

基于 IGSO 卫星的多普勒定位单向授时方法研究*

沙海, 龚航, 占建伟, 张国柱, 欧钢

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对导航战、城市或者室内环境中, 可见卫星数目小于3颗, 用户位置未知时, 接收机无法完成授时等问题, 并结合我国已有卫星导航系统(北斗和CAPS系统)现状, 提出了一种基于IGSO卫星的多普勒定位单向授时方法。该方法通过测量卫星信号的多普勒频移, 采用积分多普勒计数计算用户位置, 完成单向授时功能。分析结果表明, 使用3颗IGSO卫星搭载透明转发器载荷, 可使我国领土范围内的定位授时可用性基本达到100%; 静态观测用户, 长期测量定位精度可达3m以内, 授时精度误差小于100ns。由于该方法最少只需观测1颗IGSO卫星信号, 这为导航战背景及微弱信号环境下的定位授时服务, 提供了新的解决方法。

关键词:卫星导航; 北斗一号; CAPS; 单向授时; 多普勒定位; 导航战

中图分类号: TN228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0075-06

Reserch of the doppler positioning timing method based on IGSO satellite

SHA Hai, GONG Hang, ZHAN Jianwei, ZHANG Guozhu, OU Gang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the condition of navigation war, civil or indoor environment, when the visible satellite number is less than 3 and users' position is unknown, one-way timing solution is no longer unavailable. Based on the characteristics of Chinese navigation satellite system such as COMPASS and CAPS, a doppler positioning timing method based on IGSO satellite is proposed. By measuring the doppler frequency shift and counting the integral Doppler, the user position and time are computed. Analysis result shows that the positing and timing usability can reach nearly 100% in Chinese domain when using 3 IGSO satellites with transponders. The position precision can achieve 3m and the timing error is less than 100ns for static users with long time measurement. Because only one IGSO satellite is needed and there is no requirement for demodulating navigation message, this method provides a novel timing method for the navigation war background and weak signal environment.

Key words: satellite navigation; COMPASS; CAPS; timing; doppler position; navigation war

随着通信和信息技术的发展, 大范围的时间同步需求越来越迫切。而卫星导航系统授时具有全覆盖、全天候、高精度等特点, 已广泛应用于我国各行各业。但是考虑到国防安全和经济稳定, 在关系到国计民生的重要基础网络中, 使用国外卫星导航系统的授时产品(如美国GPS授时接收机), 将存在重大安全隐患。特别是在未来导航战环境下, 国外卫星导航信号将无法使用, 我国卫星信号又会遭受强烈干扰。而在室内、城市等地区, 卫星信号会常常被建筑物、树木所遮挡。总之这些情况下, 接收机可见卫星数目将会减少, 卫星信号衰减严重。当可见卫星数目小于3颗, 用户位置未知的情况下, 已有接收机授时方法将无法完成授时功能。因此, 依靠我国自主研发的卫星导航系统, 研究复杂环境下的卫星导航系统授时

方法, 具有重要的经济价值和战略意义。

目前我国已经建成两套完整的、具有自主知识产权的区域卫星导航系统, 北斗一号卫星导航系统^[1]和CAPS(the Chinese Area Positioning System)卫星导航系统^[2], 这两套系统都属于转发式卫星导航系统, 即需要在卫星上搭载信号转发器, 卫星接收中心站发送的信号, 再转发给用户。其中北斗一号导航系统具有单向授时和双向授时两种授时方法^[1]。双向授时由于采用有源授时方法, 精度高, 但用户数目有限, 无法大规模推广; 单向授时为无源授时方法, 精度略低, 需在用户位置已知的条件下, 完成授时功能。

CAPS卫星导航系统由中国科学研究院研制, 采用租用商业通信卫星策略以降低成本, 主要应用于民用领域, 其定位授时原理与GPS系统相

* 收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 沙海(1984—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, E-mail: sandhai@163.com;

欧钢(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: ougang1969@163.com

似,也为单向授时。但由于租用的通信卫星均为 GEO 卫星,卫星定位时的 PDOP 值较大。实际应用中,CAPS 接收机需要外界提供高程辅助信息,以提高定位授时精度。

由此可见,我国现有的卫星导航系统授时产品存在着用户数量有限、授时精度不高以及需要外部辅助信息等不足。为了进一步改善系统精度,并满足南、北极科考活动等更广泛地区的定位授时需求,CAPS 系统已提出增加 IGSO 卫星转发器载荷的方案^[5]。由于 IGSO 卫星较 GEO 卫星,运动速度快,相对于静态用户会产生较大的多普勒效应,因此可以考虑采用多普勒定位的单向授时方法。

本文针对 CAPS 系统增加 IGSO 卫星转发器载荷为背景,提出了采用基于 IGSO 卫星的多普勒定位单向授时方法,由于该方法最少只需观测 1 颗 IGSO 卫星,解决了可见卫星数目小于 3 颗,用户位置未知条件下的接收机授时问题。

1 单向授时原理

在转发式卫星导航系统中,单向授时原理如图 1 所示。地面站产生导航电文,发送至卫星;卫星接收后再将信息转发至接收机。接收机通过接收导航电文及相关信息,由用户自主计算出钟差,并修正本地时间,使本地时间与卫星系统时间同步。

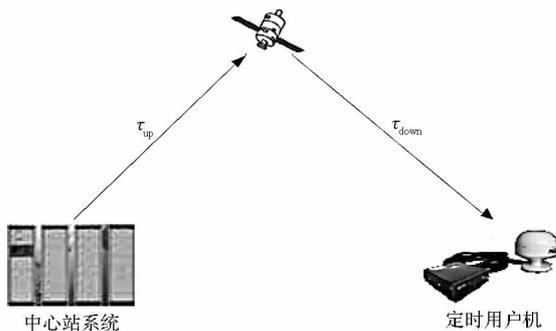


图 1 单向授时原理

Fig. 1 The unilaterality timing principles

单向授时的定时时序^[3]如图 2 所示,图中 t_{sys} 为地面中心站信号发送时刻, t_{rev0} 为对应的接收机时刻, t_{rev1} 为接收机信号接收时刻。对于接收机而言, t_{rev0} 、 t_{rev1} 已知,如果能够计算出信号总延时 τ_{delay} ,即可得到时间差 Δt_u ,实现时间同步。

$$\Delta t_u = \tau_{delay} - (\tau_{up} + \tau_{down} + \tau_{other}) \quad (1)$$

τ_{up} 为信号从地面站至卫星的延时; τ_{other} 为对流层、电离层等其他各种延迟; τ_{up} 和 τ_{other} 均可根据导航电文信息计算得到; τ_{down} 为信号从卫星到用户的延时。设卫星位置 (X_{sv}, Y_{sv}, Z_{sv}) ,用户位

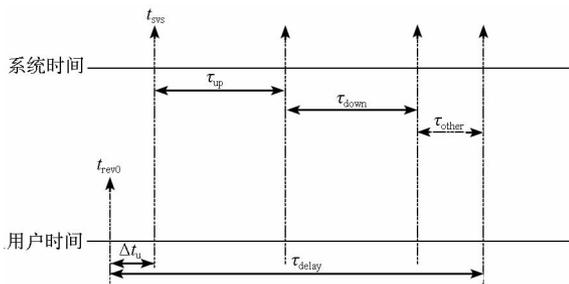


图 2 单向授时时序

Fig. 2 The unilaterality timing scheduling

置 (X_u, Y_u, Z_u) , 则

$$\tau_{down} = \sqrt{(X_u - X_{sv})^2 + (Y_u - Y_{sv})^2 + (Z_u - Z_{sv})^2} / c \quad (2)$$

由单向授时原理可知,用户位置精度是影响单向授时精度的重要因素。北斗系统授时过程中,用户需发送定位申请,由中心站完成位置解算,但用户数目受限;CAPS 系统授时过程中,则需要外部提供高程辅助信息,在至少观测 3 颗卫星的条件下才能求解用户位置,但系统 PDOP 值较大,影响计算精度^[2]。而采用多普勒定位的单向授时方法,最少只需观测 1 颗 IGSO 卫星,即可完成位置解算,且对于静态用户,长期观测情况下,定位精度可以达到很高。各系统单向授时原理如图 3 所示^[4-5]。

对于多普勒单向授时方法,首先通过观测至少 1 颗 IGSO 卫星的多普勒频移,计算用户位置。然后接收卫星转发的导航信号,捕获并解调导航电文,获取卫星轨道、误差修正模型参数、信号发送时刻等信息。最后,根据测量值,解算出钟差,完成授时功能。

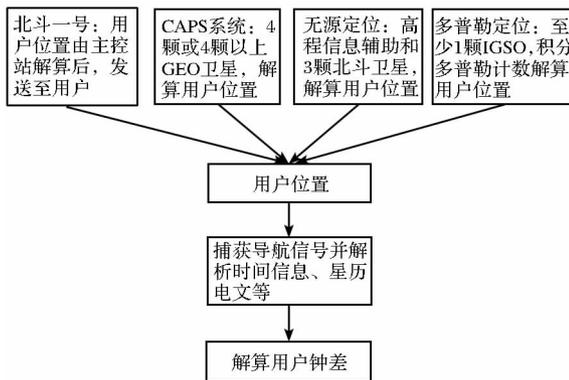


图 3 各系统单向授时方法流程图

Fig. 3 Flow chart: the unilaterality timing methods on all navigation systems

2 多普勒定位技术

卫星多普勒定位方法最早由美国科学家范奋巴赫(G. C. Weiffenbach)和高逸(W. H. Guier)在 1958 年提出^[6-8],后来美国海军采用该方法建立

了世界上第一个全球卫星导航系统——子午仪系统,后改称海军导航卫星系统。但随着 GPS 导航系统完全取代子午仪系统,多普勒定位方法的价值逐渐被人们忽视。

多普勒定位方法的原理如图 4 所示,波源为一颗在轨道运行的卫星,该卫星发射一种稳定的频率 f_s 。由于多普勒效应,在测站点 M 上接收到的频率为 f ,与卫星发射频率 f_s 之间的关系为

$$f = f_s \left[1 + \frac{1}{c} \frac{dS}{dt} \right]^{-1} \approx f_s \left[1 - \frac{1}{c} \frac{dS}{dt} \right] \quad (3)$$

为了精确地测量多普勒频率,通常在地面接收机内增加一个固定频率,即本振 f_k ,将接收到的频率与本振比较,即混频,得出差拍频率,最后用积分的方法导出多普勒频率并进行定位计算。因而多普勒定位方法又称为积分多普勒计数方法^[7]。

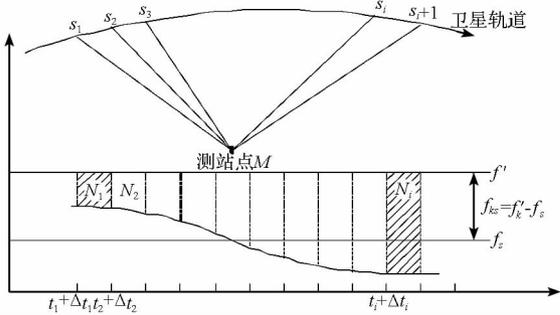


图 4 多普勒定位原理图

Fig. 4 Doppler position principles

图 4 中上面部分表示卫星沿其运行轨道,在相等时间段内的位置。卫星在时刻 t_i ,即在位置 S_i 时播发的信号,地面测站 M 要在 $t_i + \Delta t_i$ 时才能收到,其中 $\Delta t_i = S_i/c$,称之为传播延迟。在相邻两时刻卫星信号之间,地面接收机累计本振和接收频率间差频的差拍周期数 N_i ,通常称为多普勒计数,其计算公式为

$$N_i = \int_{t_i + \Delta t_i}^{t_{i+1} + \Delta t_{i+1}} (f_k - f) dt$$

$$= f_k (t_{i+1} - t_i) + f_k (\Delta t_{i+1} - \Delta t_i) - \int_{t_i + \Delta t_i}^{t_{i+1} + \Delta t_{i+1}} f dt \quad (4)$$

令 $f_k = f'_k + \Delta f_k$, Δf_k 称为接收机频偏改正数。若设波长为 $\lambda_k = c/f'_k$,等积分时间间隔为 $\tau = t_{i+1} - t_i$,本振与卫星频率之差 $f_{ks} = f'_k - f_s$,则卫星多普勒观测的基本公式为

$$S_{i+1} - S_i = \lambda_k (N_i - \tau f_{ks}) - \tau \lambda_k \Delta f_k$$

$$S_i = \sqrt{(x_s^i - x)^2 + (y_s^i - y)^2 + (z_s^i - z)^2} \quad (5)$$

由于任意时刻卫星位置可以根据卫星星历参数求得,而测站的位置 (x, y, z) 是未知的。将式

(5) 按泰勒级数展开至一次项得

$$\begin{bmatrix} \frac{x-x_2}{S_2} - \frac{x-x_1}{S_1} & \frac{y-y_2}{S_2} - \frac{y-y_1}{S_1} & \frac{z-z_2}{S_2} - \frac{z-z_1}{S_1} & \lambda_k \tau \\ \frac{x-x_3}{S_3} - \frac{x-x_2}{S_2} & \frac{y-y_3}{S_3} - \frac{y-y_2}{S_2} & \frac{z-z_3}{S_3} - \frac{z-z_2}{S_2} & \lambda_k \tau \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x-x_n}{S_n} - \frac{x-x_{n-1}}{S_{n-1}} & \frac{y-y_n}{S_n} - \frac{y-y_{n-1}}{S_{n-1}} & \frac{z-z_n}{S_n} - \frac{z-z_{n-1}}{S_{n-1}} & \lambda_k \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta f_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式即卫星多普勒观测的误差方程,方程中仅含 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 和 Δf_k 四个待定未知数。其中 $l_i = (\lambda_k N_i - \lambda_k \tau (f_k)) - (S_{i+1} - S_i)$ 。

观测一次卫星通过(即从地平上升起,经过最高点落入地平)时,在固定时间间隔积分下,可以列出多组误差方程,可按最小二乘法求出一组“残差平方和为最小”的测站坐标来。对于静态单点定位,当观测若干次卫星通过后,还可以使用“序贯平差法”求出所有通过次数的联合解。

下面将对基于 IGSO 卫星的多普勒定位单向授时方法的可用性、多普勒频移、精度等指标进行详细分析。

3 算法性能分析

3.1 可用性分析

子午仪系统被 GPS 全球定位系统所替代的主要原因就是子午仪系统的卫星不能连续地出现在某一地区上空,这样就无法进行全球性实时导航和定位服务。因此在使用 IGSO 卫星进行多普勒定位时,首先要对其服务可用性进行分析。

为了最大范围的覆盖我国国土面积,假定 IGEO 卫星数目为 3 颗,轨道面倾角都为 56° ,轨道半长轴为 42 000km,真近点角分别相差 120° ,升交点赤经分别为 $219.801^\circ, 99.9005^\circ, -20.298^\circ$ ^[5],分别选取北京、漠河、喀什、上海和三亚 5 座城市进行 IGSO 卫星可见性分析,这 5 座城市基本涵盖了我国陆地领土的边界。

当用户可视仰角为 5° 时,3 颗 IGSO 卫星的全球平均可见性如图 5 所示,IGSO 卫星的星下点轨迹如图 6 所示。

图 5 中,3 颗 IGSO 卫星的覆盖范围基本包括南、北两级、亚洲和太平洋地区。美国和南美洲大部分范围不可见。我国领土范围内,可见卫星数不少于 2 颗,其中南海、赤道附件可见卫星数为 3。

进一步对 5 座城市的 IGSO 卫星可视时间及可用性进行统计,结果如图 7、图 8 所示。

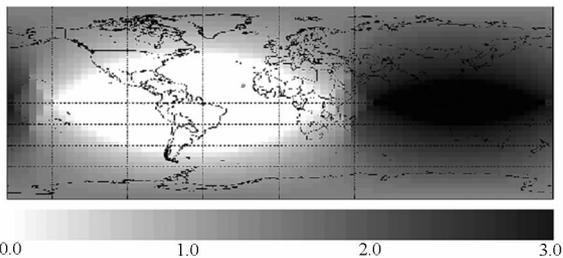


图 5 3 颗 IGSO 卫星全球平均可视性分析
Fig. 5 The global average visible satellite number

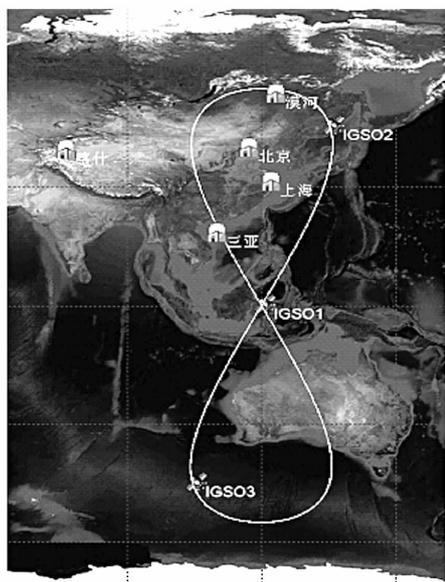


图 6 IGSO 卫星星下点轨迹
Fig. 6 IGSO satellites track

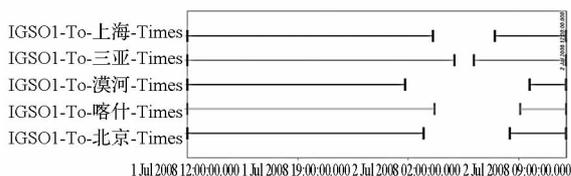


图 7 5 座城市 1 颗 IGSO 卫星可视时间
Fig. 7 1 IGSO satellite visible time

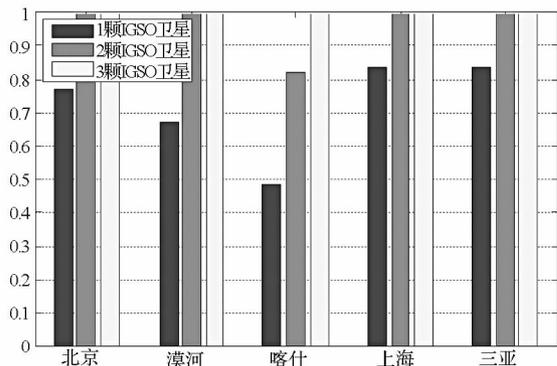


图 8 5 座城市可用性分析

Fig. 8 The usability analyse in the 5 cities

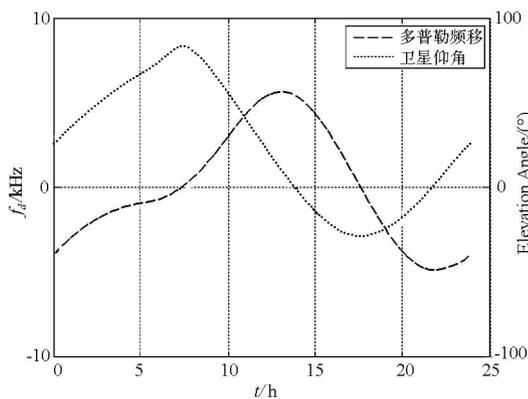
对 5 座城市的多普勒定位可用性分析显示, IGSO 卫星数目为 1 时, 平均可用性为 72.1%, 2

颗时可用性为 96.4%, 3 颗时可用性为 100%。由此可得, 使用 3 颗 IGSO 卫星搭载转发器载荷, 可使我国领土范围内的多普勒服务可用性基本达到 100%。同时在观测多颗 IGSO 卫星的地区, 可以选择观测条件好的卫星进行跟踪测量。

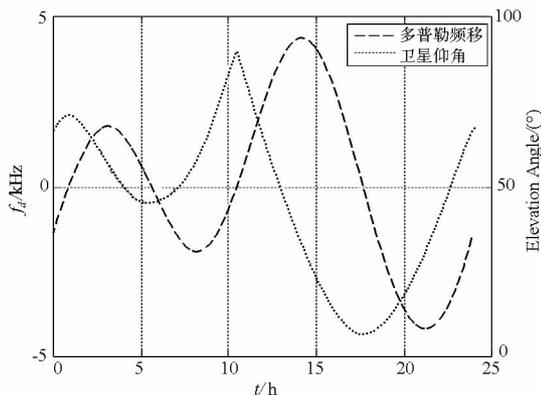
3.2 多普勒频移分析

采用多普勒法定位算法的接收机为解决多普勒频移在积分过程中正负相消的问题^[7-8], 被积量采用的不是真正的多普勒频移 f_d (信号接收频率 f 与发射频率 f_s 之差), 而是接收机本振基准频率 f_k 与信号接收频率 f 之差 ($f_k - f$), 且要求 f_k 与 f_s 之间的关系满足 $f_k - f_s \geq \max |f_d|$ 。因此, 在对 IGSO 卫星使用多普勒定位时, 首先需要对其产生的最大多普勒频移进行分析。

CAPS 系统中, 卫星 C 频段的发射载波频率分别为 C1: 3826.02MHz 和 C2: 4143.15MHz^[9]。为了评估 IGSO 卫星产生的最大多普勒频移, 仍选取北京、漠河、喀什、上海、三亚 5 座城市作为静态观测站, 分别计算 24h (IGSO 轨道周期) 内, IGSO 卫星仰角及多普勒频移的变化情况, 比较结果如图 9、表 1 所示。



(a) 漠河观测站



(b) 三亚观测站

图 9 IGSO 卫星 24h 径向速度和仰角变化示意图
Fig. 9 The radial velocity and elevation in the 24 hours

表 1 五座城市多普勒频移统计结果

Tab. 1 The statistic result of Doppler frequency shift

	北京	漠河	喀什	上海	三亚
最大径向速度 /(m/s)	387.03	410.28	329.40	369.85	315.39
最大仰角/(°)	89.96	82.99	59.57	83.42	89.95
C1 最大多普勒 频移/(kHz)	4.935	5.232	4.200	4.716	4.022
C2 最大多普勒 频移/(kHz)	5.345	5.666	4.549	5.107	4.355

由以上分析结果可以得出,对于 C1 发射频率,最大多普勒频移为 5.23kHz;对于 C2 发射频率,最大多普勒频移为 5.67kHz。而在子午仪系统中,400MHz 的发射频率对应的最大多普勒频移值约 9.6kHz,150MHz 的发射频率对应的最大多普勒频移约 3.6kHz^[7]。可见 CAPS 系统中 IGSO 卫星运动引起的多普勒频移量与子午仪系统相当。

另一方面,子午仪系统定位时,多普勒计数的时间标记为导航电文的帧同步头,在长多普勒计数时采用 2min,在短多普勒计数时采用 23s。而 CAPS 系统的导航电文也包括时间信息和同步信息,其同步信息的周期为 6s^[10]。因次,CAPS 系统的多普勒计数时间间隔可取 6s 或者 6s 的整数倍。

3.3 定位授时精度分析

由于子午仪系统目前已经停止服务,而 CAPS 系统又处于试验阶段,所以很难得到多普勒定位的实际观测数据,并对其测量精度进行分析。文献[7-8,11]对子午仪系统的定位和授时精度进行了详细研究和测试,测试结果显示对于静态单点位置,子午仪系统卫星通过 30~60 次后,定位

精度可达 3m;授时精度好于 100ns。文献[12]在 Argos 系统中,也采用多普勒定位方法计算海洋浮标的位置,通过算例仿真得出,不考虑信标运动及卫星轨道误差的情况下,利用高程约束条件定位精度可以达到米级。

而 CAPS 系统中,卫星 C 频段的发射载波频率分别为 3826.02MHz 和 4143.15MHz^[9],远远高于子午仪卫星及 Argos 卫星的发射载波频率。由式(3)可知,多普勒频移与卫星发射频率成正比。而 CAPS 卫星 C 频段 4143.15MHz 的发射频率是子午仪卫星 150MHz 发射频率的 27.6 倍,400MHz 发射频率的 10.3 倍,因而 CAPS 系统的多普勒频移测量灵敏度高于子午仪系统。

同时,电离层变化时会产生附加多普勒,从而影响多普勒测量精度,而电离层附加多普勒与载波频率成反比,因此 CAPS 卫星单频点多普勒频移测量值受电离层误差影响小于子午仪系统。

此外,子午仪系统的两次定位时间平均间隔为 50min 左右,平均定位时间只有 13min^[6],其多普勒计数次数一般为 8 次。而当 IGSO 卫星数目为 3 时,CAPS 系统在我国领土范围内的多普勒定位授时可用性可以达到 100%。显然,这将有利于充分利用接收信号中的多普勒信息,使测量噪声得到更有效的平滑,提高定位精度。

综上所述,从多普勒频移量、测量灵敏度、电离层误差影响,以及定位授时可用性等方面比较,基于 IGSO 卫星的多普勒定位授时精度应与子午仪系统相当。

3.4 与其他授时方法的比较

为了更全面的分析基于 IGSO 卫星的多普勒定位单向授时方法的性能,下面将对该方法与其他授时方法进行综合比较,比较结果如表 2 所示。

表 2 各种授时方法比较

Tab. 2 The compare with the timing methods

授时方法	最小 卫星数	用户 数目	定位精度 (静态)	授时精度 (静态)	适用 条件	使用 范围	辅助 信息
GPS 授时 ^[13]	4MEO	不限	20m	20ns	高动态	全球	不需要
北斗双向授时 ^[14]	2GEO	受限	10m	10ns	较高动态	中国及周边区域	不需要
北斗单向授时 ^[14]	2GEO	受限	30m	20ns	较高动态	中国及周边区域	需要高程数据
CAPS 授时 ^[2]	4GEO	不限	20m	—	高动态	中国及周边区域	不需要
无源定位单向授时 ^[5]	3GEO	不限	20m	100ns(高程误差 100m)	低动态	中国及周边区域	需要高程数据
多普勒定位单向授时	1IGSO	不限	3m (长期观测)	100ns (长期观测)	定点	中国及周边区域 (还包括两极)	不需要

4 结束语

基于 IGSO 卫星的多普勒定位单向授时方法最少只需观测 1 颗 IGSO 卫星,即可完成定位授时功能,解决了城市、室内和导航战场等可见卫星数目不足,用户位置未知条件下的授时问题。算法性能分析表明,使用 3 颗 IGSO 卫星搭载转发器载荷时,我国领土范围内的定位授时可用性基本可以达到 100%;最大多普勒频移可以达到 5.67kHz;其多普勒频移测量灵敏度高于子午仪系统 10 倍以上。因而对比得出,其定位授时精度应与子午仪系统相当,即静态用户长期测量时,定位精度可以达到 3m 以内,授时精度优于 100ns。

但是 IGSO 卫星多普勒计数的次数越多,定位授时的实时性越差,对用户动态的适应性也越差,故该系统较适合于定点用户的定位、授时。因此,在实际 CAPS 系统接收机应用中,可以考虑将多普勒定位方法和伪距解算方法组合起来使用,在不影响实时性的前提下提高定位的实时性和精度。

进一步对于我国通信、电力、银行、证券和广播电视等关系国计民生的基础行业及领域,其授时用户多数情况为静止的,故该方法具有较大的适用范围,有力地保证了我国重要行业的基础设施安全。

参考文献 (References)

- [1] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]第二版. 北京:国防工业出版社,2010.
TAN Shusen. The engineering of satellite navigation and positioning[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 艾国祥,施浒立,吴海涛,等. 基于通信卫星的定位系统原理[J]. 中国科学 G 辑:物理 力学 天文学,2008,38(12):1615-1633.
AI Guoxiang, SHI Huli, WU Haitao, et al. Position system based on communication satellite[J]. Science in China, J. Astron Astrophys, 2008, 38(12):1615-1633. (in Chinese)
- [3] 张立新,杨文强. 单向卫星授时体制及精度分析[J]. 空间电子技术,2001,3:1-3.
ZHANG Lixin, YANG Wenqiang. Architecture and precise analysis of satellite timing[J]. Space Electronic Technology, 2001,3:1-3. (in Chinese)
- [4] 张常云. 三星定位原理研究[J]. 航空学报,2001,22(2):175-176.
ZHANG Changyun. Approach to positioning with three geostationary satellites[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2001, 22(2):175-176. (in Chinese)
- [5] 单庆晓,唐洪,何琴. 北斗和 CAPS 系统中采用高程作为虚拟星座对授时精度的影响分析[J]. 宇航学报,2011,32(4):802-807.
SHAN Qingxiao, TANG Hong, HE Qin. Timing accuracy analysis of height used as virtual satellite in COMPASS and CAPS system[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4):802-807. (in Chinese)
- [6] Stansel T A, Jr. The actuality and future of the meridian system[J]. Navigation journal of the institute of navigation, 1978, 25(1).
- [7] 宋成骅,汪鸿生,谢世杰. 卫星多普勒定位测量[M]. 北京:测绘出版社,1987.
SONG Chengye, WANG Hongsheng, XIE Shijie. The satellite Doppler position measurement [M]. Beijing: Topography Mapping Press, 1987. (in Chinese)
- [8] 陈俊勇. 卫星多普勒定位[M],北京:测绘出版社,1983.
CHEN Junyong, The satellite Doppler position[M]. Beijing: Topography Mapping Press, 1983. (in Chinese)
- [9] Ai G x, Ma L, Ma G. Achieving centimeter ranging accuracy with triple-frequency signals in c-band satellite navigation system[J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation 2011,58(1):59-68.
- [10] 卢晓春,吴海涛,边玉敬,等. 中国区域定位系统信号体制[J]. 中国科学 G 辑:物理 力学 天文学,2008,38(12):1634-1647.
LU Xiaochun, WU Haitao, BIAN Yujing, et al. The signal architecture of China area position system [J]. Science in China, J. Astron Astrophys, 2008, 38(12):1634-1647. (in Chinese)
- [11] 蔡见祥,朱文耀,吴贤定,等. 子午仪卫星定时[J]. 中国科学院上海天文台年刊,1981,3:196-199.
CAI Jianxiang, ZHU Wenyao, WU Xianding, et al. Timing with transit satellite [J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1981, 3:196-199. (in Chinese)
- [12] 宋叶志,胡小工,黄勇,等. Argos 海洋浮标多普勒定位原理与方法[J]. 飞行器测控学报,2011,30(6):82-86.
SONG Yezhi, HU Xiaogong, HUANG Yong, et al. A method of satellite Doppler positioning of Argos system[J], Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(6):82-86. (in Chinese)
- [13] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
XIE Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [14] 潘峰,杜燕,何晓云,等. RDSS 导航试验星授时精度测试和评估[C]. 全国时间频率学术交流会,西安,2005.
PAN Feng, DU Yan, HU Xiaoyun, et al. Timming precise test and evaluation in the RDSS navigation test satellite[C]. National Time and Frequence Conference, Xi'an, 2005. (in Chinese)