基于通信卫星的共视授时方法

陈婧亚^{1,2,3}, 许龙霞^{1,2*}, 李孝辉^{1,2*}, 刘音华^{1,2}, 李丹丹^{1,2,3}, 朱峰^{1,2}, 孟令达^{1,2},
樊多盛^{1,3}, 李晓通^{1,2,3}, 于烨^{1,2,3}

1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049

* E-mail: xulongxia@ntsc.ac.cn; xiaohui@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2017-09-27; 接受日期: 2018-04-27; 网络版发表日期: 2019-02-25

国家自然科学基金(批准号: 11503030)和中国科学院国防创新基金(编号: CXJJ-16M205)资助项目

摘要 中国区域定位系统(CAPS)通过租用多颗GEO通信卫星上的转发器资源, 可在中国区域实现定位、授时和测速服务. 本文提出一种基于通信卫星的共视授时方法, 该方法利用CAPS系统的通信卫星以及测定轨站资源, 通过导航电文发播基准站授时偏差模型参数, 用户通过单向接收卫星信号结合从电文中解调计算得到授时偏差数据, 改正单向授时结果, 实现共视授时. 该方法精度优于5 ns, 是目前精度较高的实时授时方法. 用户只需单向接收CAPS授时信号, 不需要事后数据交换, 可以实时获得服务. 本文详细介绍了基于通信卫星的共视授时原理, 并搭建试验系统, 测试验证提出的CAPS共视授时性能. 西安-喀什、西安-三亚两长基线的试验结果表明CAPS单星共视授时精度优于GPS单星共视结果, CAPS共视授时可为用户提供优于5 ns的高精度授时服务.

关键词 中国区域定位系统(CAPS), 通信卫星, 授时偏差模型参数, 共视授时

1 引言

导航卫星授时法是目前应用最为广泛的高精度授时方法之一. 全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)单向授时是一种用户在位置坐标已知的情况下使用GNSS定时接收机接收卫星信号实现授时的方法. 美国GPS(Global Positioning System)作为目前发展最为成熟的GNSS系统之一, 单向授时精度通常为几十纳秒量级, 最高可达约15 ns^[1,2]. GPS共视法和卫星双向时间传递的方法可实现相距较远的两

地用户之间的高精度时间传递, 分别可以获得优于5和1 ns的时间传递精度, 可为少量用户提供服务, 但具有滞后性且成本较高^[3]. 我国的北斗卫星导航系统正处在飞速发展阶段, 目前已完成了北斗二代的系统建设. 北斗二代导航系统可以通过无线电卫星测定业务(RDSS)实现单向授时和无线电卫星导航服务(RNSS)实现单向、双向授时. RNSS单向授时精度约几十纳秒, RDSS单向授时精度在百纳秒量级, RDSS双向授时是北斗系统授时精度最高的方法, 授时精度约20 ns, 但该方法使用有源方式且用户容量有限^[4,5]. 所以, 如

引用格式: 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉, 等. 基于通信卫星的共视授时方法. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 543–551

Chen J Y, Xu L X, Li X H, et al. Method of common-view time transfer using communication satellites (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 543–551, doi: 10.1360/N092017-00337

何实现精度在纳秒量级且成本相对较低的授时成为众多学者的研究目标。

基于通信卫星的中国区域定位系统(Chinese Area Positioning System, CAPS)由艾国祥等人^[6-9]于2002年提出, 该系统通过租用多颗GEO通信卫星上的转发器资源, 可在中国区域实现三维被动定位、授时和测速服务(position, velocity and time, PVT)。多数通信卫星为地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星, 分布在赤道上空约36000 km的轨道。通信卫星发射成本高, 寿命通常只有十几年, CAPS通过租用商用通信卫星作为导航星座不仅节约了系统建设成本也将通信卫星资源进行充分利用。CAPS系统经过多年不断完善, 目前定位指标优于10 m, 单向授时精度优于10 ns。CAPS系统授时对用户容量不受限, 用户以主动接收卫星信号的方式可获得10 ns量级的授时服务。

基于CAPS系统, 本文提出一种基于通信卫星的共视授时方法, 该方法充分利用CAPS系统的GEO通信卫星以及测定轨资源, 使用卫星转发器转发地面中心站的授时偏差监测数据, 用户从电文中解调得到该数据, 改正单向定时结果, 实现与主站的实时共视。该方法在CAPS单向授时的基础上进行改进, 可为用户提供不确定度优于5 ns的授时服务, 是目前授时精度最高的实时单向授时方法。

2 通信卫星单向授时功能实现

基于通信卫星的CAPS系统在设计上具有自身的特点。首先, 卫星星座由4颗GEO通信卫星和1颗IGSO卫星组成^[10]。CAPS采用伪码测距的方式来进行定位和授时。卫星到用户伪距的精确测定直接影响定位授时精度, 通常GNSS卫星上搭载高精度原子钟作为时间频率信号参考, 而CAPS使用地面时间信号上行至

卫星, 经由卫星转发器发送给用户, 用户端测量的不是卫星到用户的伪距, 使用虚拟卫星原子钟技术对用户测量伪距进行修正以实现高精度授时^[11,12]。

2.1 虚拟卫星原子钟技术

众所周知每颗GNSS卫星至少要搭载两台以上的原子钟才能稳定可靠地为星上载荷提供时间频率信号。在CAPS系统中, 通信卫星上无高性能原子钟, 而是由地面主控站产生时间频率基准。主控站使用原子钟组保持CAPS系统时间, 且实时驾驭到我国标准时间UTC(NTSC), 仅使用星上转发器转发地面主控站的上行信号, 综合基带将测距码和导航电文调制到中频载波后再经射频发射通道上行至卫星转发器, 实现导航信号的广播。称之为虚拟卫星原子钟技术(简称虚拟钟), 其技术实现框图如图1所示^[12]。

将信号从CAPS主钟到卫星转发器出口之间的时延定义为虚拟钟改正量。主控站实时测定虚拟钟的值, 并在电文中广播虚拟钟改正量参数。对于CAPS用户可以测得从主控站原子钟经综合基带、发射通道、空间上行经卫星转发器到用户接收终端的伪距 ρ_0 。从 ρ_0 扣除广播电文中的虚拟钟改正量, 就可以获得导航信号从卫星转发器出口到用户的伪距 ρ :

$$\rho = \rho_0 - c \cdot \tau_{\text{clk}} \quad (1)$$

用户位置已知时, 通过接收单颗通信卫星转发的信号就可以获得用户本地时间与CAPS系统时间的偏差, 实现单向授时。

2.2 通信卫星单向授时过程及误差分析

以用户观测单颗卫星为例, 介绍CAPS的单向授时过程。用户接收单颗通信卫星转发的信号, 其伪距观测量满足:

图1 (网络版彩图)CAPS系统虚拟卫星原子钟的技术实现框图

$$\begin{aligned} \rho_u = & \sqrt{(x_0 - x_u)^2 + (y_0 - y_u)^2 + (z_0 - z_u)^2} \\ & + c \cdot (\delta t_u - \tau_{\text{clk}}) \\ & + \tau_u + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{tro}} + \varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 用户位置坐标为 (x_u, y_u, z_u) , 卫星位置坐标为 (x_0, y_0, z_0) , c 为光速, δt_u 表示接收机与CAPS系统时间(CAPST)的时间偏差, τ_{clk} 为虚拟钟改正量, τ_u 为接收机端时延, 包括接收机内部硬件时延和天线及电缆时延. τ_{ion} 为电离层时延, τ_{tro} 为对流层时延, ε 为其他随机误差影响. 从伪距观测量中扣除星地几何距离, 进行虚拟钟改正, 接收机端时延及Sagnac效应改正后有:

$$\begin{aligned} c \cdot \delta t_u = & \rho_u - \sqrt{(x_0 - x_u)^2 + (y_0 - y_u)^2 + (z_0 - z_u)^2} \\ & + c \cdot \tau_{\text{clk}} - \tau_u - \tau_{\text{sag}}. \end{aligned} \quad (3)$$

最终可获得用户本地与CAPST的时差, 实现单向授时.

从上述授时过程可见, 影响通信卫星单向授时的主要误差源虚拟钟误差、星历误差、信号传播路径上的误差包括电离层误差和对流层误差、接收机相关误差等4个部分, 详述如下.

(1) 虚拟钟误差

主要受虚拟钟测量误差与预报误差的影响, 虚拟钟的测量误差优于0.1 ns, 预报精度优于5 ns.

(2) 星历误差

通信卫星的三维定轨精度优于2 m, 其中影响授时结果的径向分量的误差优于0.6 m, 约合1.8 ns.

(3) 信号传播路径误差

电离层误差: 通信卫星下行信号频点为4 GHz, 电离层时延是GPS L1频点的1/7. 一般地, GPS L1频点垂直入射的电离层时延值最大为15 m, 因此, C波段通信卫星的电离层时延值约为2 m, 即6 ns.

对流层误差: 接收机采用霍普菲尔德模型计算对流层误差, 根据经验值对流层误差约0.3 ns.

(4) 接收机相关误差

接收机内部时延校准误差: 基于通信卫星地面转发信号的优势, 可以利用主控站高精度的物理参考信号实现对接收机端时延的精确校准, 校准精度主要受主控站保持的时间信号稳定性及接收机自身测量噪声的影响, 精度优于1 ns. 其他包括多路径效应, 接收机伪距测量噪声等约1.1 ns;

因此, 单向授时的精度约合为

$$\sigma \approx \sqrt{5^2 + 1.8^2 + 6^2 + 0.3^2 + 1.1^2 + 1^2} = 8.2 \text{ ns},$$

优于10 ns(1 σ).

3 基于通信卫星的共视授时原理

基于GNSS卫星共视的单向授时方法最先由许龙霞等人^[13~15]提出, 本文将该方法进行拓展, 应用于CAPS系统中, 搭建了CAPS共视授时系统. 系统主要包括共视主站(西安)和5个共视基准站(长春、三亚、喀什、昆明和西安). 5个基准站选在已有的CAPS测定轨站, 通过卫星双向时间比对法获得共视基准站与共视主站的站间钟差数据使各站时间同步(时间同步精度优于1 ns), 西安站同时为整个系统的数据处理中心. 该方法是基于共视时间传递法, 在介绍该方法的原理前首先对基于GNSS卫星的传统共视时间传递原理进行简单介绍.

3.1 GNSS共视时间传递原理

共视法最早由美国国家标准与技术研究院(NIST)在1978年第一颗GPS卫星发射之后不久就开始使用^[16]. NIST和其他一些国际计量机构可以提供基于共视法的校准服务^[17]. 以GPS卫星为例, 说明共视法的基本原理, 原理如图2所示.

位于地球上任意两个实验室的接收机A和B分别通过路径 d_{SA} 和 d_{SB} 同时接收GPS卫星S的信号可以获得卫星时间与用户本地时间的时差($S - \text{clock}_A$)和($S - \text{clock}_B$), 这个时差均包括来自卫星、信号传播路径和接收机端的各项误差, 之后A和B进行数据交换求差, 两条路径 d_{SA} 和 d_{SB} 上的误差将被部分抵消, 计算出A和B间的时差($\text{clock}_A - \text{clock}_B$), 这个结果包含($d_{\text{SA}} - d_{\text{SB}}$)剩余误差. 显然, 共视法中两地数据交换求差的处理可以完全消除星钟误差, 部分星历误差, 及对流层和电离层的时延误差. 缺点是事后数据处理使时间传递过程不具备实时性.

3.2 基于通信卫星的共视授时原理概述

基本原理如图3所示, 5个基准站利用高精度的CAPS共视接收机接收CAPS卫星的授时信号, 监测得到基准站本地时间与CAPST的时差^[18,19]. 将该数据发往西安数据处理中心, 处理中心汇总各基准站的数据及站间钟差数据, 计算生成授时偏差模型参数, 发送

图2 (网络版彩图)共视法时间传递原理图

图3 (网络版彩图)通信卫星共视授时原理图

给CAPS地面主控站, 插播在CAPS导航电文中, 向用户广播。

下面详细说明基于通信卫星的共视授时过程。用 ρ_x ($x=c, u, b$ 分别对应西安中心站、用户和其他共视基准站)表示信号从主控站原子钟经综合基带、发射通道、空间上行经卫星转发器到CAPS接收机的伪距, r_{ix} 表示卫星 i 到接收机终端的几何距离。 ε 为随机误差项, T_x 为各接收机的本地参考时间(其中 $x=CAPS, u, b$ 时分别表示地面主控站保持的CAPS系统时间、用户接收机参考时间和基准站接收机参考时间), CAPST表示通过接收空中信号得到的CAPS系统时间, τ_{sag} 为

Sagnac效应改正, τ_{vclk}^i 为卫星 i 对应的虚拟钟改正量, R_x 表示接收机时延。

放置于西安主站的CAPS监测接收机以西安主站的原子钟产生的标准时间信号为参考, 接收卫星信号得到单向授时结果可以表示为

$$\begin{aligned}\delta t_c &= T_{CAPS} - CAPST \\ &= \frac{1}{c}(\rho_c - r_{ic}) - R_c - \tau_{sag} - \tau_{vclk}^i - \varepsilon_c.\end{aligned}\quad (4)$$

西安主控站的监测接收机的单向授时结果, 若精确扣除了接收机及电缆等各项时延, 接收机输出的单向授时结果值在零值附近。将部分误差修正后的单向授时结果 δt_c 建模后生成授时模型参数注入导航电文中。

对于用户来说, 使用CAPS接收机以本地时间为参考接收卫星信号, 同样可以得到单向授时的结果:

$$\begin{aligned}\delta t_u &= T_u - CAPST \\ &= \frac{1}{c}(\rho_u - r_{iu}) - R_u - \tau_{sag} - \tau_{vclk}^i - \varepsilon_u.\end{aligned}\quad (5)$$

用户同时也可以从导航电文中的授时偏差模型参数推算出用户观测时刻的主站监测接收机的单向授时结果 $\delta t'_c$, 利用这个结果对用户的单向授时结果进行修正后可得:

$$\begin{aligned}\delta t_u - \delta t'_c &= T_u - CAPST - (T_{CAPS} - CAPST) \\ &= T_u - T_{CAPS} \\ &= \frac{1}{c}[(\rho_u - r_{iu}) - (\rho_c - r_{ic})] - (R_c - R_u) - \varepsilon.\end{aligned}\quad (6)$$

该修正用户单向授时结果的过程, 其实质上相当于用户与主站进行了共视比对。从式(6)可以看出用户的单向结果经过修正后抵消了大部分误差, 但是接收机的相对时延将作为系统误差影响用户的授时结果, 需要通过接收机相对校准方式计算出相对时延, 并在结果中予以扣除^[20]。

随着用户与主站距离的增加, 修正作用减弱, 对用户来说会直接影响授时精度, 针对这个问题, 可以通过增设共视基准站来解决。增设基准站也可以互相作为备份, 当个别站出现故障时, 其他基准站仍可为用户提供共视服务。共视基准站上长期运行的CAPS监测接收机接收卫星信号后得到单向授时结果:

$$\begin{aligned}\delta t_b &= T_b - CAPST \\ &= \frac{1}{c}(\rho_b - r_{ib}) \\ &\quad - R_b - \tau_{sag} - \tau_{vclk}^i - \varepsilon_b.\end{aligned}\quad (7)$$

各基准站本地时间 T_b 是由自由运行的原子钟提供的, 共视授时系统要求各基准站本地时间与西安主站的时间保持同步. 利用卫星双向比对链路的站间钟差数据 t_{tw} 实现同步, 同步不确定度优于1 ns.

$$\begin{aligned}\delta t_b + t_{tw} &= T_b - \text{CAPST} + t_{tw} \\ &= T_{\text{CAPST}} - \text{CAPST}.\end{aligned}\quad (8)$$

同样, 将经过部分误差和卫星双向站间钟差修正后得到的单向结果 $\delta t_b + t_{tw}$ 建模后生成授时模型参数注入导航电文中. 用户可以根据自己位置坐标选择使用距离自己最近的基准站的模型参数修正自己的单向授时结果. 并需要通过标定来扣除卫星双向比对链路与共视授时系统存在系统时延^[21].

可以看出, 只需通过单向接收就可以实时地实现与共视相当的授时, 解决了传统共视无法实时比对的问题. 因为通信卫星的轨道高度比GNSS卫星更高, 相同的卫星位置误差在相同基线下两站的相关性更强, 所以用通信卫星实现共视授时比用GNSS卫星更具优势.

3.3 误差分析

通过上文对通信卫星的共视授时方法原理介绍, 该方法消除了单向授时的多个误差项. 以下对单向授时中不能完全抵消的误差项做分析:

- (1) 虚拟钟误差: 0 ns;
- (2) 星历误差

星历误差对单向定时结果的影响为1.8 ns, 在共视授时方法中可以进一步降低其影响, 与用户到共视基准站间的距离有关: (用户与共视基准站距离/星地距离) $\times$ 星历误差 $=(3600/36000)\times 1\text{ m}=0.1\text{ m}$. 通过估计可知当用户与共视基准站的距离为3600 km时, 1 m的星历误差对共视授时的影响为0.3 ns;

(3) 电离层时延误差

电离层时延对单向授时结果的影响约为6 ns, 共视后可将授时结果的稳定性提高约25%^[20], 因此电离层时延误差对共视授时的影响约为3 ns;

对流层时延: 接收机使用霍普菲尔德模型根据经验值, 对流层误差约0.3 ns;

(4) 接收机相关误差

接收机内部时延校准误差: 精度优于1 ns; 其他包括多路径效应, 接收机伪距测量噪声等约1.1 ns;

因此, 单向授时的精度约合为

$$\sigma \approx \sqrt{0^2 + 0.3^2 + 3^2 + 0.3^2 + 1.1^2 + 1^2} = 3.4\text{ ns},$$

优于5 ns.

4 CAPS共视授时系统测试

4.1 试验系统搭建

为测试CAPS共视授时的性能, 在三亚和喀什试验点搭建了如图4所示的试验平台, 主要包括一台CAPS共视试验接收机, 运行共视授时试验软件的工控机. CAPS共视试验接收机将输出本地时间与CAPST的时

图4 (网络版彩图)共视授时试验原理图

差数据, 以及电文中播发的5个基准站的授时偏差模型参数数据发送给工控机, 工控机运行共视授时试验软件, 根据这两种数据实时计算出试验点的共视授时结果. 为评估CAPS共视授时结果, 以通过卫星双向比对方式获得的试验点与西安中心站的站间钟差数据作为参考. 为比对分析CAPS共视授时与GPS共视的结果, 试验软件同时接收GPS共视比对的结果, 同样地以卫星双向站间钟差数据评估GPS共视结果.

4.2 试验结果分析

4.2.1 单向授时试验结果分析

单向授时试验卫星利用CAPS中星10. 测试试验点为西安、喀什、三亚和长春. 测试时间段为2017年5月4日0:00到5月7日24:00. 各试验点接收机通过接收CAPS信号测量伪距, 从伪距中扣除几何路径、虚拟钟等各项时延改正后获得的本地参考钟与CAPS系统时间的时差值.

图5(a)~(d)分别是西安、喀什、三亚和长春4个试验点在测试时间段内单向授时结果. 该结果均是在假设CAPS接收机经过精确绝对校准, 扣除奇异值后得到的, 故试验点单向授时精度(RMS)均小于理论误差估计值. 与其他3个试验点不同, 西安单向授时结果稳定性非常好, RMS约0.4 ns. 原因是西安试验点的单向授时结果反映的是接收机接收导航信号恢复出的CAPST与西安站CAPS主钟所保持的系统时间的时差.

在扣除接收机端的时延后, 该值在零值附近变化. 此外, 西安单向授时结果有类似正弦的周期性变化, 这是残留的部分系统误差主要是星历误差导致. 其余3个试验点的单向授时结果呈现出不同周期的10 ns跳变现象, 这是由于3个试验点均使用未经驾驭的原子钟提供时频参考, 存在漂移现象, 而试验中使用的CAPS共视接收机的内部相位调整机制会监测到钟漂和系统误差的变化, 当误差累计达到10 ns时会进行移相调整, 所以接收机的单向授时结果会因为试验点使用原子钟钟漂速率的不同呈现不同周期的10 ns调整.

4.2.2 共视授时试验结果分析

共视授时试验分别基于CAPS中星10和中星12在西安-喀什、西安-三亚两条链路开展. 两条链路的基线长度分别约3000和1800 km. 在中星10观测时段同期开展了GPS单星(PRN=3, 22)共视比对试验, 测试时间段列于表1.

CAPS单星共视授时结果和GPS单星共视比对结果均以测定轨提供的卫星双向站间钟差数据(精度优于1 ns)作为参考. 分别统计两种试验结果相对于卫星双向站间钟差的RMS值, 见式(9), TR为试验结果, ref为对应的卫星双向站间钟差参考数据.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TR_i - ref_i)^2}{n-1}}. \quad (9)$$

图5 (网络版彩图)试验点基于CAPS中星10的单向授时结果. (a) 西安; (b) 喀什; (c) 三亚; (d) 长春

表 1 共视授时测试时间段

测试时间(年-月-日)	卫星	比对链路
2017-06-09~06-12	中星10	西安-喀什, 西安-三亚
2017-07-01~07-04	中星12	西安-喀什, 西安-三亚
2017-06-09~06-12	GPS-3	西安-喀什, 西安-三亚
2017-06-09~06-12	GPS-22	西安-喀什, 西安-三亚

试验结果如图6和7所示, 对试验结果的统计结果列于表2.

表2给出了西安-喀什、西安-三亚两条链路上基于CAPS中星12和中星10的共视授时评估结果, 以及GPS单星的共视比对评估结果. 从表2的授时结果统计值可以看出无论共视对象是中星10还是中星12, CAPS共视授时的结果均优于5 ns, 基于中星12的共视授时结果稍优于中星10. 这与中星12的预报轨道优于中星10的事实相符. 与GPS-3和GPS-22的单星共视比对的结果比较, CAPS单星共视授时结果精度更高. 特别是在西安-三亚链路上, CAPS单星共视授时结果比GPS单星共视比对的结果提高了1倍. 原因是GEO通信卫

星为“高轨”卫星, 而星历误差与星地几何距离有关, 距离越远, 星历误差越小, 因此在相同基线长度下, 使用通信卫星的星历误差更小; 此外, CAPS使用C波段下行频率约4 GHz, GPS为L波段频率约1.575 GHz, 故使用CAPS卫星时电离层时延也更小, 故CAPS单星共视相比GPS单星共视表现出优越性.

此外, 对比图6和7可以看出在使用GPS卫星时, 授时结果在30 ns左右的范围内变化. 由于GPS卫星是中低轨道的MEO卫星, 参与共视的两台接收机每天观测同颗卫星的可视时间有限最多6~8 h, 不能实现连续比对. 然而, 使用GEO卫星不存在这个问题. 使用GEO卫星不仅可以全天时连续比对, 还可实现比GPS单星共视比对精度更优的实时授时.

5 讨论与结论

本文提出的基于通信卫星的共视授时方法依托CAPS的系统资源, 改进了CAPS原有的单向授时功能. 对用户来说在不改变其单向接收卫星信号的前提下, 结合系统导航电文中插播的授时模型参数数据对单向

图 6 (网络版彩图)基于中星10和中星12的基线共视授时结果. (a) 中星10, 西安-喀什; (b) 中星10, 西安-三亚; (c) 中星12, 西安-喀什; (d) 中星12, 西安-三亚

图 7 (网络版彩图)基于GPS-3和GPS-22的基线共视授时结果

表 2 试验结果统计

卫星	西安-喀什			西安-三亚		
	最大值 (ns)	最小值 (ns)	RMS (ns)	最大值 (ns)	最小值 (ns)	RMS (ns)
中星10	13.3	-12.9	4.5	4.4	-11	3.7
中星12	5.35	-13	3.4	9.9	-11.4	3.5
GPS-3	7.7	-17.4	5.4	19.7	-12.2	7.3
GPS-22	13.7	-16.4	5.2	23.3	10.5	7.4

授时结果进行实时修正, 达到用户与基准站共视的目的. 在进行理论和误差分析后, 搭建了基于通信卫星的共视授时试验平台. 单向授时试验结果和长基线共

视授时试验结果表明: 使用共视授时方法可以在单星观测模式下将系统的授时精度从原来的10 ns提高至5 ns. 长基线共视授时结果优于GPS单星共视授时结果.

CAPS系统的共视授时服务是一种较为具有竞争力的纳秒级授时方法. 与现有的GNSS纳秒级共视时间传递和卫星双向时间同步手段相比, CAPS共视授时具有用户容量不受限, 良好的实时性, 接收终端简单且成本低等优点. 与我国北斗系统目前精度较高的RDSS双向授时方法相比, 本文方法用户无源且授时精度更高, 在提供系统的稳定性和可靠性同时, 可以考虑在相关行业开展推广应用.

参考文献

1 Lewandowski W, Petit G, Thomas C. Precision and accuracy of GPS time transfer. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1993, 42: 474-479

2 Lewandowski W, Thomas C. GPS time transfer. *Proc IEEE*, 1991, 79: 991-1000

3 Levine J. A review of time and frequency transfer methods. *Metrologia*, 2008, 45: S162-S174

4 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 72-81

5 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球PNT用户的贡献. *科学通报*, 2011, 53: 1734-1740

6 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 基于通信卫星的定位系统原理. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1615-1633

7 韩延本, 马利华, 乔琪源, 等. 退役GEO通信卫星对改善CAPS系统PDOP的作用. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1738-1749

8 艾国祥, 盛裴轩, 杜金林, 等. 应用于CAPS的气压测高虚拟星座. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1702-1710

9 施浒立, 艾国祥, 韩延本, 等. 退役卫星的多生命周期利用. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1731-1737

10 韩延本, 马利华, 乔琪源, 等. 中国区域卫星定位系统星座布局的选择. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1671-1686

11 卢晓春, 吴海涛, 边玉敬, 等. 中国区域定位系统信号体制. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1634-1647

12 李孝辉, 吴海涛, 边玉敬, 等. 内含伪距差分功能的虚拟卫星原子钟. *中国科学G辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 1723-1730

13 Xu L X, Li X H, Xue Y R, et al. Study of a new one-way timing method. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 2476-2481

14 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2012

15 Xu L, Zhu F, Chen J, et al. Accurate time transfer based on communication satellite. In: *Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*. IEEE, 2017. 690-692

16 Allan D W, Weiss M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. *Symposium on Frequency Control*.

Washington: IEEE, 2005:334–346

- 17 Davis J A, Shemar S L, Clarke J D. Results from the national physical laboratory GPS common-view time and frequency transfer service. In: Proceeding of the 2001 Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. 2002. 99–110
- 18 Lombardi M A, Zhang V S, Carvalho R J D. Long-baseline comparisons of the Brazilian National Time Scale to UTC (NIST) using near real-time and postprocessed solutions. In: Precise Time and Time Interval Meeting. 2007: 415–426
- 19 胡永辉, 华宇, 侯雷, 等. CAPS接收机的设计与实现. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1786–1801
- 20 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉. 一种共视接收机相对时延校准方法. 时间频率学报, 2017, 40: 19–26
- 21 许龙霞, 陈婧亚, 李丹丹. 一种卫星双向时频传递设备时延差的标定方法. 仪器仪表学报, 2016, 37: 2084–2090

Method of common-view time transfer using communication satellites

CHEN JingYa^{1,2,3}, XU LongXia^{1,2}, LI XiaoHui^{1,2}, LIU YinHua^{1,2}, LI DanDan^{1,2,3}, ZHU Feng^{1,2}, MENG LingDa^{1,2}, FAN DuoSheng^{1,3}, LI XiaoTong^{1,2,3} & YU Ye^{1,2,3}

¹ National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

² Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

³ School of Physics Sciences, University of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Chinese area position system (CAPS) can provide positioning, time and velocity service to China region users by renting several commercial communication satellites. We studied a real-time common-view time transfer method in this paper using communication satellites of CAPS. This method can fully use CAPS resources of the communication satellites and orbit determination stations to broadcast the information of timing bias mode parameters from the ground base stations. The timing bias data information can be demodulated and calculated by users from the navigation message by receiving the satellite signal in one-way, so the common-view time transfer process are implemented. This method can provide time service with the accuracy better than 5 ns, which is a kind of high accuracy time transfer method at present. Users can obtain this kind of time services in real-time and only need to receive CAPS time service signal in one-way reception way and without the process of past-data exchange. This paper provides detailed information on the principle of the common-view time transfer method based on communication satellites. Moreover, the experiment platform has been set up to test the performance of this new method. The long baseline experimental results of Xi'an-Kashi and Xi'an-Sanya indicated that the accuracy of CAPS single-satellite is better than that of GPS single-satellite common-view time transfer. The common-view time transfer based on communication satellite can provide time service to users with the accuracy better than 5 ns.

Chinese area position system (CAPS), communication satellite, timing bias model parameter, common-view time transfer

doi: [10.1360/N092017-00337](https://doi.org/10.1360/N092017-00337)