单频接收机代替双频接收机实施卫星共视技术的可行性。最后, 通过实验论证了在一定基线范围内, 单频卫星共视比对实现的授时精度能达到近似双频的结果。

关键词: 单频; 双频; 卫星共视; 授时精度

Analysis of synchronization performance between two stations with satellite single-frequency close-range common view and dual-frequency one-way timing

ZENG Wen-di¹, HE Li¹, LIU Ya²

(1. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: This paper discusses the principles of dual-frequency ionospheric correction technology and satellite common-view technology. By establishing the corresponding mathematical models, we analyze their processing methods for the ionospheric delay correction, and then illustrate the feasibility of using single-frequency receiver instead of dual-frequency receiver to implement satellite common-view technology in the process of high-precision time transmission of telecommunication network. Finally, we experimentally demonstrate that the timing accuracy by single-frequency satellite common-view comparison approaches to the one by dual-frequency within a certain baseline.

Key words: single-frequency; dual-frequency; satellite common-view; timing accuracy

0 引言

随着 5G 技术和物联网的发展, 时间同步技术精度可能出现分级要求。在满足 5G 成帧的时间精度

收稿日期: 2019-10-23; 接受日期: 2020-01-21

基金项目: 新一代宽带无线移动通信网重大专项资助项目(2017ZX03001016)

作者简介: 曾文帝, 男, 工程师, 主要从事通信网时钟传递研究。

基本要求下 (PRTC, 即主要指标为时间与标准 UTC 时间偏差 ± 100 ns 以内)^[1], 可能会出现更高精度的分级需求, 比如联合 MIMO (multi input multi output) 发送、室内定位或其他物联网的需求。为了实现更高精度更可靠的时间网建设, 一种可能的解决方案是将网络分割, 缩小时间网规模以规避建网风险。

如图 1 (卫星共视应用场景) 所示, 未来时间网可能形成基于卫星共视技术的多级比对网络, 按区域划分多个同步网络, 区域内的若干节点作为从站与主站通过卫星共视比对实现同步, 而各网络之间通过更高性能远程比对进行同步。比如可能使用基于卫星共视的超高精度时间服务器 (ePRTC, 即主要指标为时间与标准 UTC 时间偏差 ± 30 ns 以内)^[2], 配置高性能铷钟和双频卫星接收机, 实现城域中心的时间服务器与基准 (比如中国科学院国家授时中心) 比对, 以此提供高稳定高准确度的时间信号, 回传网通过高精度承载设备传递时间。回传网的中心时间服务器既作为超高精度时间服务器的共视从站, 还是区域的主站, 用于同步该区域内各个作为共视从站的时间服务器。

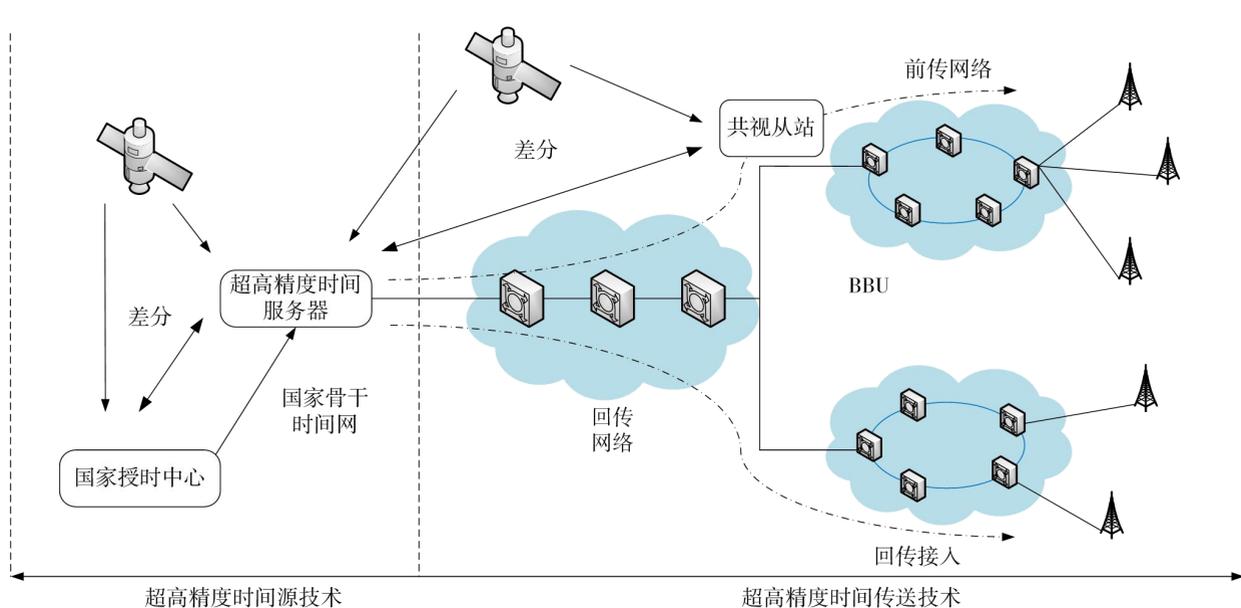


图 1 卫星共视应用场景

对于局部更高时间精度要求的区域, 使用低成本卫星共视从站, 作为有线网时间服务的时间源, 达到 100 km 距离范围内的主、从站间时间偏差优于 ± 30 ns, 此外基于光纤传递的时间还可以作为卫星时间源的备份。不同局部区间的时间误差, 由共视从站间的误差决定。

文章对双频接收机授时误差修正原理与卫星共视高精度原理进行详细说明和对比, 论述了两站距离在 100 km 以内进行时间比对时, 作为卫星共视比对的从站使用单频接收机代替双频接收机的可行性, 达到既保障高精度时间 (ePRTC) 传递又显著降低成本的目的。

1 双频修正算法模型

GNSS 授时导航定位的过程中包含有各种误差, 比如卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟、相对论效应、多路径效应和接收机噪声等, 其中电离层延迟造成的误差可能是整个卫星定位授时过程中误差最大的分量^[3]。图 2 为 GNSS 单向授时过程误差产生的简要图示。

电离层是高度为 50~1 000 km 的大气层, 由于太阳的辐射, 气体分子被电离产生了自由电子和离子。无线电波在穿越电离层时会发生折射, 该折射系数是电波频率的一个函数, 最终导致传播路径和速度都

会发生变化,从而产生电离层延迟。在一些 GNSS 系统中,由电离层延迟引起的伪距误差最大为 150 m,最小时也有 5 m 左右^[4]。

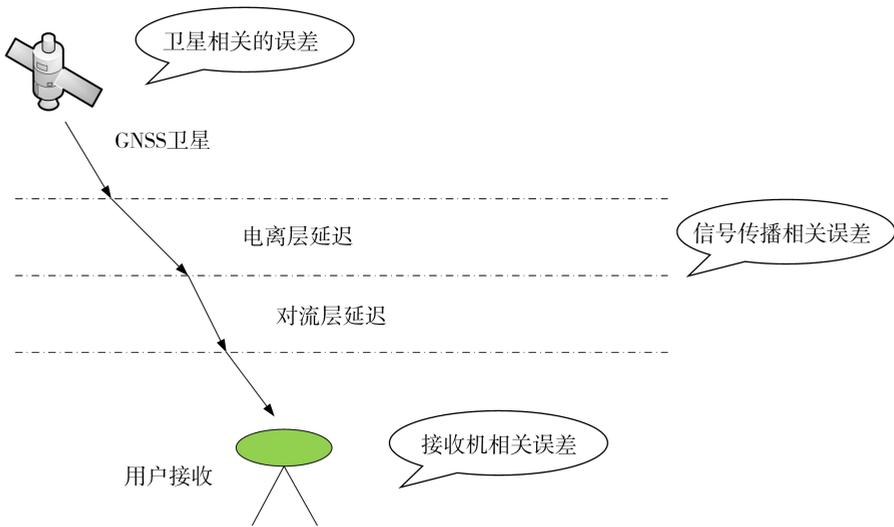


图2 GNSS 单向授时过程误差图示

为了测量或修正电离层延迟造成的误差,对于单频接收机用户,电离层数学建模是主要的方法,但对于现有的单频修正经验模型,一般在实时修正中最多也只能修正 70% 的电离层误差。因此在 GNSS 定位过程中,电离层延迟不仅是最主要的误差来源,也是限制单频卫星接收机精度的关键因素。要获取更高的定位和授时精度,常用的方法是使用双频或更多频进行自校正,消除电离层误差^[5-6]。

卫星发送的 GNSS 信号为多种频率波的叠加,其在电离层发生的折射用群折射率来表示,对于群折射率 n_g^k 公式有^[7-9]

$$n_g^k = 1 + X \frac{N_e}{f_k^2} + 2Y \frac{N_e H \cos \varphi}{f_k^3} + 3Z \frac{N_e^2}{f_k^4}, \quad (1)$$

式(1)中, X , Y , Z 为常数,分别为: $X = \frac{e^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 m}$, $Y = \frac{\mu_0 e^3}{16\pi^3 \varepsilon_0 m^2}$, $Z = \frac{e^4}{128\pi^4 \varepsilon_0^2 m^2}$ 。另外: n_g^k 为

相折射率; f_k 为载波频率; N_e 为电子密度; H 为磁场强度; φ 为地磁场与电磁波传播方向的夹角; e 为电荷量,取 $e = 1.6021 \times 10^{-19}$ C; ε_0 为真空中的介电常数,取 $\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ F/m; m 为电子质量,取 $m = 9.1096 \times 10^{-31}$ kg; μ_0 为真空中的导磁率,取 $\mu_0 = 12.57 \times 10^{-7}$ H/m。

若只考虑电离层延迟,卫星到接收机的伪随机码测量距离为 S_g^k , 几何距离为 S , 则电离层的伪码延迟 ΔS_g^k 为

$$\Delta S_g^k = S_g^k - S = \int n_g^k dS_g^k - \int dS. \quad (2)$$

若卫星观测的高度角大于 15° , 则电离层折射引起的路径弯曲效应会被极大削弱。如果只考虑传播效应,忽略弯曲效应,那么 $dS_g^k = dS$, 则电离层的伪码延迟 ΔS_g^k 为

$$\Delta S_g^k = \int (n_g^k - 1) dS = \int \left(X \frac{N_e}{f_k^2} + 2Y \frac{N_e H \cos \varphi}{f_k^3} + 3Z \frac{N_e^2}{f_k^4} \right) dS. \quad (3)$$

实验证明式(3)中一阶项造成的电离层折射误差为米级,而高阶项造成的电离层折射误差为分米

级及其以下, 由于 1 m 的误差反应到授时精度上为 3.3 ns, 因此这里只考虑一阶项^[10-11]。

忽略高阶项, 电离层一阶项的电离层折射误差为

$$\Delta S_g^k = \int \mathbf{X} \frac{N_e}{f_k^2} dS = \frac{\mathbf{X}}{f_k^2} \int N_e dS. \quad (4)$$

若 $N_{\text{TEC}} = \int N_e dS$ 代表沿电磁波传播路径的电子总量, 则在伪随机码测距中, 由群折射率 n_g^k 引起的电离层延迟为

$$\Delta S_g^k = \frac{\mathbf{X}}{f_k^2} N_{\text{TEC}}. \quad (5)$$

对于双频接收机来说, 可以通过 2 个频率产生的不同电离层延迟进行线性组合差分从而消除掉一阶项电离层折射误差。在伪随机码测距中, 对于频率为 f_1 和 f_2 两个不同的 GNSS 信号, 在只考虑电离层延迟条件下有:

$$\begin{cases} S_g^{1'} = S_g^1 + \Delta S_g^1 \\ S_g^{2'} = S_g^2 + \Delta S_g^2 \end{cases}, \quad (6)$$

式(6)中, $S_g^{1'}$ 和 $S_g^{2'}$ 分别为频率 f_1 和 f_2 下的卫星到接收机伪码测量距离; S_g^1 和 S_g^2 分别为频率 f_1 和 f_2 下的几何距离; ΔS_g^1 和 ΔS_g^2 分别为频率 f_1 和 f_2 下的电离层折射误差。

设双频接收机伪码测距组合观测值为 S' , 则线性组合方程如下:

$$S' = aS_g^{1'} + bS_g^{2'} = aS_g^1 + bS_g^2 + a\Delta S_g^1 + b\Delta S_g^2. \quad (7)$$

根据前述的群折射率引起的电离层延迟, 有:

$$\begin{cases} \Delta S_g^1 = \frac{\mathbf{X}}{f_1^2} N_{\text{TEC}}^1 \\ \Delta S_g^2 = \frac{\mathbf{X}}{f_2^2} N_{\text{TEC}}^2 \end{cases}. \quad (8)$$

由于频率 f_1 和 f_2 的信号在传播过程中有相同的几何路径, 所以

$$S_g^1 = S_g^2, \quad (9)$$

$$N_{\text{TEC}}^1 = N_{\text{TEC}}^2. \quad (10)$$

因此, 可知

$$\Delta S_g^2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta S_g^1. \quad (11)$$

最终线性组合方程变为

$$S' = (a+b)S_g^1 + \Delta S_g^1 \left(a + b \frac{f_1^2}{f_2^2} \right). \quad (12)$$

为了消除电离层折射延迟造成的误差项, 式(12)需满足以下条件:

$$\begin{cases} a + b \frac{f_1^2}{f_2^2} = 0 \\ a + b = 1 \end{cases}. \quad (13)$$

最终求得：

$$\begin{cases} a = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \\ b = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \end{cases} \quad (14)$$

经过双频电离层修正后伪码测距组合观测值为

$$S' = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} S_g^{2'} - \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} S_g^{1'} \quad (15)$$

由以上过程可知，双频接收机将不同频率经电离层的延迟差异进行线性组合，从而消除一阶项电离层折射误差，在理论上残余的电离层误差为高阶项折射延迟误差，数量级应在米级以下，在实际情况中，双频接收机相较于单频接收机极大地削弱了电离层折射延迟误差造成的影响，有助于提高授时精度（相较于单频单向授时优于 ± 100 ns 提高到了优于 ± 30 ns）。

2 卫星共视技术算法模型

单向授时是目前时间服务器进行授时的主用技术方案，其具有传递成本低的特点。然而随着 5G 技术和物联网的发展，单向授时的精度越来越难以满足超高精度的时间同步需求，因此迫切需要采用更高精度的时间同步方案。综合考虑到性能，价格以及可实现性等因素，卫星共视技术成为超高精度时间传递的新方案。

卫星共视技术是目前地球上远距离时间传递技术的主要方法之一，也是国际原子时合作的主要技术手段之一，其基本原理是指地球上任何两地的站点（本文中性能更优的站点视为参考的主站，较差的视为从站），在同一时刻接收同一颗导航卫星信号，可以消除掉两条传播路径上的共同误差，从而实现两地之间的时间比对，再将对比结果反馈完成两站的时间同步过程^[12-14]。图 3 为共视法基本原理。

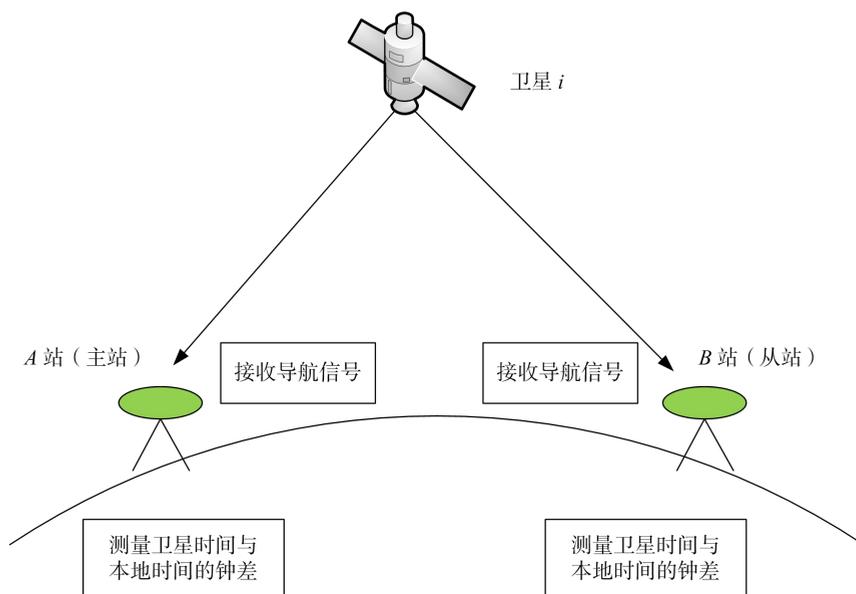


图 3 共视法基本原理

如图 3 所示, 地面上的 A 站和 B 站同时观测同一颗卫星 i , 卫星 i 在时刻 T_1 (以星载原子钟为参考) 发射伪随机码信号, 在发送这个信号瞬间, 地面 A 站接收机本地时刻为 t_1 (以本地钟为参考), 这两个时刻存在着一个固有偏差 Δt_{A-i} , 有

$$\Delta t_{A-i} = t_1 - T_1. \quad (16)$$

此伪随机码信号经传播由地面 A 站接收机在本地时刻 t_2 接收, 光速为 c , 根据此场景有

$$c \cdot (t_2 - T_1) = c \cdot (t_2 - t_1) + c \cdot \Delta t_{A-i}, \quad (17)$$

式 (17) 中, $c \cdot (t_2 - T_1)$ 为伪随机码测距值, 简称为伪距, 用 S'_A 来表示, $c \cdot (t_2 - t_1)$ 为伪码信号传播长度, 包含卫星到接收机的几何距离 S_A 及传播过程中的延迟, 如电离层延迟 $\varepsilon_A^{\text{ion}}$, 对流层延迟 $\varepsilon_A^{\text{trop}}$ 和其他延迟 $\varepsilon_A^{\text{other}}$, 即

$$c \cdot (t_2 - t_1) = S_A + \varepsilon_A^{\text{ion}} + \varepsilon_A^{\text{trop}} + \varepsilon_A^{\text{other}}. \quad (18)$$

若卫星 i 的星载原子钟相对于标准 GNSS 时间的时间偏差为 $\Delta t_{i-\text{GNSSST}}$ (即卫星钟差), 地面 A 本地钟相对于标准 GNSS 时间的时间偏差为 $\Delta t_{A-\text{GNSSST}}$ (即 A 的本地钟差), 那么

$$\Delta t_{A-i} = \Delta t_{A-\text{GNSSST}} - \Delta t_{i-\text{GNSSST}}. \quad (19)$$

则最终可以获得伪随机码测距公式为

$$S'_A = S_A + \varepsilon_A^{\text{ion}} + \varepsilon_A^{\text{trop}} + \varepsilon_A^{\text{other}} + c \cdot (\Delta t_{A-\text{GNSSST}} - \Delta t_{i-\text{GNSSST}}), \quad (20)$$

整理后为

$$c \cdot \Delta t_{A-\text{GNSSST}} = S'_A - S_A + c \cdot \Delta t_{i-\text{GNSSST}} - \varepsilon_A^{\text{ion}} - \varepsilon_A^{\text{trop}} - \varepsilon_A^{\text{other}}. \quad (21)$$

同理对于站点 B 可得

$$c \cdot \Delta t_{B-\text{GNSSST}} = S'_B - S_B + c \cdot \Delta t_{i-\text{GNSSST}} - \varepsilon_B^{\text{ion}} - \varepsilon_B^{\text{trop}} - \varepsilon_B^{\text{other}}. \quad (22)$$

将式 (21) 和 (22) 作差, 得到共视比对公式:

$$c \cdot \Delta t_{AB} = (S'_A - S'_B) - (S_A - S_B) - (\varepsilon_A^{\text{ion}} - \varepsilon_B^{\text{ion}}) - (\varepsilon_A^{\text{trop}} - \varepsilon_B^{\text{trop}}) - (\varepsilon_A^{\text{other}} - \varepsilon_B^{\text{other}}), \quad (23)$$

式 (23) 中:

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{A-\text{GNSSST}} - \Delta t_{B-\text{GNSSST}}. \quad (24)$$

电离层延迟是卫星授时路径误差的主要来源, 所以在里主要分析卫星共视中电离层延迟的影响, 以和双频消除电离层延迟误差结果进行对比。

对于伪码观测量, 卫星 i 信号在到站 A 和站 B 传播过程中电离层折射延迟误差分别为 $\varepsilon_A^{\text{ion}}$ 和 $\varepsilon_B^{\text{ion}}$, 根据双频原理中群折射引起的电离层延迟公式, 可知^[15]:

$$\begin{cases} \varepsilon_A^{\text{ion}} = \frac{X}{f^2} N_{\text{TEC}}^A \\ \varepsilon_B^{\text{ion}} = \frac{X}{f^2} N_{\text{TEC}}^B \end{cases}. \quad (25)$$

球谐函数模型 (SPHA) 假设电离层为一薄层, 所有的自由电子都分布在该薄层上, 该层到地面高

$$\frac{1}{\sin \angle iAO} - \frac{1}{\sin \angle iBO} < \frac{L_{AB}}{L_{iO}} \quad (31)$$

最终卫星共视中电离层延迟应满足:

$$\varepsilon_A^{\text{ion}} - \varepsilon_B^{\text{ion}} < \frac{L_{AB}}{L_{iO}} \cdot \frac{X}{f^2} \cdot N_{\text{VTEC}} \quad (32)$$

通过上述推导,可见电离层的延迟误差与卫星共视两站之间的距离 L_{AB} 以及卫星 i 到 AB 直线的垂线 L_{iO} 相关^[19-20]。

以卫星仰角为 20° 为例,若仍假设 L_{AB} 为 100 km,则

$$L_{iO} = L_{iA} \cdot \sin \angle iAO = L_{iA} \cdot \sin(\angle iAD + \angle DAO) \quad (33)$$

由弦切角定理可知,

$$L_{iO} = L_{iA} \cdot \sin(\angle iAD + \frac{1}{2} \angle ACB), \quad (34)$$

在某些 GNSS 系统中,设卫星轨道高度约为 20 200 km,此距离亦为卫星到地面站点的最短距离,因此

$$L_{iO} \geq 20\,200 \cdot \sin(20^\circ + 0.45^\circ) = 7\,057 \quad (35)$$

根据式 (32) 可知在此条件下最终卫星共视将电离层延迟造成的误差由原有的 5~150 m 至少缩小到了 7 cm~2.12 m 之间,并且可以进一步选取更合适的卫星仰角,其对电离层误差的影响甚至可以做到近似双频修正的效果。

综上所述,在 100 km 距离范围内,卫星共视技术相较于双频电离层改正可以达到类似的结果,同时根据共视比对原理可知,卫星共视还可以消除卫星钟差和部分星历误差的影响^[10]。此外,卫星共视的设备时延校准只需要主、从两站间的相对校准,比单向授时需要绝对校准更容易实现^[11]。

双频单向授时相较单频接收机来说,其主要优势是通过双频能更准确地修正电离层延迟。通过上述对比分析可知,基于单频接收机的卫星共视技术在主从两站距离及仰角合适的情况下,共视站点间的时间精度可以达到近似于双频接收机的效果。因此在实现更高精度的时间组网中,完全可以采用基于单频接收机的卫星共视从站作为时间源,通过多级级联整个城市提供高精度时间,缩小了网络规模,增加了网络的灵活度和健壮性,并且使用单频接收机替换双频接收机能显著地降低设备成本。

3 实验数据结果及分析

双频单向授时采用诺瓦泰双频接收机,将接收机天线安装在实验室天台,确保卫星高度角 5° 以上无高大建筑物遮挡。使用国家授时中心产生的国家标准时间 UTC (NTSC) 主钟信号为测试用时间参考,为降低主钟信号经长距离 (400 m) 传输引入的噪声干扰,在实验室使用相位微调器对主钟信号进行再生,使输出信号保持与 UTC (NTSC) 同步 (两者之间的偏差小于 2 ns),相位微调器输出的 10 MHz 信号为时间间隔计数器提供参考时钟,将接收机输出的 1 PPS 接入时间间隔计数器的另一个通道,时间间隔计数器每秒测量一次接收机信号与 UTC (NTSC) 的时间偏差,使用工控机采集并保存数据,场景测试时间为 48 h,测试环境为实验室室温环境。测试结构如图 5 所示^[21-23]。

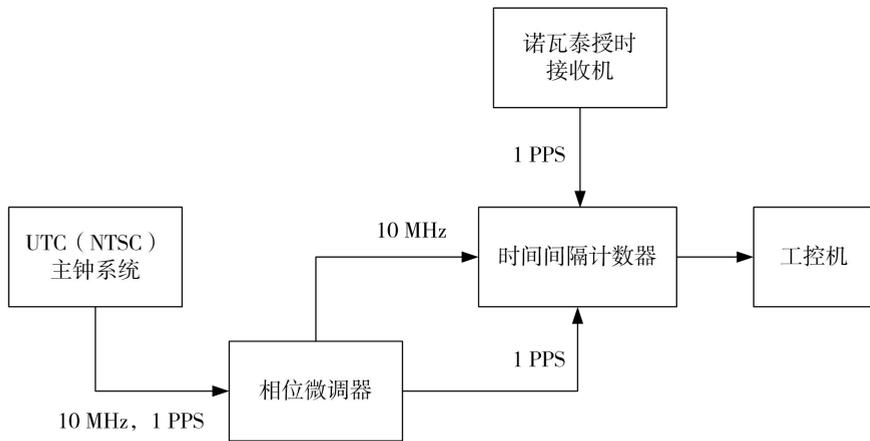


图 5 双频单向授时时间偏差测试结构示意图

双频接收机单向授时测试结果如图 6 所示，测试时间为 20170119T16:41:16/20170121T16:02:41，双频接收机时间相对于标准 UTC 时间的偏差波动范围为 332~371 ns，这个比对数据包含了天线，线缆及接收机本身造成的时延共约 350 ns，在补偿了这部分值后，双频接收机单向授时过程造成的时间偏差范围为 -18~21 ns，峰峰值为 39 ns。

卫星共视授时测试的主站以 UTC (NTSC) 主钟信号为参考，工作地点在国家授时中心的西安航天产业基地试验场，被测的从端分别是采用单频卫星接收机和双频卫星接收机的 UTC (NTSC) 时间复现终端，安装在西安临潼国家授时中心实验室，与主站所在地间的直线距离约 33 km，使用卫星高度角 20° 以上的可视卫星进行共视。因为主站参考是 UTC (NTSC) 主钟信号，为了测试主从站间的同步性能，在从站接以 UTC (NTSC) 主钟信号为参考对从站输出信号进行测试，主钟信号处理与双频接收机授时测试完全相同。基于单双频接收机共视的测试结构如图 7 所示^[24-26]，将复现终端输出的 1 PPS 接入时间间隔计数器的另一个通道，时间间隔计数器每秒测量一次复现终端与 UTC (NTSC) 的时间偏差，并使用工控机采集保存数据，场景测试时间为 24 h，测试环境为实验室室温环境。

卫星共视单频复现终端测试结果如图 8 所示，测试时间为 20180102T18:14:19/20180103T18:44:46，事先已经测得复现终端设备延迟（由于复现终端内部硬件对信号传输、处理造成的延迟的总和）约为 163 ns，并在测试前进行了补偿。从图 8 可见卫星共视单频的时间偏移约在 -11~11 ns 范围内波动，峰峰值约为 22 ns。

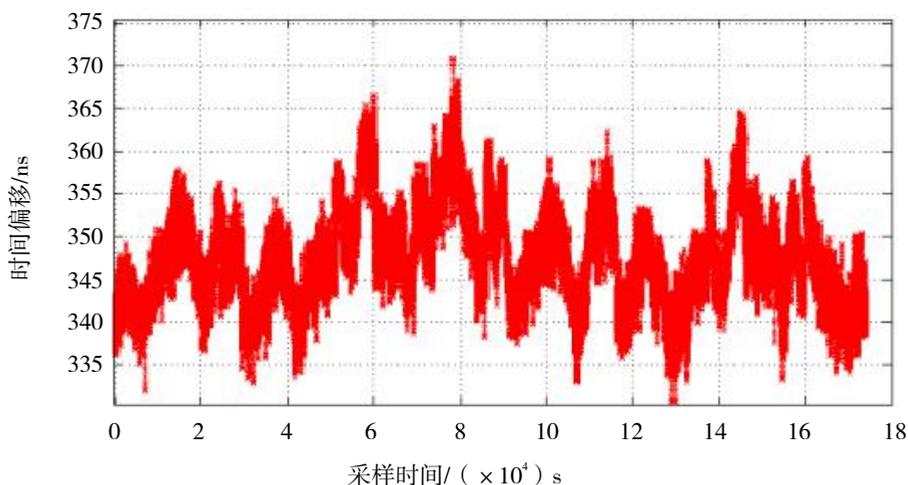


图 6 双频接收机单向授时时间偏移

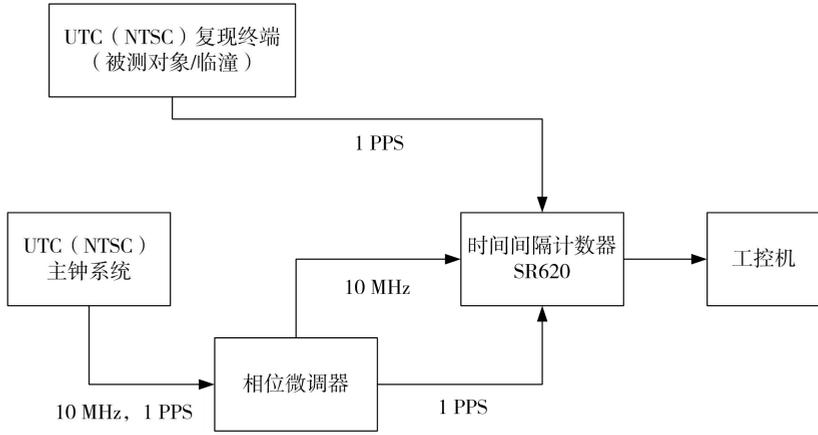


图 7 基于单双频接收机共视的测试结构示意图

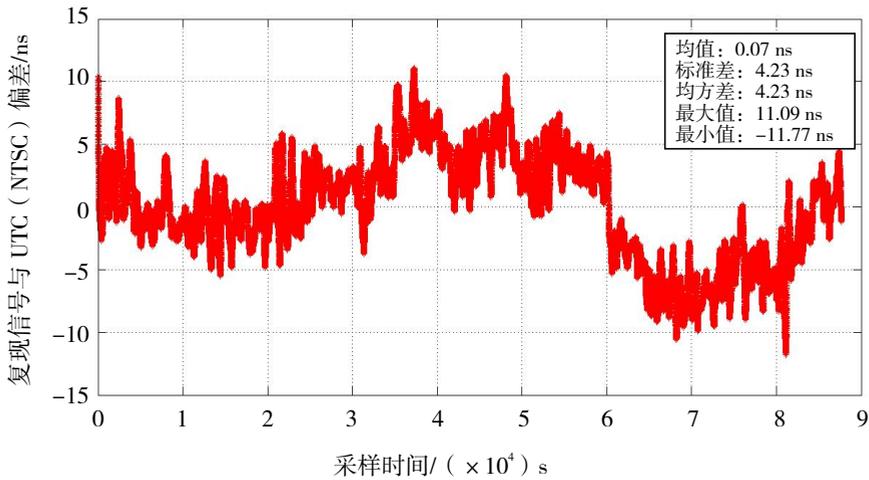


图 8 单频卫星共视时间偏移

卫星共视双频复现终端测试结果如图 9 所示，测试时间为 20180106T23:43:26/20180108T08:38:25，事先已经测得复现终端设备延迟（由于复现终端内部硬件对信号传输、处理造成的延迟的总和）约为 187 ns，并在测试前进行了补偿。从图 9 可见卫星共视双频的时间偏移约在 -8~7 ns 范围内波动，峰峰值约为 15 ns。

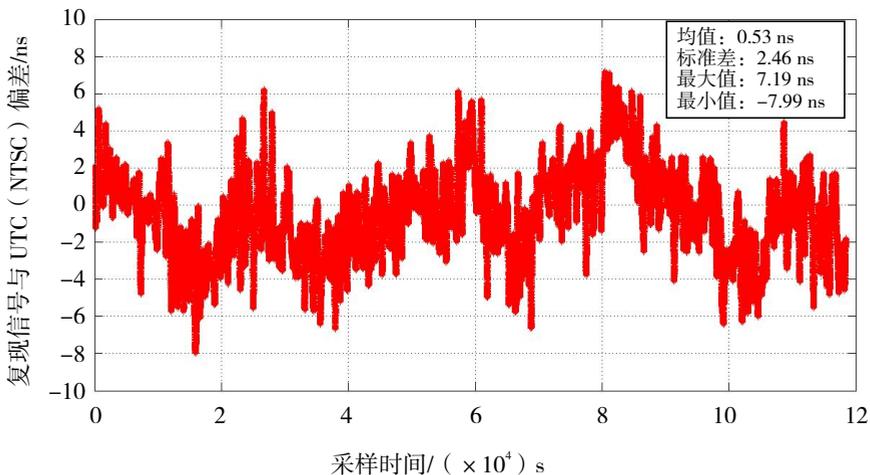


图 9 双频卫星共视时间偏移

对比双频单向授时的时间偏移数据和单双频卫星共视的时间偏移数据,三者皆满足 ITU-T 对 ePRTC 的性能要求,相对标准 UTC 时间的偏差皆在 ± 30 ns 以内。对比图 6 与图 8,相较于双频单向授时,单频卫星共视的时间偏移相对较小,峰峰值也从 39 ns 下降到 22 ns,原因在于卫星共视不仅在此实验条件下对电离层误差做到了与双频修正相似的效果,以及卫星共视技术还能消除卫星钟等共有误差。对比图 8 与图 9,可以看出虽然单频共视的时间波动范围仍然大于采用了双频接收机的卫星共视,可见复合两种技术手段的双频共视在处理电离层误差上还是略优于仅使用单频共视技术。单频卫星共视的时间偏移的标准差接近双频共视的 1.7 倍,即相对双频卫星共视,单频卫星共视的时间偏移波动更加不稳定,这是因为单频卫星共视对卫星仰角的要求更加苛刻,为了满足高度角条件,导致可用卫星数量减少,从而使得测试数据的标准差变大。

实验验证了在满足共视主从站间距离、观测高度角等条件下,采用单频接收机的卫星共视完全能做到优于双频单向授时精度并且近似于双频卫星共视结果,说明了在未来时间组网对时间精度更高要求下,单频接收机用于卫星共视从站完全可以满足其要求,并且双频接收机的价格一般比单频接收机价格高出约 2 个数量级,采用单频卫星共视也能极大地减少组网成本,但也由于条件限制,导致可能出现可用卫星变少数据不足的情况,针对此情况,在未来可以采取多模组合的方式来应对。

4 结语

随着 5G 技术的演进,不同业务对时间同步精度需求存在差异,而现网承载设备时间传递能力差异较大,不同厂家、不同设备形态设备时间传递能力不同,因此未来时间网的建设方式应当是分区灵活部署,避免对现有网络架构带来影响,这就对局部区域提出了更高时间精度要求,文章即论述了使用单频卫星共视从站,作为局部低成本的时间源,在满足距离、观测高度角合适等条件的前提下,提供优于双频单向授时并且近似于双频卫星共视的时间精度的方案。

参考文献:

- [1] ITU-T. ITU-T Recommendation G.8272, Timing characteristics of primary reference time clocks-amendment 1[S]. 2016.
- [2] ITU-T. ITU-T Recommendation G.8272.1, Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks-amendment 1[S]. 2017.
- [3] 杨腾飞,高法钦,李斯凡,等.基于双频数据组合的可见星电离层延迟研究[J].浙江理工大学学报,2016,35(2): 265-271.
- [4] 常志巧,胡小工,苏冉冉,等.区域卫星导航系统无电离层组合定位精度分析[J].测绘科学技术学报,2014,31(6): 556-560.
- [5] 管明雷,王英刚,徐威杰,等.GNSS 导航定位中电离层延迟改正方法[J].淮海工学院学报,2016,25(1): 56-60.
- [6] 管明雷,王英刚,徐威杰,等.常用电离层延迟改正模型的对比研究[J].现代测绘,2016,39(1): 4-6.
- [7] 余明,郭际明,过静珺.GPS 电离层延迟 Klobuchar 模型与双频数据解算值的比较与分析[J].测绘通报,2004(6): 5-8.
- [8] 韩雪峰,李建文,刘雪瑞,等.两种电离层延迟改正方法的对比研究[J].海洋测绘,2012,32(5): 7-10.
- [9] 韩勇,李庆波.电离层效应的测时误差及其修正[J].空间科学学报,2012,32(1): 55-59.
- [10] 赵彦珍,苏建峰.多频 GNSS 电离层折射误差修正方法[J].宇航计测技术,2016,36(1): 42-46.
- [11] 袁运斌,欧吉坤.基于 GPS 数据的电离层模型和电离层延迟改正新方法研究(英)[J].中国科学院大学学报,2002,

19(2): 209-214.

- [12] 朱张林, 高玉平, 王平利, 等. 基于网络的 GNSS 共视时间比对数据传输系统的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 13-20.
- [13] 温会锋, 张增强. 基于 3σ 法的卫星共视时间传递算法设计[J]. 航空计算技术, 2016(3): 98-100, 105.
- [14] 严建华. 应用北斗卫星共视技术实现长波导航系统时频同步方法研究[J]. 现代导航, 2013(2): 112-115.
- [15] 章红平, 平劲松, 朱文耀, 等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 16-26.
- [16] 何玉晶, 杨力. 基于球谐函数模型的 GPS 电离层延迟改正分析[J]. 测绘科学, 2010, 35(4): 74-75.
- [17] 张飞舟, 杨泽民, 程鹏, 等. GPS 与北斗电离层延迟误差对比分析[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(2): 270-274.
- [18] 梁寅, 王俊东, 王红咏. GPS 区域电离层建模与实验分析[J]. 铁道勘察, 2016, 42(3): 16-19.
- [19] 王楠, 张郁. 卫星高度角对 GPS 测量精度的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2012, 34(5): 562-564.
- [20] 和涛, 何美玲, 江南, 等. 卫星高度角对 GPS 单向时间传递性能的影响研究[J]. 宇航计测技术, 2014(4): 33-36.
- [21] 万超. 基于 GPS 的双频电离层修正算法研究[J]. 科技信息, 2010(21): 445-446.
- [22] 王先毅, 孙越强, 杜起飞, 等. 一种实时双频电离层修正方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(5): 992-995.
- [23] 王晓岚, 马冠一. 基于双频 GPS 观测的电离层 TEC 与硬件延迟反演方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(2): 168-179.
- [24] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 757-763.
- [25] 和涛, 张慧君, 李孝辉, 等. 基于 UTC (NTSC)的时间频率远程校准与溯源研究[J]. 电子测量技术, 2013(5): 15-20.
- [26] 李东新, 杨伟才, 常青, 等. 伪卫星共视法时间同步模型及其精度分析[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(4): 39-47.