

# 基于星历辅助的导航星座星间链路捕获初始信息求解算法\*

李献斌,王跃科,陈建云

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对星间链路信号动态范围大、捕获时间要求短之间的矛盾,提出了一种捕获初始信息的求解算法。该算法基于导航星座的星历资源和动态特性,采用迭代的方法对信号传输时延和多普勒频率进行估计。分析指出,该算法实现过程简单,收敛速度快,估计精度高,两次迭代即可实现时延估计精度达到纳秒级,大大降低了捕获实现的难度和复杂度,适合星上资源要求比较严格的场合。分析基于北斗导航星座模型展开,对我国北斗导航星间链路的设计提供了参考。

**关键词:**星间链路;星历辅助;捕获初始信息;迭代算法

**中图分类号:** V448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)02-0087-06

## A capture initial information solution method for ISLs of navigation constellation based on ephemeris-aided method

LI Xianbin, WANG Yueke, CHEN Jianyun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In view of the large dynamic and fast acquisition requirement of inter-satellite links (ISLs) signal, a capture initial information solution method is presented for ISLs of navigation constellation. This method evaluates time-delay and Doppler frequency based on ephemeris. The analysis shows that this method has a simple realization process, a high speed of restraining and a high precision of evaluation, and can achieve the degree of nanosecond for the time delay through merely two times of iteration, which has greatly reduced the computing difficulty and complexity. This analysis is made upon the model of BeiDou navigation system and can provide reference for our country's ISLs design.

**Key words:** inter-satellite links; ephemeris-aided; capture initial information; iterative algorithm

星间链路是现代化全球导航卫星系统的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>,导航卫星精密定轨与时间同步对星间测距功能的需求催生出了导航星座星间链路的概念。通过在导航卫星之间建立星间通信与测量链路,导航系统的空间段将不再是孤立卫星的组合,而成为相互协同的一个整体,使导航星座实现自主导航的功能<sup>[4]</sup>,有效增强定轨和时间同步的精度,降低导航系统对地面站的依赖程度<sup>[5-7]</sup>。

扩频信号的捕获是一个伪码和载波二维搜索的过程,搜索范围的大小直接决定信号捕获的快慢程度和实现难度<sup>[8]</sup>。当星间链路使用无线电测距方法完成精密测距与时间同步时,不同轨道面上的卫星相对运动较大,测量信号具有较大的多普勒频移,从而增大了信号的捕获范围,给捕获带来了一定的难度,特别是对于星上计算资源受限的情况。对于导航星座而言,时间同步和精密

定轨是导航系统运行的基础,星座中的卫星均处于一个高精度的时空基准中,实时广播星历的轨道预报精度可以达到米级,钟差达到纳秒级<sup>[9-11]</sup>。每颗卫星根据星历可以得到自身和其他卫星的坐标和速度,从而可以估计出测量时刻信号的到达时间和多普勒频率,极大地缩小信号的搜索范围,简化了信号捕获的实现复杂度。本文基于北斗导航星座构型,首先分析了星座星间链路特性,指出了星间链路信号捕获的难度,然后提出了一种基于星历辅助的星间链路捕获初值迭代算法,详细给出了算法的实现流程,最后对所提算法的性能进行了仿真验证。

### 1 北斗导航星座星间链路特性分析

根据北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 B1I(1.0 版)<sup>[12]</sup>,北斗导航星座建成后将有 5

\* 收稿日期:2013-05-20

基金项目:国家 863 计划资助项目(2012AA121804)

作者简介:李献斌(1982—),男,河南濮阳人,博士研究生,E-mail:lixianbin@163.com;

王跃科(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wangyueke@nudt.edu.cn

颗地球静止同步轨道(GEO)卫星、3颗地球倾斜同步轨道(IGSO)卫星和27颗中圆轨道(MEO)卫星构成。全球MEO星座构型为Walker24/3/1,轨道高度为21 528km,倾角为 $55^\circ$ ;区域增强星座,由5颗位于 $58.75^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $110.5^\circ$ 、 $140^\circ$ 和 $160^\circ$ 的GEO,以及3颗轨道星下点交点地理经度为 $118^\circ$ ,倾角为 $55^\circ$ 、轨道高度为35 786km的IGSO卫星组成。根据给定的卫星轨道参数,可以建立对应的星座模型,分析星座中星间链路信号的传输时延特性和多普勒变化规律。通过分析,基于J2000坐标系,星座内任意两颗卫星之间的距离最大值为71 520km,对应MEO和GEO之间的链路;距离最小值为5 209km,相对速度最大值为 $\pm 4.7\text{km/s}$ ,对应于不同轨道面MEO卫星之间的链路。以MEO11卫星为例,得到的与GEO、MEO卫星间距离如图1、图2所示。

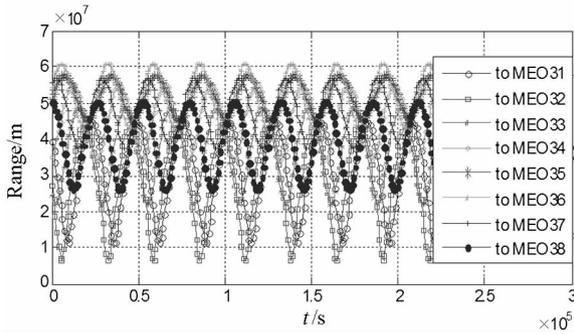


图1 MEO11星到第三轨道面MEO星之间的距离

Fig. 1 Range between MEO11 and satellites of the third orbital plane

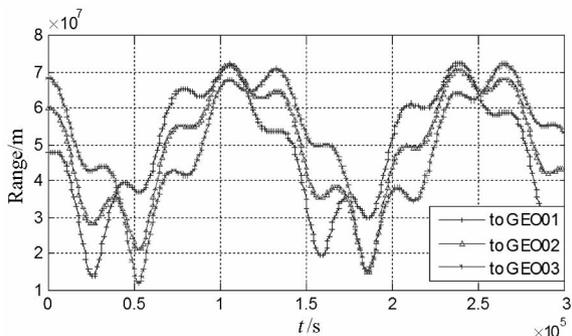


图2 MEO11卫星到GEO卫星之间的距离

Fig. 2 Range of MEO11 to GEO satellites

信号的捕获是对频率和时间进行二维搜索的过程,当星座中任意两颗卫星之间建立测量通信链路时,如果不采用先验知识,根据星间距离和多普勒变化情况,在时间维上需要搜索的范围为 $[0.017\text{s}, 0.24\text{s}]$ (对应最小距离和最大距离的时延),在频率维上搜索的范围为 $[-f_T v/c, f_T v/c]$ ,其中 $f_T$ 是信号的发射频率, $c$ 为光速, $v$ 对应最大

相对速度 $4.7\text{km/s}$ 。对于码速率为 $10.23\text{Mbps}$ ,伪码长度为1023,信号的发射频率为 $20\text{GHz}$ ,需要搜索的整个伪码周期,即1023个码片,多普勒范围为 $\pm 313.3\text{kHz}$ ,按照通常半个码片的伪码搜索间隔和 $1\text{kHz}$ 的频率搜索间隔,要搜索的格点数多达1 282 024,给捕获实现带来较大的难度。因此,有必要针对导航星座自身特点,对捕获初值进行估计。

为了保证星间测量和数据传输的实时性,星间链路通常采用时分工作模式,每条链路仅仅分配一个较短的时隙,比如,GPS星间链路采用时分复用的方式,每颗导航卫星 $1.5\text{s}$ 的时隙,对星座内在轨工作的24颗卫星轮询一遍的时间是 $36\text{s}$ <sup>[13-14]</sup>。Galileo将其时隙设为 $333\text{ms}$ ,通过时分切换,实现整网的测量与通信。每个短暂的时隙内,要求每条测量链路完成信号的捕获、跟踪和解调,因此,对信号捕获时间提出了较高的要求。

## 2 星间链路捕获初始信息算法

不失一般性,考虑在星座中任意两颗卫星A、B之间建立一条星间链路,假定卫星A作为主星,卫星B作为从星,按照星间链路协议约定, $t_1$ 时刻卫星A发出信号,信号的发射频率为 $f_T$ , $t_2$ 时刻信号到达卫星B,传输时延记为 $t_{AB}$ ,接收信号的频率为 $f_R$ ,则有:

$$t_{AB} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

$$f_R = f_T \left( 1 - \frac{v}{c} \right) \quad (2)$$

其中, $v$ 表示接收时刻 $t_2$ 卫星B相对于卫星A发射时刻 $t_1$ 速度的径向速度。捕获初始信息的估计就是对信号的传输时延 $t_{AB}$ 和接收信号的频率 $f_R$ 进行估计。

### 2.1 传输时延的直接算法

时延估计的直接算法是将 $t_{AB}$ 作为一个未知量,建立一元方程求解。

假设以J2000坐标系作为参考坐标系,根据广播星历可以得到 $t_1$ 时刻卫星A的坐标 $\mathbf{P}_A(t_1)$ 和 $t_2$ 时刻卫星B的坐标 $\mathbf{P}_B(t_2)$ :

$$\mathbf{P}_A(t_1) = \begin{bmatrix} x_A(t_1) \\ y_A(t_1) \\ z_A(t_1) \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_B(t_2) = \begin{bmatrix} x_B(t_2) \\ y_B(t_2) \\ z_B(t_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算这两个坐标点之间的信号传输时延得

$$t_2 - t_1 = \frac{|\mathbf{P}_B(t_2) - \mathbf{P}_A(t_1)|}{c} \quad (4)$$

式中 $t_2$ 为方程中唯一未知量,且根据星间拓扑关

系约束,有

$$t_2 - t_1 \in [0.017 \quad 0.24] \quad (5)$$

联立式(3)~(4)可得到  $t_2$ , 结合式(1), 可得到  $t_{AB}$ 。

### 2.2 基于星历的传输时延迭代算法

从理论上通过直接解析法求解  $t_{AB}$  较为直观, 但是根据星历信息求解卫星的坐标量时涉及大量的三角函数和超越方程的求解<sup>[8]</sup>, 使得式(3)中方程的建立和求解十分困难, 由于资源受限而不适合星上处理器直接实现。根据星间相对运动的特点提出一种基于迭代运算的时延估计算法, 可以有效降低处理资源压力, 其流程如下:

第1步, 根据星历可以得到  $t_1$  时刻卫星 A 在 J2000 坐标系中的坐标  $\mathbf{P}_A(t_1)$ ;

第2步, 选取迭代初值  $t_{AB1}$ , 根据星间距离变化范围  $0 \leq t_{AB1} \leq 0.24$ 。根据星历计算  $t_1 + t_{AB1}$  时刻卫星 B 在 J2000 坐标系中的坐标  $\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB1})$ ;

第3步, 根据  $\mathbf{P}_A(t_1)$  和  $\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB1})$  求解出两点之间的传输延迟, 记为  $t_{AB2}$ :

$$t_{AB2} = \frac{|\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB1}) - \mathbf{P}_A(t_1)|}{c} \quad (6)$$

第4步, 设置迭代收敛门限为  $t_p$ , 令  $t'_{AB} = t_{AB2} - t_{AB1}$ , 如果  $t'_{AB} \leq t_p$ , 则退出迭代, 得到  $\hat{t}_{AB} = t_{AB2}$ , 否则令  $t_{AB1} = t_{AB2}$ , 重复2、3、4步。

### 2.3 迭代算法收敛性能分析

根据上述迭代流程, 可以得到一组时间延迟序列  $\{t_{AB1}, \dots, t_{ABn}\}$ , 分别对应于卫星 B 的坐标点为  $\{\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB1}), \dots, \mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn})\}$ , 如图3所示。

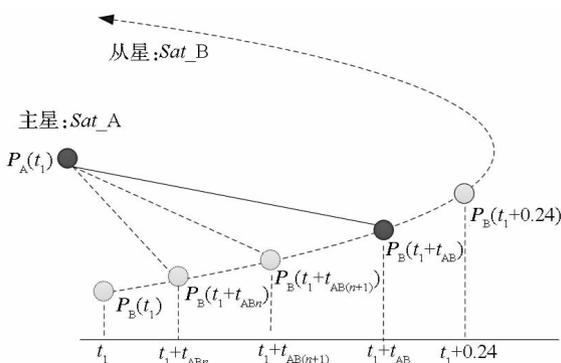


图3 卫星 A、B 相对位置关系

Fig. 3 Relative position between satellite A and B

假设卫星 B 相对于坐标原点的最大速度值为  $v_{\max}$ , 则  $t_1 + t_{ABn}$  时刻和  $t_1 + t_{AB}$  卫星 B 之间的距离满足:

$$|\mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn}) - \mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB})| \leq |v_{\max}(t_{ABn} - t_{AB})| \quad (7)$$

在以  $\mathbf{P}_A(t_1)$ 、 $\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB})$  和  $\mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn})$  为顶点的三角形中, 根据三角形特性, 两边长度之差小于第三边可得:

$$\begin{aligned} & \left| |\mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn}) - \mathbf{P}_A(t_1)| - |\mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB}) - \mathbf{P}_A(t_1)| \right| \\ & < |\mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn}) - \mathbf{P}_B(t_1 + t_{AB})| \end{aligned} \quad (8)$$

根据迭代公式(6):

$$|\mathbf{P}_B(t_1 + t_{ABn}) - \mathbf{P}_A(t_1)| = ct_{AB(n+1)} \quad (9)$$

结合式(7)~(9)可得

$$|t_{AB(n+1)} - t_{AB}| \leq \frac{|v_{\max}|}{c} \cdot |(t_{ABn} - t_{AB})| \quad (10)$$

由于  $\frac{|v_{\max}|}{c} < 1$ , 所以有:

$$|t_{AB(n+1)} - t_{AB}| < |(t_{ABn} - t_{AB})| \quad (11)$$

所以数列  $\{|(t_{ABn} - t_{AB})|\}$  是单调递减序列, 且  $|(t_{ABn} - t_{AB})| \geq 0$ , 根据数列极限的性质,  $\{|(t_{ABn} - t_{AB})|\}$  收敛, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |(t_{ABn} - t_{AB})| = 0 \quad (12)$$

则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} t_{ABn} = t_{AB} \quad (13)$$

初次迭代时选取  $0 \leq t_{AB1} \leq 0.24$ , 则  $|(t_{AB1} - t_{AB})| < 0.24$ , 经过一次迭代计算得到  $t_{AB2}$ , 根据式(10)可以得到此时的迭代误差范围为:

$$|t_{AB2} - t_{AB}| \leq \frac{|v_{\max}|}{c} \cdot |(t_{AB1} - t_{AB})| < 0.24 \cdot \frac{|v_{\max}|}{c} \quad (14)$$

同理, 经过  $n$  次迭代得到的估计误差有

$$\begin{aligned} |t_{ABn} - t_{AB}| & \leq \left( \frac{|v_{\max}|}{c} \right)^n |(t_{AB1} - t_{AB})| \\ & < 0.24 \left( \frac{|v_{\max}|}{c} \right)^n \end{aligned} \quad (15)$$

根据开普勒第三定律, 导航星座中的 MEO 卫星线速度最大, 为  $3.8\text{km/s}$ , 令  $v_{\max} = 3.8\text{km/s}$ , 代入式(10)中, 经过一次迭代, 得到的时延估计误差小于  $3.04 \times 10^{-6}\text{s}$ , 经过两次迭代以后, 得到的时延估计误差小于  $5.6 \times 10^{-11}\text{s}$ , 对于  $10.23\text{MHz}$  的码速率, 已经小于半个码片的宽度, 满足信号跟踪的要求, 即通过简单的二次迭代, 实现了星历辅助时延估计的高精度计算, 大大简化了星上计算代价。

### 2.4 多普勒频率的估计

当时延估计完成以后, 可以得到到达时刻的

估计值  $\hat{t}_2$ 。根据式(3)计算出  $t_1$  时刻卫星 A 的坐标  $\mathbf{P}_A(t_1)$  和  $\hat{t}_2$  时刻卫星 B 的坐标  $\mathbf{P}_B(\hat{t}_2)$ , 则对应的卫星 A 到卫星 B 的指向向量  $\mathbf{P}_{AB}(t_1)$  为:

$$\mathbf{P}_{AB}(t_1) = \mathbf{P}_B(\hat{t}_2) - \mathbf{P}_A(t_1) = \begin{bmatrix} x_{AB}(t_1) \\ y_{AB}(t_1) \\ z_{AB}(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B(\hat{t}_2) - x_A(t_1) \\ y_B(\hat{t}_2) - y_A(t_1) \\ z_B(\hat{t}_2) - z_A(t_1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

代入星历, 计算出  $t_1$  时刻卫星 A 的速度  $\dot{\mathbf{P}}_A(t_1)$  和  $\hat{t}_2$  时刻卫星 B 的速度  $\dot{\mathbf{P}}_B(\hat{t}_2)$ :

$$\dot{\mathbf{P}}_A(t_1) = \begin{bmatrix} \dot{x}_A(t_1) \\ \dot{y}_A(t_1) \\ \dot{z}_A(t_1) \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{P}}_B(\hat{t}_2) = \begin{bmatrix} \dot{x}_B(\hat{t}_2) \\ \dot{y}_B(\hat{t}_2) \\ \dot{z}_B(\hat{t}_2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

则对应的卫星 B 相对于卫星 A 的速度  $\dot{\mathbf{P}}_{AB}(t_1)$  为:

$$\dot{\mathbf{P}}_{AB}(t_1) = \dot{\mathbf{P}}_B(\hat{t}_2) - \dot{\mathbf{P}}_A(t_1) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{AB}(t_1) \\ \dot{y}_{AB}(t_1) \\ \dot{z}_{AB}(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_B(\hat{t}_2) - \dot{x}_A(t_1) \\ \dot{y}_B(\hat{t}_2) - \dot{y}_A(t_1) \\ \dot{z}_B(\hat{t}_2) - \dot{z}_A(t_1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

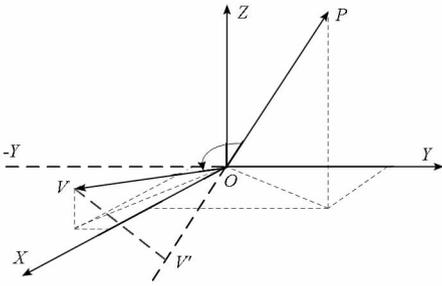


图 4 多普勒计算关系  
Fig. 4 Calculate of Doppler shift

将  $\mathbf{P}_{AB}(t_1)$  和  $\dot{\mathbf{P}}_{AB}(t_1)$  表示在图 4 中, 其中向量  $\overrightarrow{OP}$  表示坐标矢量  $\mathbf{P}_{AB}(t_1)$ , 向量  $\overrightarrow{OV}$  表示速度矢量  $\dot{\mathbf{P}}_{AB}(t_1)$ , 向量  $\overrightarrow{OV}$  在向量  $\overrightarrow{OP}$  上的投影即为卫星 B 相对于卫星 A 的径向速度  $v$ , 则有:

$$v = |\overrightarrow{OV}| \cos\theta \quad (19)$$

其中  $\theta$  表示向量  $\overrightarrow{OV}$  和向量  $\overrightarrow{OP}$  之间的夹角, 根据二者的几何关系有:

$$\cos\theta = \frac{\overrightarrow{OV} \cdot \overrightarrow{OP}}{|\overrightarrow{OV}| |\overrightarrow{OP}|} \quad (20)$$

联立式(2)、(19)、(20), 即可得到接收信号的频率:

$$f_R = f_T \left( 1 - \frac{\overrightarrow{OV} \cdot \overrightarrow{OP}}{c |\overrightarrow{OP}|} \right) \quad (21)$$

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真数据的产生

利用星历参数计算出卫星在某一时刻的空间位置是实现捕获初始信息计算必须完成的重要一步, 广播星历中一般包含的参数如表 1 所示<sup>[15]</sup>。

仿真中采用北斗卫星轨道参数, 为了简化计算, 进行轨道计算时只考虑二体模型, 将卫星轨道视为无摄运行的理想轨道, 即将星历中包含的摄动校正参数全部赋值为零。

表 1 广播星历参数  
Tab. 1 Broadcast ephemeris parameters

| 参数               | 说明           |
|------------------|--------------|
| $t_{oe}$         | 星历参考时间       |
| $a$              | 半长轴          |
| $e$              | 偏心率          |
| $i$              | 参考时刻的轨道倾角    |
| $\Omega$         | 参考时刻的升交点准经度  |
| $\omega$         | 近地点角距        |
| $M_0$            | 参考时刻的平近点角    |
| $\Delta n$       | 平均角速度改正      |
| $\dot{\Omega}$   | 升交点准经度的变率    |
| $C_{uc}, C_{us}$ | 纬度幅角正弦余弦调和系数 |
| $C_{rc}, C_{rs}$ | 轨道向径正弦余弦调和系数 |
| $C_{ie}, C_{is}$ | 轨道倾角正弦余弦调和系数 |

以 MEO11、GEO01 和 IGS001 卫星为例, 简化的轨道参数如表 2 所示。

表 2 简化的北斗卫星轨道参数  
Tab. 2 Simplified satellites orbit parameters of BDs

| 参数               | MEO11   | GEO01     | IGS001  |
|------------------|---------|-----------|---------|
| $t_{oe}$         | 0       | 0         | 0       |
| $a/\text{km}$    | 27906.1 | 42164.1   | 42164.1 |
| $e$              | 0       | 0         | 0       |
| $i/(\circ)$      | 55      | 1.0765e-5 | 55      |
| $\Omega/(\circ)$ | 360     | 80        | 118.934 |
| $\omega/(\circ)$ | 0       | 0         | 0       |
| $M/(\circ)$      | 0       | 29.8419   | 0       |

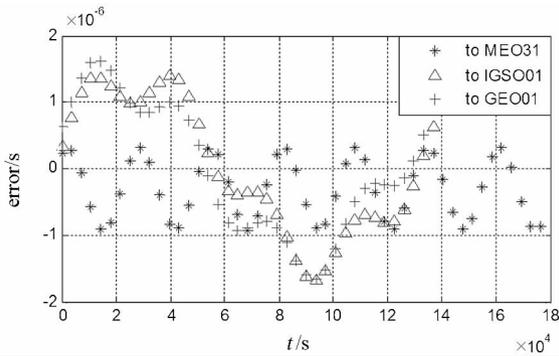
确定了轨道参数, 利用开普勒行星运动定律即可求解给定时刻卫星在 J2000 坐标系中的坐标和速度<sup>[8]</sup>。

表3  $t$ 时刻 MEO11 卫星的位置和速度  
Tab.3 Position and speed of MEO11 at time  $t$

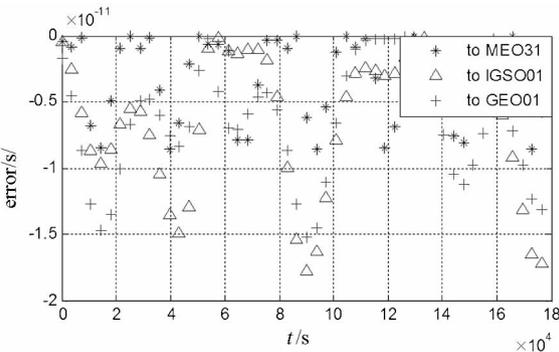
| 参数              | 坐标值               |
|-----------------|-------------------|
| $x/m$           | 30502659.0902865  |
| $y/m$           | -15093.2610869835 |
| $z/m$           | 296103.740658238  |
| $\dot{x}/(m/s)$ | -28.8174579071942 |
| $\dot{y}/(m/s)$ | -150.788123762095 |
| $\dot{z}/(m/s)$ | 2960.89879824582  |

### 3.2 仿真结果

有了坐标和速度数据就可以根据迭代算法计算信号的传输时延和多普勒频率。根据式(15),卫星的运行速度越大,迭代误差的理论上限越大。因此仿真时考虑最极端情况,以MEO卫星作为链路的目标星进行计算。为了保证仿真的全面性,分别针对三种链路情况进行仿真计算:GEO到MEO之间的链路、IGSO到MEO之间的链路和异轨道面MEO卫星之间的链路,仿真结果如图5所示。



(a) 一次迭代计算



(b) 两次迭代计算

图5 迭代计算后的误差曲线

Fig.5 Error curve after iterations

图中分别给出了三条链路一次迭代和二次迭代计算后的误差,计算总时长为40h,计算间隔为1h,共计算40个点。其中迭代的初值均设为零,

即  $t_{ABI} = 0$ 。时延的真值通过解式(3)直接得到。另外,在仿真计算时,需要达到较高的计算精度,本次仿真计算过程中,小数点后均保留了20位有效数字。

通过迭代结果可以看出,经过一次迭代后,最大误差为  $1.74 \times 10^{-6} s$ ,两次迭代后,最大误差  $1.68 \times 10^{-11} s$ ,完全能够满足捕获对初始信息的要求,与前面的理论分析相同,验证了算法的正确性和快速收敛特性。

### 4 结论

本文针对北斗导航系统,利用导航星座特有广播星历资源,提出了一种基于数值迭代的算法对星间链路初始捕获的时延信息和多普勒信息进行计算,详细阐述了该算法的迭代流程、收敛性能,并进行了仿真验证。理论分析和仿真验证表明,该算法能够将时延估计精度提高到纳秒级,多普勒估计精度在赫兹级,极大地减少了捕获的搜索范围,降低了信号的捕获难度。另外,该算法较为简洁,便于实现,适合于星上对资源和可靠性要求较高的场合。

当卫星处于轨道机动期间或卫星钟处于切换、调频调相状态时,或者是卫星刚刚发射入轨,由于测控时间有限,高精度的时空基准尚未形成,导航电文提供的卫星时空信息精度较差,此时需要重新评估先验信息的精度来计算捕获初值,甚至无法进行先验信息计算,则可能要对信号进行盲捕,这些特殊情况需要今后作进一步分析。

### 参考文献 (References)

- [1] Maine K P, Anderson P, Langer J. Crosslink for the next-generation GPS[C]//Proceedings of the 2003 IEEE Aerospace Conference, 2003:1589 - 1596.
- [2] Holmes J K, Raghavan S. A summary of the new GPS IIR-M and IIF modernization signals[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Vehicular Technology Conference, 2004: 4116 - 4126.
- [3] Avila-Rodriguez J A, Wallner S, Hein G W, et al. A vision on new frequencies, signals and concepts for future GNSS systems[C]// Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2007: 517 - 534.
- [4] Abusali P A M, Tapley B D, Schutz B E. Autonomous navigation of global positioning system using cross-link measurements[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1998, 21 (2): 321 - 327.
- [5] Fernández F A. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast

- navigation data[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 786 – 801.
- [6] Liu J N, Geng T, Zhao Q L. Enhancing precise orbit determination of compass with inter-satellite observations[J]. *Survey Review*, 2011, 43(322): 333 – 342.
- [7] Xu H L, Wang J L, Zhan X Q. Autonomous broadcast ephemeris improvement for GNSS using inter-satellite ranging measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(6): 1034 – 1044.
- [8] Kaplan E D, Hegarty C J. *Understanding GPS: principles and applications*[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [9] 赵利军, 张飞舟, 程鹏, 等. GPS 广播星历的误差分析[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(1): 155 – 157.  
ZHAO Lijun, ZHANG Feizhou, CHENG Peng, et al. Analysis of GPS broadcast ephemeris error[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(1): 155 – 157. (in Chinese)
- [10] 郭际明, 孟祥广, 李宗华, 等. GLONASS 卫星广播星历精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(1): 68 – 71.  
GUO Jiming, MENG Xiangguang, LI Zonghua, et al. Accuracy analysis of GLONASS satellite broadcast ephemeris[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(1): 68 – 71. (in Chinese)
- [11] 刘季. 北斗 GEO 卫星位置计算方法探究[J]. *测绘地理信息*, 2012, 37(5): 33 – 36.  
LIU Ji. BeiDou GEO satellite orbit algorithm[J]. *Journal of Geomatics*, 2012, 37(5): 33 – 36. (in Chinese)
- [12] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 B1I(1.0 版)[EB/OL]. (2012 – 12 – 29) [2013 – 05 – 20]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2012/12/27/2012122755318f7eabbe451aa6d052f829f92e50.pdf>. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System signal. In: Space interface control document B1I (version 1.0). [EB/OL]. 2012 – 12 – 29 [2013 – 05 – 20]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2012/12/27/2012122755318f7eabbe451aa6d052f829f92e50.pdf>. (in Chinese)
- [13] Rajan J A. Highlights of GPS II – R autonomous navigation [C]//Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Institute of Navigation and CIGTF 21st Guidance Test Symposium, 2002, 354 – 363.
- [14] 朱俊, 廖瑛, 文援兰. 基于星间测距和地面发射源的导航星座整网自主定轨[J]. *国防科学技术大学学报*, 2009, 31(2): 15 – 19, 30.  
ZHU Jun, LIAO Ying, WEN Yuanlan. The integrated autonomous orbit determination of navigation constellation based on crosslink range and ground-based emitter [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(2): 15 – 19, 30. (in Chinese)
- [15] Van Diggelen F S T. *A-GPS: assisted GPS, GNSS, and SBAS*[M]. Boston: Artech House, 2009.