

doi: 10.7690/bgzd.2014.06.012

基于 BD 导航卫星的空基伪卫星网络动态共视授时技术

史海青¹, 郁丰²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京 210016)

摘要: 为实现广域空基伪卫星网络的精确共视授时, 提出了网内传递共视授时方法; 为进一步削弱对流层延迟误差的影响, 提出了卫星共视选星策略; 通过分析 SIN/BD 组合导航系统定位误差的统计特性, 在揭示授时误差与组合导航系统定位误差之间数学关系的基础上, 又提出采用整网平均法用以减少动态平台定位误差的影响。仿真结果表明: 传递共视方法能很好地完成大区域网络的授时, 有选星策略比无选星策略的对流层延迟减少约 80%, 运用整网平均的方法能实现优于 0.3 ns 的高精度共视授时, 所提方法能够大幅度提高动态共视授时的精度。

关键词: 空基伪卫星网络; 传递共视授时; 共视选星; SIN/BD 组合导航; 整网平均

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

Dynamic Common-View Time Service of Wide Area Air-Borne Pseudo-Satellite Network Based on BD Navigation Satellite

Shi Haiqing¹, Yu Feng²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To achieve high precision time service of wide area pseudo-satellite network, this article proposed the method of transmission common-view time service inside the network, analyzed the errors of the process of common-view time service, put forward the method of satellite common-view selection in order to further reduced the effect of troposphere delay, after that analyzed the distribution of position error of the SIN/BD integrated navigation system, then raised the net average to eliminate the effect of position error, improved the precision of time service of pseudo-satellite network significantly. Simulation result showed that the method of transmission common-view can do a good job to finish the large-scale network time service; common-view selection reduced almost 80% of troposphere delay than none; and net average can achieve the service precision of common-view time less than 0.3 ns, the method that this article proposed can improve the precision of dynamic time service of pseudo-satellite network significantly.

Keywords: air-borne pseudo satellite network; transmission common-view time service; common-view satellite selection; SIN/BD integrated navigation; net average

0 引言

空基伪卫星网络^[1]能有效改善导航卫星导航定位的性能, 在军事等领域的应用越来越广泛。为使空基伪卫星增强网络更好地辅助 BD 导航卫星完成高精度的导航定位, 网络中各个伪卫星与地面控制站间高精度的时间同步技术显得尤为关键。

共视授时是在小范围内 2 个观测站同时跟踪同一颗星, 通过消除 2 条相近传播路径上的共同误差实现两站间时间高精度同步的技术方法。目前, 对伪卫星共视授时技术的研究多数停留在通过单颗卫星实现地面或空基静态的几个测站与地面控制站间的时间同步。如许国宏等^[2]利用一颗 GEO 卫星实现了地面静态 2 颗伪卫星 15 ns 精度的共视授时; 严建华等^[3]采用共视授时技术, 利用一颗北斗导航卫星实现了相距约 700 km 的 2 颗静态伪卫星 12 ns 精度的共视授时; 谭建华等^[4]利用单颗 GPS 卫星实现

了 2 颗相距 200 km 静态伪卫星 6~9 ns 精度的共视授时; 这些研究虽然实现了一定精度的授时, 但研究所用伪卫星及导航卫星不仅数量少、处于静止状态, 而且所用共视方法适用范围小、授时精度不高, 对多导航卫星条件下大区域动态载体高精度的授时无法实现。

笔者针对共视授时存在的问题, 先提出了一种广域动态伪卫星网络授时的网内传递共视授时方法, 又提出了共视选星策略; 然后对 SIN/BD 组合导航系统定位误差的统计特性进行了分析, 最后通过数学仿真验证了该方法的有效性。

1 广域网的传递共视授时

1.1 网内传递共视授时及卡尔曼滤波

共视授时是针对小区域服务的授时方法, 通过消除两观测站传播路径上的共同误差实现高精度的时间同步, 使信号传播误差、卫星轨道误差等得到

收稿日期: 2014-01-18; 修回日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61203197)

作者简介: 史海青(1987—), 男, 山东人, 硕士, 从事卫星导航、应用研究。

进一步削弱，能大幅度提高时间同步的性能。

对于大范围的空基增强网络，共视授时可能无法消除远距离观测站间传播路径上的共同误差，无法保证伪卫星与地面控制站间的时间同步精度；因此，笔者提出了网内传递共视授时方案：以离地面控制站最近的伪卫星作为第一个授时对象，完成其与地面控制站间的共视授时；把授时后的伪卫星当作下一步授时的基础，即把它看作地面控制站，再完成网络中离其最近伪卫星的共视授时；以此类推就可以实现广域空基伪卫星网络的共视授时，原理如图 1 所示。

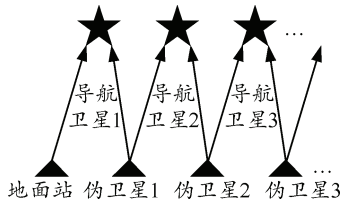


图 1 网内共视传递授时原理

根据共视传递授时方法，对广域空基伪卫星授时过程的传递观测方程进行推导。由于伪卫星在不断地运动，其位置可由惯性导航系统结算得到，那么根据图 1 导航卫星 i 至地面控制站或前一颗空基伪卫星的伪距

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + c(t_s - t_{r,i}) + c\delta t_{trop,i} + c\delta t_{tion,i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

导航卫星 i 至待授时空基伪卫星的伪距为

$$\rho_{i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - X)^2 + (y_{i+1} - Y)^2 + (z_{i+1} - Z)^2} + c(t_s - t_{r,i+1}) + c\delta t_{trop,i+1} + c\delta t_{tion,i+1} + \varepsilon_{i+1} \quad (2)$$

由式 (1)、式 (2) 可以得出一般情况下的共视授时观测方程：

$$\frac{\rho_i - \rho_{i+1}}{c} - \frac{(L_{s,i} - L_{s,i+1})}{c} = t_{r,i+1} - t_{r,i} + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{c} + (\delta t_{trop,i} - \delta t_{trop,i+1}) + (\delta t_{tion,i} - \delta t_{tion,i+1}) - \Delta t_i \quad (3)$$

该观测方程能够求解任意一颗伪卫星与地面控制站或任意 2 颗伪卫星的共视授时，但无法突出前一颗伪卫星与待授时伪卫星间的传递关系；因此，笔者将根据提出的传递共视方法对其进行改进。在计算过程中，由于无法得到前一颗伪卫星时钟的真值，只能用其估计值进行计算，因此推导了钟偏真值 $t_{r,i}$ 与估计值 $t_{g,i}$ 的关系：

$$t_{r,i} = t_{g,i} + \Delta t_i \quad (4)$$

为了得出后一颗伪卫星与前一颗伪卫星或地面站时钟估计值间的传递关系，结合式 (3)、式 (4) 推

导出网内传递共视授时的观测方程，为：

$$\frac{\rho_i - \rho_{i+1}}{c} - \frac{(L_{s,i} - L_{s,i+1})}{c} + t_{g,i} = t_{r,i+1} + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{c} + (\delta t_{trop,i} - \delta t_{trop,i+1}) + (\delta t_{tion,i} - \delta t_{tion,i+1}) - \Delta t_i \quad (5)$$

在共视传递观测方程中， Δt_i 为前一颗伪卫星的钟差，相当于授时协方差矩阵 P_i ，由此可见前一颗伪卫星的时钟钟差对当前伪卫星的时钟有影响； $t_{g,i}$ 为地面站或前一颗伪卫星钟估计值； x_i, y_i, z_i 表示地面站或前一颗伪卫星的位置 ($i=1 \dots n$)， $x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ 为待授时伪卫星的位置，由于伪卫星安装在无人机等动态平台上，所以坐标值可由 INS/BD 组合导航系统给出； X, Y, Z 表示导航卫星在地球坐标系下的三维坐标值； t_s 表示导航卫星的时钟差； ε 表示经过统一标定接收机的随机噪声； c 表示光速； $L_{s,i}$ 表示卫星至接收机的空间几何距离； δt_{trop} 为卫星信号至基站或伪卫星的对流层延迟； δt_{tion} 为卫星信号至基站或伪卫星的电离层延迟； $t_{r,i+1}$ 为待授时伪卫星钟模拟值，可由时钟系统状态模型求解得到。

目前星载时钟一般为性能优异的铯原子钟或铷原子钟，频率漂移非常缓慢，时钟系统的状态模型^[5-7]也比较成熟，笔者采用二维的线性系统来表示，状态方程为：

$$\dot{X}(t) = AX(t) + GW(t) \quad (6)$$

式中： $X(t) = [x_t \ x_f]^T$ ， $W(t) = [w_t \ w_f]^T$ ， x_t 、 x_f 分别表示卫星钟的相位误差、频率误差； w_t 、 w_f 分别表示卫星钟的相位噪声、频率噪声。

因为当前伪卫星的时钟数值受到前一颗伪卫星时钟钟差的影响，所以卡尔曼滤波过程中的观测噪声的协方差矩阵 R_k 变为：

$$R_k = R_k + \Delta t_i = R_k + P_i \quad (7)$$

根据式 (7) 及时钟状态方程，采用卡尔曼滤波技术^[8]即可求解当前伪卫星时钟的估计值。改进后的滤波原理如图 2 所示。

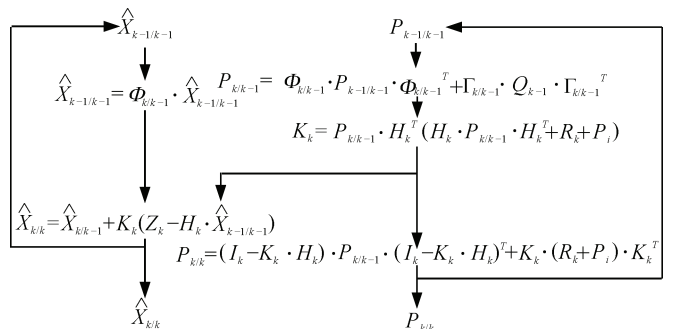


图 2 卡尔曼滤波原理

1.2 迟误差分析及共视选星策略

共视授时提高授时精度的关键在于消除共同误差，因此须对授时过程中的误差项进行分析。

在对流层延迟及其变化率的研究中发现，它们的大小与接收机相对于导航卫星高度角的大小有关，以一颗 BD 导航卫星为列，由霍普菲尔德 (Hopfield) 模型^[9]得出，伪卫星高度为 20 km，高度角不断变化时，对流层延迟的变化趋势如图 3 所示。

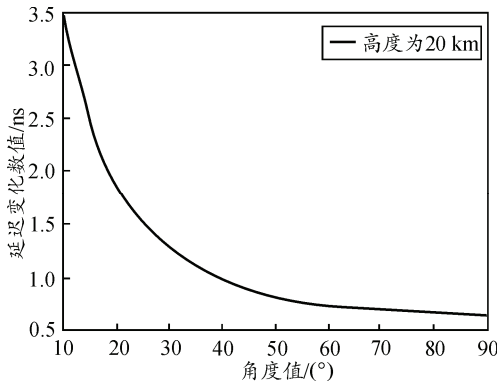


图 3 对流层延迟随高度角的变化

由图 3 能够看出：伪卫星高度一定时，对流层延迟及其变化率随其高度角的增大而减小，当高度角大于 40°时，对流层延迟小于 1 ns，随着高度角的进一步增加，对流程延迟变化率逐渐趋于 0。根据伪卫星高度角与对流层延迟及其变化率的关系，提出了共视选星策略。待授时的观测测站及基准站应尽量选取高度角均较大的卫星作为共视星，这样可以进一步减少对对流层延迟的影响，提高授时的精度。选星策略的具体过程为：首先，根据地面控制站、伪卫星及导航卫星的坐标计算地面控制站与伪卫星相对导航卫星的高度角；其次，比较每一次相应地面控制、伪卫星高度角的大小；最后，选出两者高度角都比较大的共视导航卫星作为共视星。

由于电离层延迟与信号的频率有关，因此可通过双频^[10-11]LC 线性组合对其进行消除，采用这种方式能够消除约 99.9%的电离层一阶项延迟误差，使得电离层延迟二阶项和三阶项的残差仅分别为 0~2 cm 及 0~2 mm。

2 钟差特性统计及位置误差消除方法

共视授时的精度虽然受到很多误差因素的影响，但定位误差是其中的主要因素，其大小直接影响授时精度的高低。为有效减小位置误差对授时精度的影响，笔者在推导了授时误差与组合导航系统定位误差之间数学关系的基础上，分析了空基组合

导航系统定位误差的统计特性，并针对这一特性，采用整网平均的方法对位置误差进行处理。

2.1 钟差与位置误差之间的关系

伪卫星设备由无人机等载体携带，伪卫星的位置只能由 INS/BD 组合导航系统导航解算的三维坐标 $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ 来表示，其与实际位置坐标的关系为

$$\begin{cases} x_i = \hat{x}_i + \delta_{x,i} \\ y_i = \hat{y}_i + \delta_{y,i} \\ z_i = \hat{z}_i + \delta_{z,i} \end{cases}$$

$\delta_{x,i}, \delta_{y,i}, \delta_{z,i}$ 为伪卫星 3 个轴向的位置误差，那么对几何距离进行线性化，线性化系数如下

$$\begin{cases} \frac{\partial L_{s,i}}{\partial x_i} = \frac{1}{\hat{L}_{s,i}}(\hat{x}_i - X) \\ \frac{\partial L_{s,i}}{\partial y_i} = \frac{1}{\hat{L}_{s,i}}(\hat{y}_i - Y) \\ \frac{\partial L_{s,i}}{\partial z_i} = \frac{1}{\hat{L}_{s,i}}(\hat{z}_i - Z) \end{cases}$$

式中， $\hat{L}_{s,i} = \sqrt{(\hat{x}_i - X)^2 + (\hat{y}_i - Y)^2 + (\hat{z}_i - Z)^2}$ 为 BD 卫星至伪卫星几何距离的解算值，那么位置误差 v_i 为

$$v_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{s,i}}{\partial x_i} & \frac{\partial L_{s,i}}{\partial y_i} & \frac{\partial L_{s,i}}{\partial z_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{x,i} \\ \delta_{y,i} \\ \delta_{z,i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由观测方程式 (4) 可以得到钟差 Δt_{i+1} 与位置误差之间的关系如下

$$\begin{aligned} \Delta t_{i+1} &= \frac{\hat{L}_{s,i} - L_{s,i} + L_{s,i+1} - \hat{L}_{s,i+1}}{c} + \Delta t_i = \\ & \frac{v_i - v_{i+1}}{c} + \Delta t_i + \omega_i \end{aligned} \quad (9)$$

式中， ω_i 为授时过程产生的残差项，包括 3 个部分：1) 经过共视选星后对流层延迟的残差；2) 电离层延迟通过双频 LC 线性组合后二阶项、三阶项的残差；3) 伪卫星接收机间的随机噪声差。定位误差大小直接影响授时精度的高低，是授时误差产生的主要因素之一，如果 INS/BD 组合导航系统位置误差精度约为 1.5 m，那么单个载体位置误差影响的时间偏差约为 5 ns。

2.2 钟差特性与消除方法

多套惯性导航系统定位误差的统计特性基本上服从正态分布^[12-13]，笔者认为这可根据概率论中的

中心极限定理来解释, 因为各个伪卫星平台上惯性导航系统的陀螺、加速度计等器件误差状态各不一样, 并相互独立, 而且各个惯性导航系统的初始对准误差也各不相同, 所以多套惯性导航系统定位误差在统计上逼近正态分布。

进一步, 伪卫星载体上一般采用 INS/BD 组合导航系统, 各个北斗接收机的定位误差各不相同, 用于信息融合的各个滤波器的状态也有所差异, 而且各个载体的定位误差对伪距测量的影响也不尽相同, 各个伪卫星设备上原子钟的误差特性也有差异, 用于授时计算的滤波器状态也不一样, 所以根据中心极限定理可以推断, 伪卫星网络各个节点的授时误差也将逼近正态分布。因此在传递共视授时的基础上, 提出采用整网平均的方法来提高授时精度。

空基网络各伪卫星钟差平均的表达式为:

$$E(\Delta t_{i+1}) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{i+1}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{r,i+1}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n t_{g,i+1}}{n} \approx 0$$

则有

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_{g,i+1}}{n} \approx \frac{\sum_{i=1}^n t_{r,i+1}}{n} = t_r \quad (10)$$

3 仿真与分析

3.1 仿真流程图设计

根据网内传递共视授时方法设计的空基伪卫星授时仿真流程如图 4 所示。

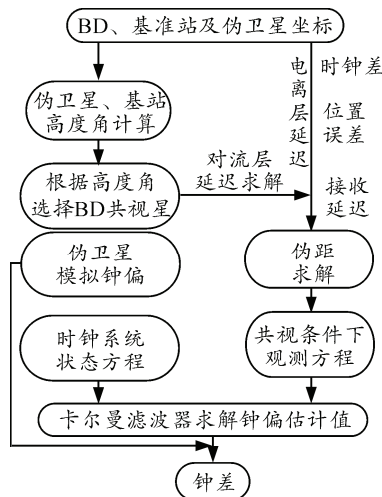


图 4 共视授时方案设计

具体步骤如下:

1) 首先根据北斗卫星、伪卫星及地面控制站(基准站)的经、纬度数值计算其在地球坐标系下的三维坐标。

2) 根据共视选星策略选择合适 BD 卫星作为共视卫星, 由步骤 1)得到的坐标值分别计算地面站、伪卫星共视于此北斗卫星的高度角, 此处共视选星的目的是降低对流层延迟误差。

3) 分别计算地面控制站、伪卫星与北斗卫星的空间几何距离及电离层、对流层延迟、伪卫星位置误差等, 进一步得到伪距方程。根据伪距方程推导出伪卫星与地面控制站间的共视观测方程。

4) 根据观测方程及时钟系统状态方程, 运用卡尔曼滤波技术得到地面控制站与离其最近空基伪卫星间的时间差, 完成该伪卫星与地面控制站间的共视时间同步。

5) 把授时后的伪卫星当作地面控制站重复前面四步, 就可以逐次实现广域空基网络所有伪卫星的共视授时。

3.2 结果分析

设地面控制站的时钟差为 0 ns, 距离地面的高度为 $h_0=2.5$ km; 位置为 $(32^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E})$, 接收机随机误差为 0.5 m (1σ) ; 信号传播速度 $c=3\times 10^8$ m/s。

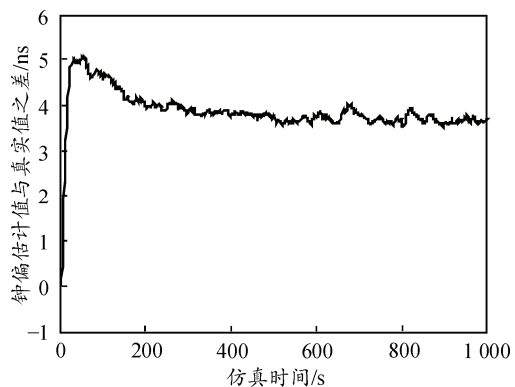
所用的 8 颗 BD 卫星: 3 颗分布在倾角为 55° , 交叉在 118° 的 IGSO 轨道上, 其余的 5 颗分别位于 58.75°E , 70°E , 110°E , 140°E , 160°E 的 GEO 轨道上。

星载时钟的初始相位误差及频率误差分别为 $x_i=1\times 10^{-15}$ ns, $x_f=2\times 10^{-12}$ Hz; 时钟的相位噪声及频率噪声为 $w_i=2\times 10^{-11}$ s (1σ) , $w_f=1\times 10^{-13}$ Hz (1σ) ; 仿真时间 5 h; 离散步长 $T=1$ s。

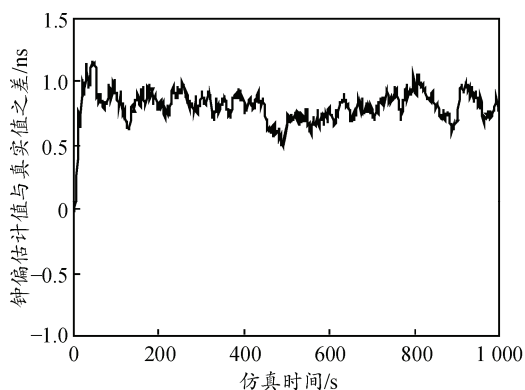
笔者选取了 13 颗空基伪卫星仿真说明, 相邻伪卫星的高度不同, 分别为 $h_1=17.18$ km 或 19.89 km; 在比较有、无选星策略对流层延迟的影响时, 以地面控制站与离其最近一颗伪卫星为例进行研究。

图 5(a)为无选星策略的对流层延迟影响伪卫星钟差的仿真图。该仿真过程单独研究了对流层延迟对伪卫星钟差的影响, 为有偏估计, 地面控制站与伪卫星对 BD 卫星的共视高度角分别为 11.77° 、 11.70° , 仿真 1 000 s 后对流层延迟影响的钟差偏离约为 3.5 ns, 因为仿真过程为有偏估计, 因此伪卫星钟差 X 轴较远, 误差较大。图 5(b)为有选星措施的对流层延迟影响伪卫星钟差的仿真图, 经选星后, 地面控制站与伪卫星共视于某一颗 BD 卫星的高度角分别为 84.55° 、 84.44° , 仿真相同时间后对流层延迟影响的钟差偏离约 0.7 ns, 比无选星措施

的 3.5 ns 减少了约 80%，同样道理，该仿真与图 5(a)一样属于有偏估计。由此可以看出有选星策略的授时能够大大削弱对流层延迟的影响，提高总体的授时精度。



(a) 无选星措施钟差仿真



(b) 有选星措施钟差仿真

图 5 有、无选星措施对流层延迟影响伪卫星钟差的仿真

表 1 为各伪卫星钟偏差估计最大值统计，伪卫星钟差估计为时钟模拟值与估计值的差值，从该图能看出，经过 5 h 后，伪卫星钟差估计的最大值约为 6 ns，由于各个伪卫星设备上原子钟的误差特性有所差异，因此最后的钟差大小也各不相同。授时过程中的电离层延迟经过双频 LC 线性组合后二阶项、三阶项的残差非常小，对流层延迟经选星后的影响不超过 1 ns 见图 5(b)，而在 INS/BD 组合导航系统定位误差的影响下，仿真 5 h 后伪卫星估计值误差达到 8 ns，见表 1 数据。由此可见，位置误差对授时的影响非常大。图 6 为频偏与其估计值差值仿真，该数值能够反映时钟频率偏移的大小，从此图能够看出，仿真 5 h 后，单颗伪卫星时钟频率偏差数值一直比较稳定，为在 0 处震荡的高斯噪声，

数值最大约为 0.006 ns，其他伪卫星频率偏差与其相似，这里不再一一给出。

表 1 各伪卫星钟偏差估计最大值统计

伪卫星	最大值/ns	伪卫星	最大值/ns
1	2.5	8	5.8
2	5.5	9	4.1
3	2.0	10	4.4
4	4.0	11	2.7
5	2.3	12	8.0
6	6.0	13	1.8
7	1.5		

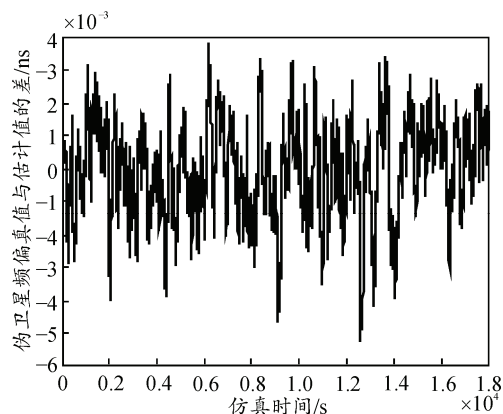


图 6 伪卫星频偏与其估计值差值仿真

图 7 为网络伪卫星钟差的均值，从图中能看到该数值在仿真 5 h 后，最大不超过 0.3 ns，也就是说经过整网平均后该网络 BD 共视授时精度优于 0.3 ns，折算成距离约为 0.09 m。钟差精度相对于表 1 无位置误差消除的 8 ns 提高了约 96%，该数值验证了笔者运用整网平均方法的可行性，而且该方法不仅能大大减少动态平台定位误差对授时过程的影响，还能削弱对流层延迟的残差、电离层延迟二阶项与三阶项的残差及伪卫星接收机间的随机噪声差等，显著提高了网络动态共视授时的精度，实现了广域空基网络整体精度高于 0.3 ns 的共视授时。

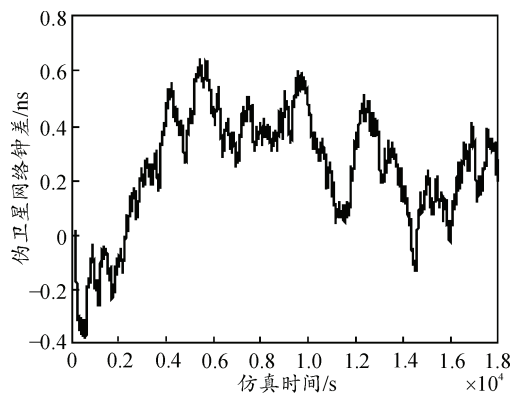


图 7 伪卫星网络钟差均值