

基于星间链路技术的地球静止轨道卫星定轨精度分析

宋诗谦, 佟 俊, 郭 弦, 黄晓飞, 孙震宇

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 地球静止轨道 (GEO) 卫星具有对地静止的特性, GEO 卫星应用日益增多, 在高分辨率对地观测、气象、通信等领域都发挥着越来越重要的作用, 对其轨道确定的需求也越来越高, 研究 GEO 卫星的高精度定轨技术迫在眉睫; 传统方法中利用地面站对 GEO 卫星实现实时自主定轨存在系统误差大、观测几何差等问题, 导致星地测量的误差在定轨过程中被放大的倍数急剧增加, 影响了 GEO 卫星定轨精度的提高; 利用 GPS 卫星实现对 GEO 卫星的定轨时存在可见 GPS 卫星数量少, 接收到的信号微弱, 测量精度不够的问题; 星间链路具有对 GEO 卫星观测几何好、测量精度高的优点, 为 GEO 卫星定轨开辟了新思路; 针对在星间链路资源有限情况下如何选择 MEO 卫星组合与 GEO 卫星进行建链的问题, 以星间链路构型的 PDOP 值为优化指标, 对 MEO 卫星对 PDOP 值的影响进行了分析, 提出了遍历选星、直接选星、迭代选星三种链路资源配置策略, 确定与 GEO 卫星进行建链观测的 MEO 卫星组合, 并用仿真方法对三种算法进行验证, 结果表明, 提出的迭代选星的链路资源配置策略, 能将 GEO 卫星的定轨精度维持在 7~40 m 以内, 同时将星间链路的使用效率提高 5~120 倍。

关键词: 星间链路; 地球静止轨道卫星; 位置精度衰减因子; 精度分析

Precision Analysis of Determined Orbit of GEO Satellite Based on Inter-Satellite Link

Song Shiqian, Tong Quan, Guo Xian, Huang Xiaofei, Sun Zhenyu

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The geostationary orbit satellite is stationary, relative to the earth, it has been widely used in more and more applications, such as earth-observation, weather and communication, the required precision of the GEO satellite orbit has become more and more accurate, so the research on GEO orbit determination has become extremely urgent. In traditional method, the ground station is used to realize the orbit determination of GEO satellite, there is a problem that the observation geometry among the GEO satellite and MEO satellites is weak, it leads to the result that the error of satellite-ground station observation will be amplified too much. The visible MEO satellite is few and the signal is weak when using GPS to determine the orbit of GEO. The Inter-Satellite Link (ISL) whose observation geometry is much better, it has opened up new method to realize the orbit determination of GEO satellite. To solve the limited ISL source problem, three source allocation strategies have been put forward to determine the group of MEO satellites in this paper, the precision and accuracy of the algorithm is verified by simulation data. The result shows that the iteration strategy ensures the accuracy of GEO satellite orbit in 7~40 m and increases the coefficient of ISL about 5~120 times simultaneously.

Keywords: inter-satellite link; geostationary orbit satellite; position dilution of precision; precision analysis

0 引言

轨道高度为 3.6 万公里的 GEO 卫星具有相对地球静止的特性。GEO 卫星应用日益增多, 今天大约 300 颗有效卫星在此轨道上, 在北美洲、欧洲和亚太时区静止轨道卫星分布密度较大, GEO 卫星在高分辨率对地观测、气象、远程通信活动等领域都发挥着越来越重要的作用^[1], 对其轨道确定的需求也越来越高, 研究对 GEO 卫星的实时自主定轨方法已经迫在眉睫。

传统的地面定轨手段已难以满足 GEO 卫星高精度应用的需求。图 1 简要说明了不同观测点对 GEO 卫星的观测情况, 中间实心大圆表示地球, 地球上加粗弧段表示我国地面站可布站的范围, 6 个实心小圆表示 MEO 卫星, 空心小圆表示 GEO 卫星。卫星对整个地球的张角仅 17.6°。我国的经度范围为东经 73°至东经 135°, GEO 对国内地面站的张角仅 8.6°。通过国内布设地面站获取的星地观测数据对 GEO 进行定轨^[2]存在两

个问题: 第一, 目前采用的星地测距系统中系统差比较显著, 设备时延导致的星地测量系统误差难以通过自校准的方式进行控制, 需借助高精度地面测量系统 (如激光测距系统) 对此进行标定, 增加了 GEO 卫星定轨对地面的依赖性; 第二, 由地面站与 GEO 卫星组成的定轨的观测几何很差, 导致星地测量的测量误差在定轨的过程中被放大倍数较大。

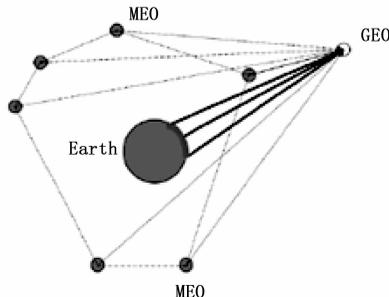


图 1 不同情况下对 GEO 卫星的观测示意图

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2017-10-18。

作者简介: 宋诗谦 (1992-), 女, 湖南益阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事 GEO 卫星定轨与星间链路技术方向的研究。

利用 GPS 卫星实现对 GEO 卫星的定轨存在可见卫星数量少, 接收到的信号微弱, 测量精度不够的问题。故需要寻找其

他方法提高 GEO 卫星的定轨精度。

我国的全球卫星导航系统设计并具备利用星间链路进行测距的功能^[3]。星间链路^[4]是卫星之间进行星间通信和星间测量的链路,若某两颗卫星之间建立了星间链路,则它们相互之间能够进行彼此相对距离、速度、时差的测量;能够进行快速、高安全性的数据交换,减轻地面运控压力、降低对地面的测控需求、提高卫星星座系统的抗摧毁能力;由于政治、国土范围等因素的影响,我国境内地面站的布局受限严重,星间链路技术可以打破传统布站方式中的局限性。正是由于导航星座星间链路为导航系统所带来的巨大潜力,星间链路已经成为未来全球卫星导航系统的基本技术特征和技术制高点。在基准 MEO 卫星与待定轨的 GEO 卫星之间建立的星间链路,具有对 GEO 卫星观测几何好等优点,为 GEO 卫星的实时自主定轨开辟一条新的思路。

星间链路资源作为一种新型的战略资源,在太空中承担着纷繁复杂的任务,实际上可以提供给 GEO 卫星进行定轨的链路资源是有限的。在可用的链路资源数量和观测频度一定的情况下,需要选择与 GEO 卫星观测几何较好的 MEO 卫星组合对 GEO 进行定轨观测来保证 GEO 卫星的定轨精度,如何选择合适的 MEO 卫星组合具有重大的实际意义。在考虑星间可见性时,暂时不考虑星间链路频段所对应的天线方向,认为 MEO 卫星和 GEO 卫星只要不受地球遮挡即可见。从评价星间链路构型的指标出发,确定了三种选星策略,并分析了不同观测频度以及不同链路数下 GEO 卫星的定轨精度。

1 方法与推导

1.1 PDOP 值的定义与计算

测量误差将导致基准 MEO 卫星与 GEO 卫星之间的距离出现误差,进而导致计算出来的 GEO 卫星轨道出现误差^[5]。在卫星定轨中,我们使用位置精度衰减因子来衡量观测卫星的空间几何分布对定位精度的影响。位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP, 下文简称精度因子)指的是伪距测量误差到卫星定轨三维位置误差的放大倍数^[6]。一般来说,PDOP 值越大,定轨误差越大,定轨精度越低。为得到 PDOP 值的计算公式,从伪距测量量对三维位置的偏导数矩阵 G 出发,有:

$$G = - \begin{bmatrix} \frac{x^{(1)} - x}{\rho_c^{(1)}} & \frac{y^{(1)} - y}{\rho_c^{(1)}} & \frac{z^{(1)} - z}{\rho_c^{(1)}} \\ \frac{x^{(2)} - x}{\rho_c^{(2)}} & \frac{y^{(2)} - y}{\rho_c^{(2)}} & \frac{z^{(2)} - z}{\rho_c^{(2)}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{x^{(N)} - x}{\rho_c^{(N)}} & \frac{y^{(N)} - y}{\rho_c^{(N)}} & \frac{z^{(N)} - z}{\rho_c^{(N)}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

公式(1)中, x, y, z 表示的是 GEO 卫星的坐标值, $x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, \rho_c^{(i)}$ 分别表示的是第 i 颗与 GEO 卫星可见的 MEO 卫星的坐标值和这颗 MEO 卫星与 GEO 卫星的星间伪距测量值。

最小二乘准则下,有关测量误差对卫星估计轨道误差影响的详细推导见参考文献[7]。本章直接给出由公式(1)得到的权系数矩阵 H :

$$H = (G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & \dots \\ \dots & h_{22} & \dots \\ \dots & \dots & h_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

PDOP 值的计算公式为:

$$PDOP = \sqrt{h_{11} + h_{22} + h_{33}} \quad (3)$$

1.2 链路数量与 PDOP 值的关系

设 G_m 为所有可见的 m 颗 MEO 卫星与 GEO 卫星进行建链时的观测矩阵, G_{m-1} 为第 i 颗卫星 ($i=1, 2, \dots, m$) 未提供建链时的观测矩阵,两种情况下的权系数矩阵关系如下:

$$H_m = G_m^T G_m = G_{m-1}^T G_{m-1} + g_i^T g_i = H_{m-1} + g_i^T g_i \quad (4)$$

公式(4)中, g_i 为第 i 颗 MEO 卫星对 GEO 卫星的观测矢量。

由 Sherman Morrison 公式可得:

$$H_{m-1}^{-1} = (G_{m-1}^T G_{m-1})^{-1} = (G_m^T G_m - g_i^T g_i)^{-1} = H_m + H_m g_i^T (1 - g_i H_m g_i^T)^{-1} g_i H_m \quad (5)$$

公式(5)中 $S_{ii} = 1 - g_i H_m g_i^T$ 为标量,由于:

$$PDOP_m^2 = \text{trace} H_m^{-1} \quad (6)$$

$$PDOP_{m-1}^2 = \text{trace} (H_{m-1}^{-1})^{-1} = \text{trace} (H_m)^{-1} + \text{trace} (H_m g_i^T g_i H_m^{-1} S_{ii}) \quad (7)$$

去掉一颗卫星后的 $PDOP_{m-1}^2$ 比 $PDOP_m^2$ 多出一项 $\text{trace} (H_m g_i^T g_i H_m^{-1} S_{ii})$ 为正,故:

$$PDOP_{m-1}^2 > PDOP_m^2 \quad (8)$$

由公式(8)可知,PDOP 值随着与 GEO 卫星建链的 MEO 卫星数量的减少而单调增加。当 $PDOP > 6$ 时,定轨方程趋于病态,定轨误差变化幅度增大,定轨精度难以确定^[8],故应选择 $PDOP < 6$ 时的链路构型进行建链。

1.3 三种选星策略

由上述推导可知,选择建链的 MEO 卫星越多,PDOP 值越小,去掉第 i 颗 MEO 卫星后的 PDOP 值为 $pdop_i$,且 $pdop_i > pdop$, $pdop_i$ 越大,代表去掉第 i 颗 MEO 卫星后 PDOP 值增加越大,说明存在此颗 MEO 卫星的情况下几何观测构型越好。用 $pdop_i$ 代表第 i 颗 MEO 卫星的优先级,下面给出三种基于 MEO 卫星的优先级的选星策略。

1.3.1 遍历选星策略

遍历选星策略是计算所有不同 r 颗 MEO 组合时相应的 PDOP 值,从而找出 PDOP 值最小时对应的链路构型作为最优链路构型。

1.3.2 直接选星策略

假定总的链路条数为 m ,选择用于进行 GEO 卫星定轨的链路条数为 r :

第一步:根据 PDOP 值的计算公式计算整体的 $pdop$ 和 r 颗卫星相应的 $pdop_i$;第二步:将 m 颗卫星相应的优先级按从大到小排序;第三步:选择优先级较高的前 r 颗 MEO 与 GEO 进行建链;

直接选星策略是直接选出对 PDOP 值贡献较大的前 r 颗 MEO。这种资源配置策略获得的链路构型未必是最优的,因为这种策略仅仅计算了 m 颗可见星在第一次参与计算时的优先级。其流程图如图 2 所示。

1.3.3 迭代选星策略

针对直接选星策略存在的问题,提出了迭代选星策略。假定总的链路条数为 m ,选择用于进行 GEO 卫星定轨的链路条数为 r ;第一步:根据 PDOP 值的计算公式计算整体的 $pdop$ 和 m 颗卫星相应的 $pdop_i$;第二步:将 m 颗卫星相应的优先级按从大到小排序。剔除优先级最低的一颗卫星,此时剩下 $m-1$ 颗卫星,不妨令 $left$ 为剩余卫星数;第三步:判断剩余的卫星数量 $left$,若剩余的卫星数量大于 r ,则将 $left$ 赋值给 m ,并循

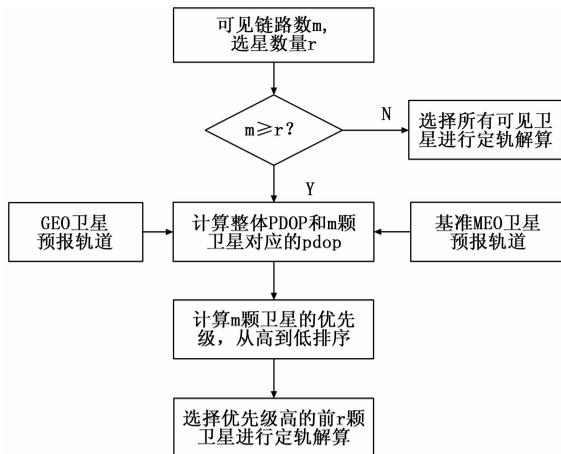


图 2 直接选星策略流程图

环第一步、第二步；若剩余的卫星数量等于 r ，此时停止选星；由上面的分析可知，迭代选星策略是循环进行剔除优先级最低的卫星，重新计算卫星优先级两个步骤。其流程图如图 3 所示。

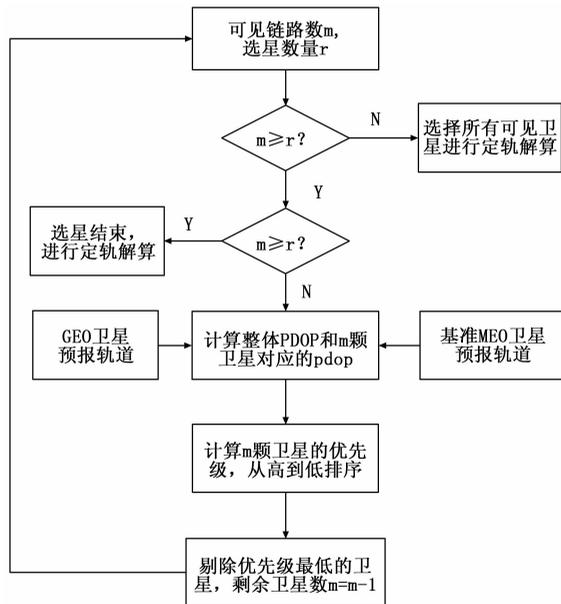


图 3 迭代选星策略流程图

2 实验仿真

2.1 仿真条件

实现 GEO 卫星的定轨，需要提供 GEO 卫星的初始轨道信息、MEO 卫星的轨道信息，GEO—MEO 星间观测数据等，这些数据均由 BDSim 软件提供。BDSim 是我国首个全球卫星导航系统仿真软件工具，由卫星导航仿真与测试实验室（简称“北斗开放实验室”）发布。本文利用 BDSim 仿真生成观测数据，同时导出观测数据仿真时的卫星轨道，将该轨道视为参考轨道用于后续的定轨精度评估中。采用的定轨评估指标是在 GEO 卫星 R/T/N 三个方向的定轨误差绝对值的最大值、RMS 值以及定轨三维位置误差的 RMS 值。RTN 坐标系是以卫星自身质心为原点，以从地心指向卫星质心的方向为 R 方向，卫星运动方向为 T 方向，N 方向与 R 方向和 T 方向成右手系。

本文仿真时间为 2015 年 10 月 1 号 12:00 至 2015 年 10

月 8 号 12:00，定轨时间间隔为 5 分钟。基准星座选择轨道高度为 21 528 km，轨道倾角为 55° 的北斗 MEO 星座。在 J2000.0 地心惯性坐标系下，MEO 星座种子卫星的初始位置矢量为（单位：m）(16 983 361.424 781, -20 353 706.441 348, -0.001 558)，速度矢量为（单位：m/s）(1 709.450 049, 1 426.384 334, 3 179.607 804)。待定轨卫星为某颗定点经度为西经 100° 的 GEO 卫星，其轨道高度为 35 786 km。在 J2000.0 坐标系下，GEO 卫星的初始位置矢量为（单位：m）(218 944.329, 42 165 690.224, 1 569.712)，速度矢量为（单位：m/s）(-3 074.538 892, 15.964 294, 4.701 927)。

2.2 仿真结果

仿真时间内，与 GEO 卫星可见的 MEO 卫星的数量变化如图 4 所示。

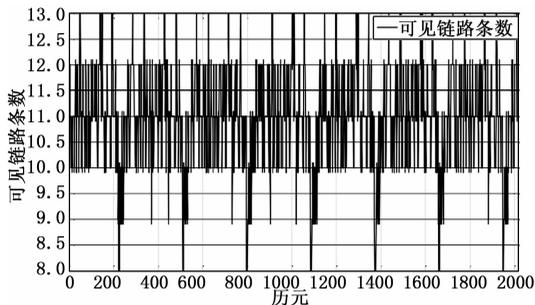


图 4 星间可见链路数量变化趋势

对仿真时间内与 GEO 卫星可见的 MEO 卫星数量进行统计如下表：

表 1 星间可见链路数量统计(条)

最大值	最小值	平均值
13	8	10.9722

对仿真时间内未选星情况下的整体 PDOP 值进行统计如表 2 所示。

表 2 未选星情况下星座 PDOP 值变化情况分析

最大值	最小值	平均值
1.9618	1.3556	1.5892

下面给出了不同选星数量和选星策略下所得链路 PDOP 值的统计情况。

表 3 遍历选星时链路 PDOP 值随选星数量的变化情况分析

选星数量	最大值	最小值	平均值
4	2.7953	2.0384	2.2881
5	2.4523	1.8528	2.0734
6	2.2741	1.7056	1.9184
7	2.0811	1.6294	1.8168
8	1.9618	1.5590	1.7319

表 4 直接选星时链路 PDOP 值随选星数量的变化情况分析

选星数量	最大值	最小值	平均值
4	6.3576	2.0384	2.6534
5	3.7592	1.8528	2.1401
6	3.3649	1.7198	1.9500
7	2.4455	1.6373	1.8355
8	2.3281	1.5590	1.7445

表 5 迭代选星时链路 PDOP 值随选星数量的变化情况

选星数量	最大值	最小值	平均值
4	2.7953	2.0384	2.2951
5	2.4899	1.8528	2.0757
6	2.2741	1.7056	1.9225
7	2.0811	1.6317	1.8184
8	1.9618	1.5590	1.7322

由表 2、表 3、表 4、表 5 可知, 链路 PDOP 值与选星的数量成反相关, 在选星策略一定的情况下, 选星数量越多, 所得链路构型的 PDOP 值越小, 认为链路构型越优。选星数量较少时, 直接选星的会出现偏离最优构型的情况, 迭代选星与遍历选星基本上能反映未选星前链路构型变化趋势, 得到最优的链路构型。选星数量越多, 三种选星策略的选星结果越接近, 遍历选星的效果最佳, 迭代选星策略次之, 然后是直接选星。实际应用中由于卫星载荷视场的限制、可能的轨道机动、大椭圆轨道等原因, 建链数不会太多, 故以下的分析选星数量均为 4。下面将对不同选星算法的选星效率进行分析。

单次计算 PDOP 值都需要进行一次矩阵相乘及求逆, 考察选星策略的效率时, 主要以 PDOP 值计算次数为评价指标。若某时刻可见链路条数为 m , 直接选星策略只需计算 $m+1$ 次 PDOP 值, 迭代选星策略需计算 $m-4$ 次的整体 PDOP 值, 还需计算 $m+(m-1)+\dots+5$ 次的 $pdop_i$, 即需计算 $(m-4)(m+7)/2$ 次的 PDOP 值。遍历选星策略需要将 m 颗 MEO 卫星全部遍历, 需计算 C_m^4 次 PDOP 值。分析可知, 直接选星策略和迭代选星的计算量与选星的数量成线性关系, 计算量比较小, 随着可见链路数量的增长, 遍历选星策略的计算量增长明显。

综合考虑选星效果和选星效率, 以下仿真分析将以迭代选星算法为例进行实验。仿真分析星间观测存在 1m 随机误差、动力学模型太阳光压参数存在误差的情况下, 选星数量为 4、观测频率为 5 分钟时迭代选星策略下的定轨结果。图 5、6 分别表示的是未选星情况、迭代选星情况下的定轨结果。

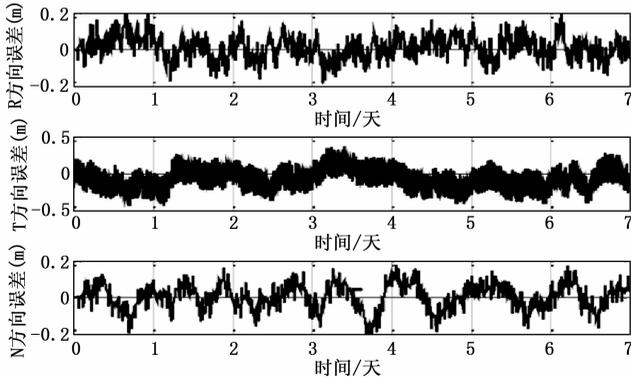


图 5 定轨频率为 5 分钟时未选星情况下的定轨结果

由上述结果可知, 选星算法能显著提高星间链路资源的使用效率, 但是牺牲了一部分定轨精度。为分析链路数量以及观测频率一定情况下的最优定轨精度, 下面将以迭代选星算法为例, 分析不同链路数量以及观测频率下的 GEO 卫星的定轨性能。当选星数量为 4 时, GEO 卫星的轨道确定结果如图所示, 图 7、8、9 依次代表的是观测频率为 30 分钟, 60 分钟、120 分钟时的定轨结果。

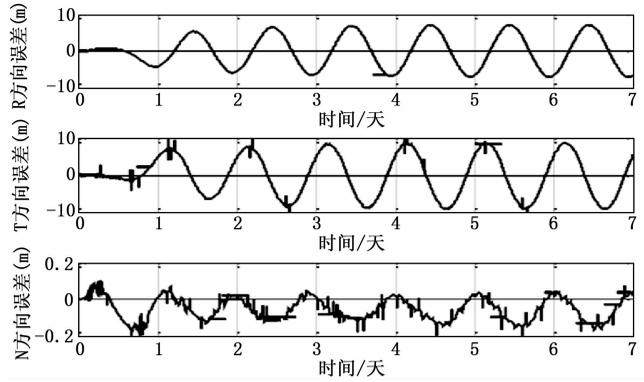


图 6 定轨频率为 5 分钟时迭代选星情况下的定轨结果

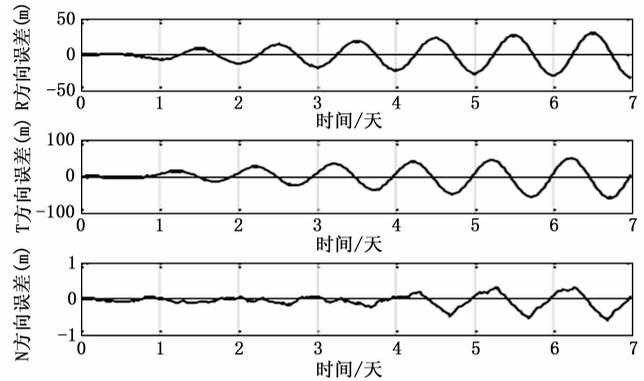


图 7 定轨频率为 30 分钟时迭代选星情况下的定轨结果

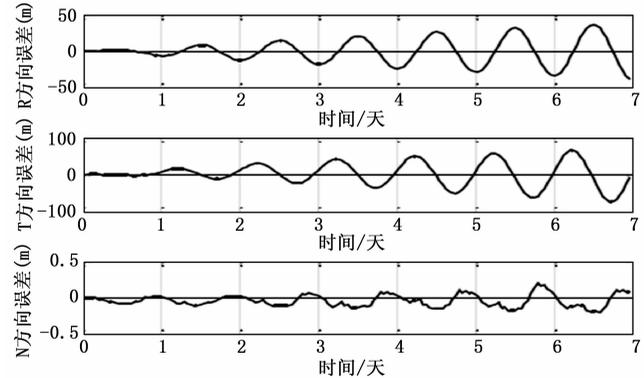


图 8 定轨频率为 60 分钟时迭代选星情况下的定轨结果

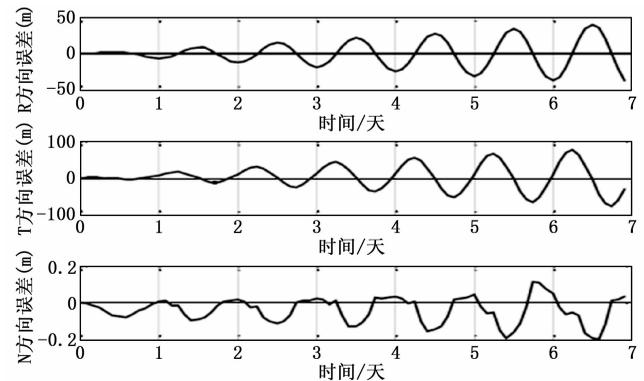


图 9 定轨频率为 120 分钟时迭代选星情况下的定轨结果

相应定轨结果如表 6 所示。

表 6 不同观测频度下 GEO 卫星定轨结果统计

观测频度	误差(米/m)	R	T	N	三维位置误差
5 分钟	最大值	7.0620	9.0073	0.1666	6.9533
	RMS	4.3578	5.4176	0.0799	
30 分钟	最大值	28.7199	53.4504	0.3779	27.9420
	RMS	13.4854	24.4720	0.1424	
60 分钟	最大值	35.9050	70.2820	0.4246	34.1834
	RMS	15.8482	30.2873	0.1393	
120 分钟	最大值	38.3615	74.4772	0.4546	36.6943
	RMS	16.6833	32.6822	0.1409	

由表 6 可以看出, 星间观测存在米级随机误差、GEO 卫星存在动力学模型误差情况下, 选星数量为 4 时, 当观测频度为 5 分钟时, 轨道确定误差维持在 7 米以内; 当观测频度为 30 分钟、60 分钟、120 分钟时, 运用迭代选星策略可将 GEO 卫星的定轨误差维持在 40 米以内, 且观测越频繁, 精度越高。

3 结论

由上述仿真分析可知, 文章提出的三种选星策略中, 从定

轨精度和计算效率来说, 迭代选星策略效果最佳, 不仅能得到较优的链路构型, 而且能提高链路资源的利用率。仿真实验中, 仅用 4 条星间链路, 就能将 GEO 卫星的定轨精度维持在 7~40 m 以内, 同时将星间链路的使用效率提高 5~120 倍。

参考文献:

[1] 刘林. 航天器轨道理论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
 [2] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究 [D]. 西安: 解放军信息工程大学, 2010.
 [3] 谭述森. 北斗运行控制策略 [A]. 北京: 第一届中国卫星导航学术年会 [C]. CSNC 2010, 2010.
 [4] 帅平. 导航星座优化设计与自主导航技术研究 [D]. 北京: 中国空间技术研究院博士后流动站, 2005.
 [5] 俞杭华, 何震晟, 周世宏. 导航星座的覆盖特性和定位精度因子分析 [J]. GNSS World of China, 2010, 10 (3): 30-34.
 [6] 刘会杰, 张乃通. 基于 GDOP 的最优定位星座性能研究 [J]. 2010, 11 (4): 32-37.
 [7] Kaplan. GPS 原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
 [8] 帅平, 曲广吉. 卫星导航定位方程的病态条件 [J]. 飞行器测控学报, 2006, 25 (3): 1-5.

4 结论

文中分析了 AR 模型定阶和 PSO_SVR 模型的基本理论以及 AR_PSO_SVR 模型的构建。将 AR_PSO_SVR 模型用于滚动轴承的故障趋势预测。提取滚动轴承的时域和频域特征, 同时使用 PCA 对提取的特征进行降维处理。最后将 AR_PSO_SVR 模型的预测结果与 AR 和 PSO_SVR 模型的预测结果进行对比, 实验结果表明文中使用模型的各项指标均优于 AR 和 PSO_SVR 模型。虽然 AR_PSO_SVR 模型在故障预测的单步预测中效果较好, 但当进行多步迭代预测时就会因为误差的不断积累, 而造成预测结果偏差较大的情况, 在后续的研究中可以寻找解决办法提高多步预测的正确率。

参考文献:

[1] 曾声奎, Michael G. Pecht, 吴际. 故障预测与健康管理 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 626-632.
 [2] 韩昕峰, 任立坤. 基于神经网络的轴承故障预测模型 [J]. 海军航空工程学院学报, 2015 (3): 281-285.
 [3] 左红, 顾家铭, 于锦禄. 基于支持向量机的滚动轴承故障诊断研究 [J]. 轴承, 2008 (8): 36-39.
 [4] 朱晓乐, 王华, 符菊梅, 等. 基于 ARMA 模型的动力系统缓变数据故障趋势预测 [J]. 载人航天, 2011, 17 (2): 54-58.
 [5] 任海军, 孙瑞志, 刘广利. 基于 AR_SVR 模型的时间序列预测算法的研究 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (2): 421-424.
 [6] 熊伟丽, 徐保国. 基于 PSO 的 SVR 参数优化选择方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (9): 2442-2445.
 [7] 孙建. 滚动轴承振动故障特征提取与寿命预测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 13-18.
 [8] 王建利. 滚动轴承性能退化评价与趋势预测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
 [9] 万书亭, 吴美玲. 基于时域参数趋势分析的滚动轴承故障诊断 [J]. 机械工程与自动化, 2010 (3): 108-110.
 [10] 董绍江. 基于优化支持向量机的空间滚动轴承寿命预测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
 [11] 范明明. 基于主成分分析的多变量混沌时间序列预测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

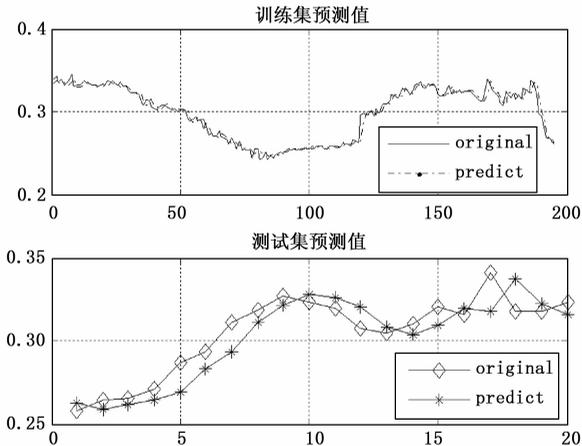


图 4 原始数据与文中模型预测值比较

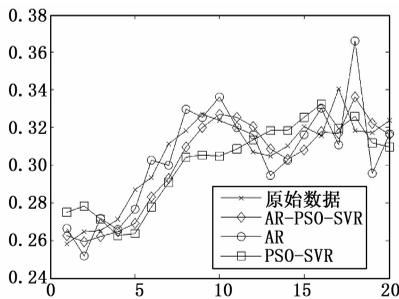


图 5 各种模型预测值比较

表 3 种模型预测误差对比

评价指标	AR_PSO_SVR	AR	PSO_SVR
MSE	0.0112	0.0160	0.0146
MAE	0.0092	0.0121	0.0134
R ²	0.8276	0.6574	0.5380