

# 基于状态转换的双天线定向软件的设计与验证

张锐<sup>1</sup> 段红华<sup>2</sup> 吴美平<sup>1</sup> 祝建成<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院,长沙 410073;

2. 中国人民解放军92961部队;三亚 572021)

**摘要:** 在高动态的导航定位定向的应用中,经常会遇到观测环境比较恶劣的情况。针对这种情况,本文详细分析了在不同的变星情况下模糊度空间的传递过程,并以此为基础设计了一种基于状态转换的双天线定向软件。用户可以时刻了解系统的运行状态,便于用户进行其他实时操作。通过理论推导和实测仿真数据分析表明,该软件能很好地适用于卫星频繁遮挡的情况,且实验效果良好,长度为3m的基线其航向角精度优于 $0.1^\circ$ ,俯仰角精度优于 $0.2^\circ$ ,具有一定的实用价值。

**关键词:** 高动态;定向;状态转换;

**中图分类号:** U666.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1674-5558.2012.03.005

## Design and Validation of Two-antenna Orientation Determination Software Based on State Switch Technique

ZHANG Rui<sup>1</sup>, DUAN Hong-hua<sup>2</sup>, WU Mei-ping<sup>1</sup>, ZHU Jian-cheng<sup>1</sup>

(1, College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense

Technology, Changsha 410073, China; 2, Unit 92961 of PLA, Sanya 572021)

**Abstract:** When the user needs to determine its position and orientation in the high dynamic scene, he may often suffer from some bad observation surroundings. In view of this situation, this paper analyses the transformation of the ambiguity space from one epoch to the next when the SV numbers change frequently, and designs a two-antenna orientation determination software based on the state switch technique. The running state of system can be known by users all the time. This just can fulfill the requirements of real-time operation. The Results of derivation and experimental simulation data analysis indicate that software designed here can fit the scenes that the satellites are frequently blocked sufficiently. If the length of baseline is 3m, the yaw accuracy is better than  $0.1^\circ$ , and the pitch accuracy is better than  $0.2^\circ$ .

**Key words:** high dynamic; orientation; state switch;

## 0 引言

卫星定向技术是由卫星导航定位派生出来的一项新技术,虽然发展时间不长,但由于其具有成本低、精度高、小型化、全固态、实现简单等优点,已在许多工程应用领域如卫星快速寻北,辅助惯导系统快速初始对准,大坝变形监测,卫星/INS组合航向确定等崭露头角,并具备了广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

卫星定向算法的设计往往与接收机观测到的卫星数目有关。在实际应用中,接收机的观测环境是十分复杂的,而接收机能观测到的卫星会随着环境的变化而变化。本文根据所有可能发生的变星情况,将系统划分为空闲、搜索、过滤、定向四个工作状态。不同的变星情况触发得到不同的状态,系统总是在这四个状态之间进行切换。同时,这种处理方

收稿日期:2012-06 修订日期:2012-08

作者简介:张锐,男,硕士研究生,主要从事惯性/卫星组合导航研究。

式也便于用户进行其他的实时操作,如当系统处于定向状态时可以与惯性器件进行组合等。

## 1 系统状态设计

### 1.1 系统的四种工作状态的定义

我们根据接收机的观测情况可以将定向系统的工作状态分为空闲、搜索、过滤和定向四个状态。

#### 1.1.1 空闲状态

空闲状态是指接收机没有足够的观测信息以致定向软件无法解算出载体的姿态。

这种状态的产生可分为两种情况:

1) 当运动载体经过高大的建筑物、树林、隧道等,观测不到任何卫星,无法进行定向,此时系统转入空闲状态。

2) 当接收机能观测到卫星,但当前历元两个接收机的共视星个数小于4颗,定向软件无法解算出载体的姿态,此时系统也会转入空闲状态。

#### 1.1.2 搜索状态

搜索状态是指当前历元已知的整周模糊度的个数小于3个时,需搜索剩余未知的整周模糊度。

这种状态根据待搜索的整周模糊度个数可以分为全搜索和半搜索两种模式。全搜索是指待搜索的整周模糊度个数为3个,半搜索是指待搜索的整周模糊度个数少于3个。下面对这两种搜索模式分别进行相关的说明:

##### A. 全搜索

这种模式的产生又可分为三种情况:

##### 1) 定向软件的初始化阶段

当启动接收机时,接收机第一次捕捉到信号,定向软件根据几何精度衰减因子 GDOP 最小原则选取4颗主星,搜索3个主星的双差模糊度,执行全搜索过程。

##### 2) 空闲状态转化为搜索状态的阶段

当上一历元,系统处于空闲状态,若当前历元观测到的共视星个数不小于4颗时,系统转入到全搜索状态。

##### 3) 前后两历元公共的共视卫星颗数为0或1

当上一历元与当前历元接收机的公共的共视卫星的颗数小于2时,在公共部分无法找到1个已知的双差整周模糊度,当前历元需要重新搜索3个整周模糊度,执行全搜索过程。

##### B. 半搜索

当接收机稳定跟踪(无周跳现象发生),且上一历元与当前历元公共的共视卫星的颗数为2或3

时,在公共部分可以找到1个或2个已知的整周模糊度,则当前历元待搜索的整周模糊度至多为2个。这样既利用到了上一历元的信息又减少模糊度搜索的时间,加快了搜索的进程。

#### 1.1.3 过滤状态

过滤状态是指对候选的模糊度组合采用各种约束和比例检验进行过滤,对始终满足各种约束和比例检验的组合予以保留,残差最小对应的模糊度组合即为正确的模糊度组合。

和其他几个状态相比,这个状态一般持续的时间较长。

#### 1.1.4 定向状态

定向状态是指用过滤得到的正确的模糊度组合求取精确的基线矢量解,之后由该基线矢量求取载体的航向角和俯仰角。

## 1.2 状态转换图及分析

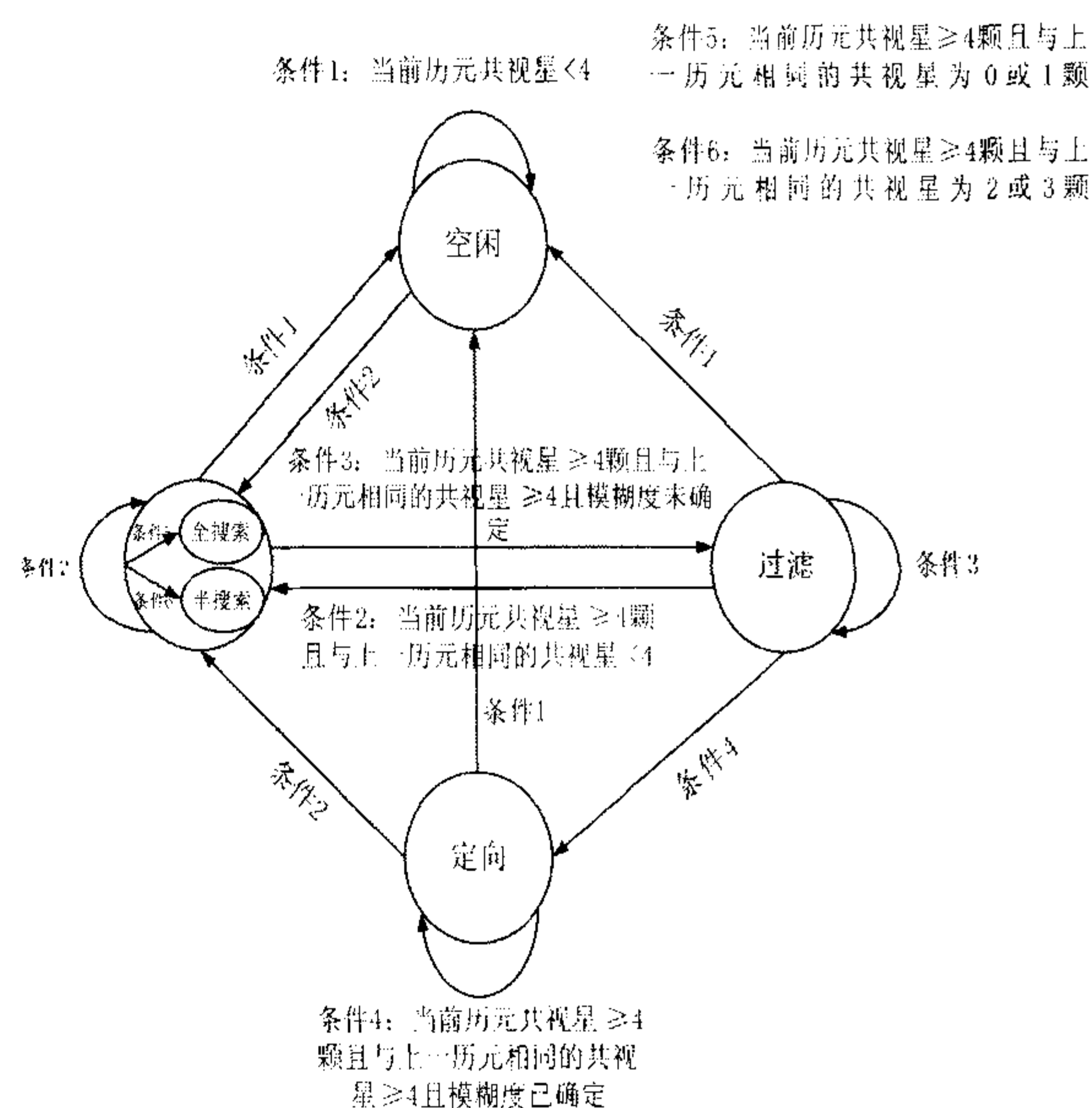


图1 状态转换关系图

该状态图中的状态转换原则是以上一历元的状态为基础,根据不同的转换条件推得当前历元的状态。按照正常的流程,状态转换顺序是空闲、搜索、过滤、定向。但接收机的观测环境总是在不断地变化,所以不能保证每次的状态转换都是按照如上的顺序。不同的观测条件触发得到不同的状态。下面对部分条件予以说明:

##### 条件1:

利用载波相位测量技术进行载体姿态的求解必须保证能观测到4颗以上的共视星,这样就可以建立3个以上的载波相位双差观测方程,从而能求出

基线矢量的 3 个未知分量。若当前历元能观测到的共视星个数小于 4 颗则无法进行定向,不论上一历元处于何种状态,在当前历元系统都会转入空闲状态。所以有空闲到空闲、搜索到空闲、过滤到空闲、定向到空闲的状态转换。

条件 2:

若当前历元的共视星个数小于 4 颗,且上一历元与当前历元公共的共视星的个数小于 4 颗时,公共部分已知的整周模糊度小于 3 个,当前历元还需要搜索未知的整周模糊度。所以有空闲到搜索、搜索到搜索、过滤到搜索、定向到搜索的状态转换。

条件 3:

若当前历元能观测到的共视星个数不小于 4 颗且与当前历元公共的共视星的个数不小于 4 颗但模糊度尚未确定时,可将公共部分的共视星全部作为当前历元的主星,当前历元除公共星外的其他星作为冗余星,这样可以得到当前历元所有星的模糊度。由于公共部分的主星双差模糊度大于 3 个(均为上一历元求出,对于当前历元来说是已知值),通过最小二乘法可直接求得基线矢量解,再由基线矢量反求冗余星模糊度,这样由上一历元的模糊度可推得当前历元所有可见星的模糊度。所以有搜索到过滤、过滤到过滤的状态转换。

条件 4:

若当前历元能观测到的共视星个数不小于 4 颗且与当前历元公共的共视星的个数不小于 4 颗且模糊度已确定时,可以利用已确定的正确的模糊度直接计算载体姿态,所以有过滤到定向、定向到定向的状态转换。

## 2 软件工作流程设计

### 2.1 软件整体设计

本软件的功能是根据接收机的观测数据文件和星历数据文件,计算系统的定向结果。总体设计的流程如下:

### 2.2 软件模块设计

#### 2.2.1 搜索模块

功能:根据观测数据和星历数据,得到候选的整周模糊度组合

输入:星历文件,每个接收机的观测文件,基线长度

输出:候选的整周模糊度组合

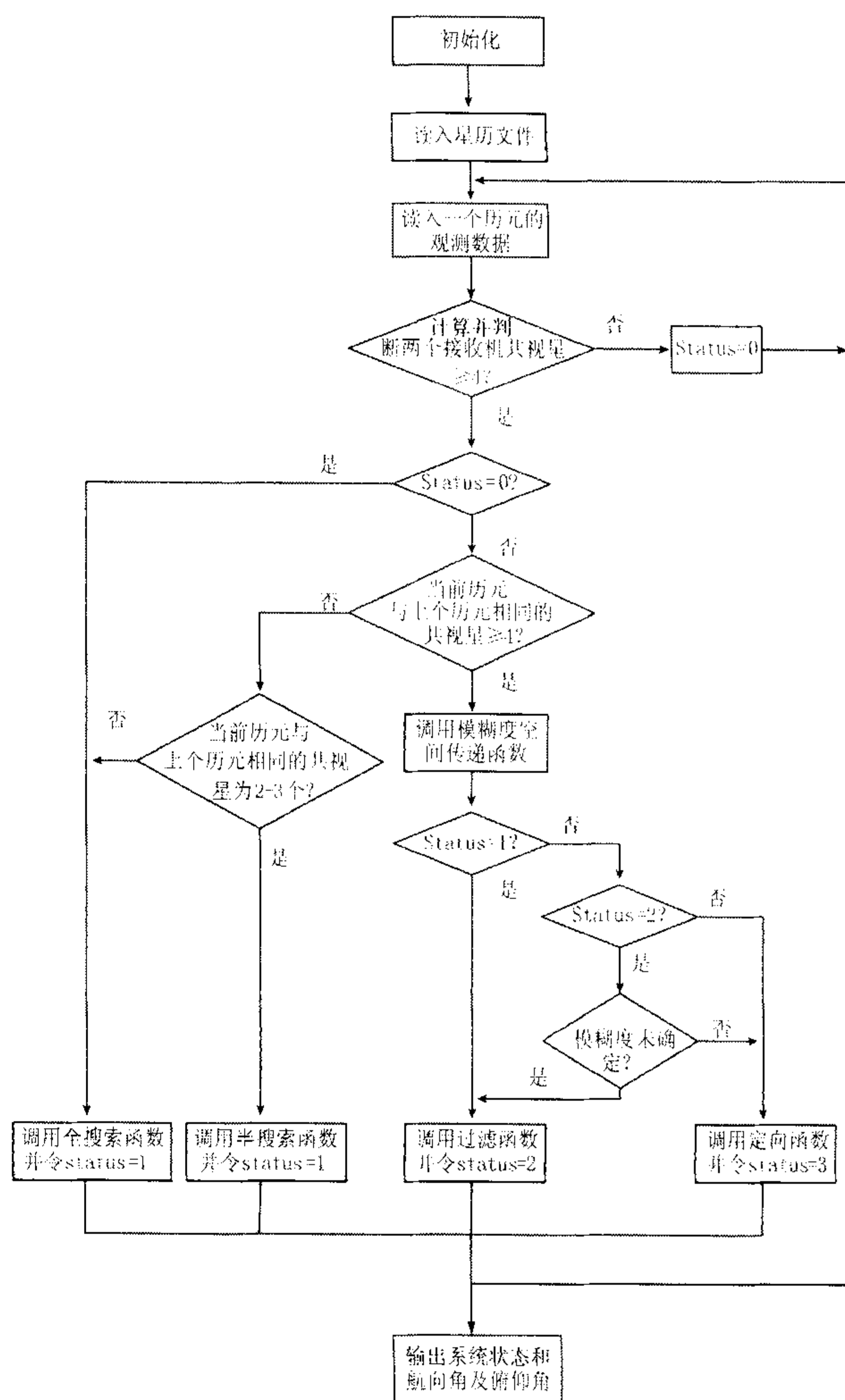


图2 软件设计总体流程图

流程:

- 1) 若与上个历元相同的共视星个数为 0 - 1 颗,则执行全搜索过程:
  - 1.1) 根据 GDOP 最小原则选取四颗主星<sup>[2]</sup>。
  - 1.2) 根据乔里斯基分解确定主星双差模糊度的搜索范围。
- 2) 若与上个历元相同的共视星个数为 2 - 3 颗,则执行半搜索过程:
  - 2.1) 计算与上个历元相同的共视星的模糊度。
    - 2.1.1) 若相同的共视星里含有上一历元的参考星,则无须计算,直接得到上一历元已求出的共视星的模糊度。
    - 2.1.2) 若相同的共视星里不含上一历元的参考星,则选取相同的共视星里仰角最高的星为参考星,并重新计算相同的共视星对新选定的参考星的模糊度。



2.2)包括相同的共视星在内,另外选取本历元的其他可见共视星构成四颗主星。

2.3)用全空间搜索的方式确定另外几个未知的主星双差模糊度的搜索范围。

3)模糊度搜索空间转化为基线矢量解空间。

4)用基线矢量反求所有冗余星双差模糊度。

5)建立所有可见星对参考星的双差观测方程,用最小二乘法求得每一个模糊度组合对应的基线矢量的精确解。

6)求每一个模糊度组合对应的残差二次型<sup>[3]</sup>。

#### 2.2.2 过滤模块

功能:检验搜索得到的所有的候选模糊度组合,剔除不正确的模糊度组合。

输入:候选模糊度组合。

输出:候选模糊度组合或正确的模糊度组合。

流程:

1)对每一候选的模糊度组合进行

1.1)长度约束检查

求取每一模糊度组合对应的基线矢量 $\vec{d}$ ,若 $\|\vec{d}\| \in [L - \delta L, L + \delta L]$ ,则保留该模糊度组合,否则剔除,其中 $\delta L$ 为允许的长度误差范围。

1.2)仰角约束检查

求取每一模糊度组合对应的俯仰角 $\alpha$ ,若 $\alpha \in [-\delta\alpha, +\delta\alpha]$ ,则保留该模糊度组合,否则剔除, $\delta\alpha$ 为仰角范围。

2)比例检验,记录比例检验成功的次数,并判断比较该次数与比例检验成功的最小次数的大小

2.1)若大于或等于最小次数则认为最小残差对应的模糊度组合为正确的模糊度组合;

2.2)若小于最小次数则继续进行比例检验。

#### 2.2.3 定向模块

功能:由过滤得到的正确的模糊度组合计算载体的航向角及高低角。

输入:本历元的观测数据、正确的模糊度组合。

输出:载体的航向角及俯仰角。

流程:

1)由正确的模糊度组合计算基线矢量;

2)由基线矢量计算载体在导航系下的航向角及俯仰角。

#### 2.2.4 模糊度空间传递模块

功能:由上一历元的模糊度空间推得当前历元

的模糊度空间。

输入:上一历元的模糊度空间,当前历元的观测数据。

输出:当前历元的模糊度空间。

流程:

1)计算当前历元与上个历元相同的共视星的模糊度;

1.1)若相同的共视星里含有上一历元的参考星,则无须处理,直接得到上一历元已求出相同的共视星对应的模糊度。

1.2)若相同的共视星里不含上一历元的参考星,则选取相同的共视星里仰角最高的星为参考星,将公共的共视星对应的模糊度对新选参考星对应的模糊度做差,得到公共的共视星的新的模糊度。

2)判断前后两历元相同的共视星数目与当前历元观测到的共视星数目的关系

2.1)若小于,则以相同的共视星全部作为当前历元的主星(不再以GDOP最小原则选取主星),以当前历元的其他星为冗余星,可由步骤1)求得的当前历元主星模糊度推得当前历元冗余星模糊度,这样即可得到当前历元所有星的模糊度。

2.2)若等于,则不用处理,可直接得到当前历元所有星的模糊度。

为了更好地阐述模糊度空间的传递过程,下面用示意图的方式来表示这一过程:

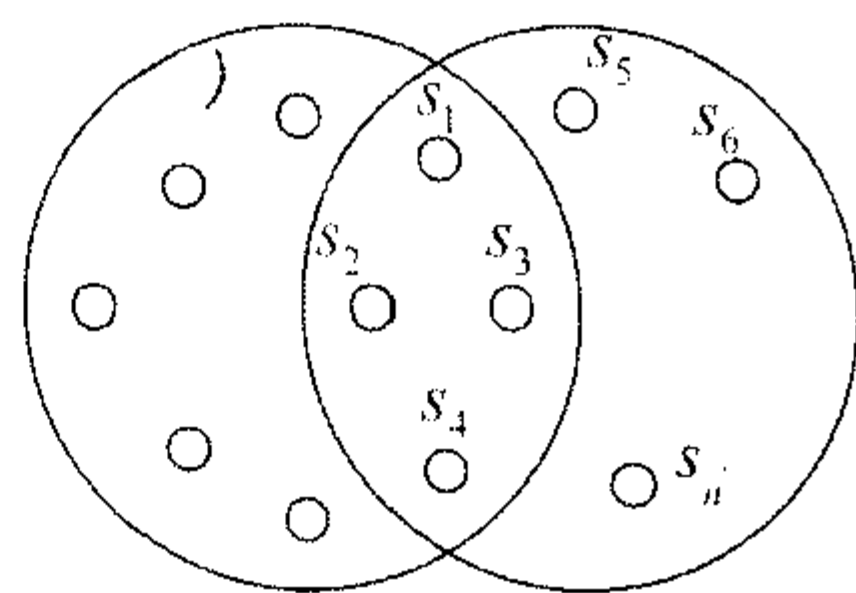


图3 前后两历元观测到的卫星示意图

这里假定前后两历元公共的共视星为4颗,分别为 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ ,且上一历元的参考星为 $s_1$ ,如图3所示。

假设上一历元的模糊度还未确定,且经过搜索后产生一个候选组合为 $m$ 的模糊度搜索空间 $m \times (n - 1)$ , $n$ 为上一历元卫星的数目。具体做法是:第一步,找到并取出交集部分卫星对 $s_1s_2$ 、 $s_1s_3$ 、 $s_1s_4$ 对应的双差模糊度列,得到 $m \times 3$ 的搜索空间。第二步,剔除完全相同的模糊度组合,但要保留上

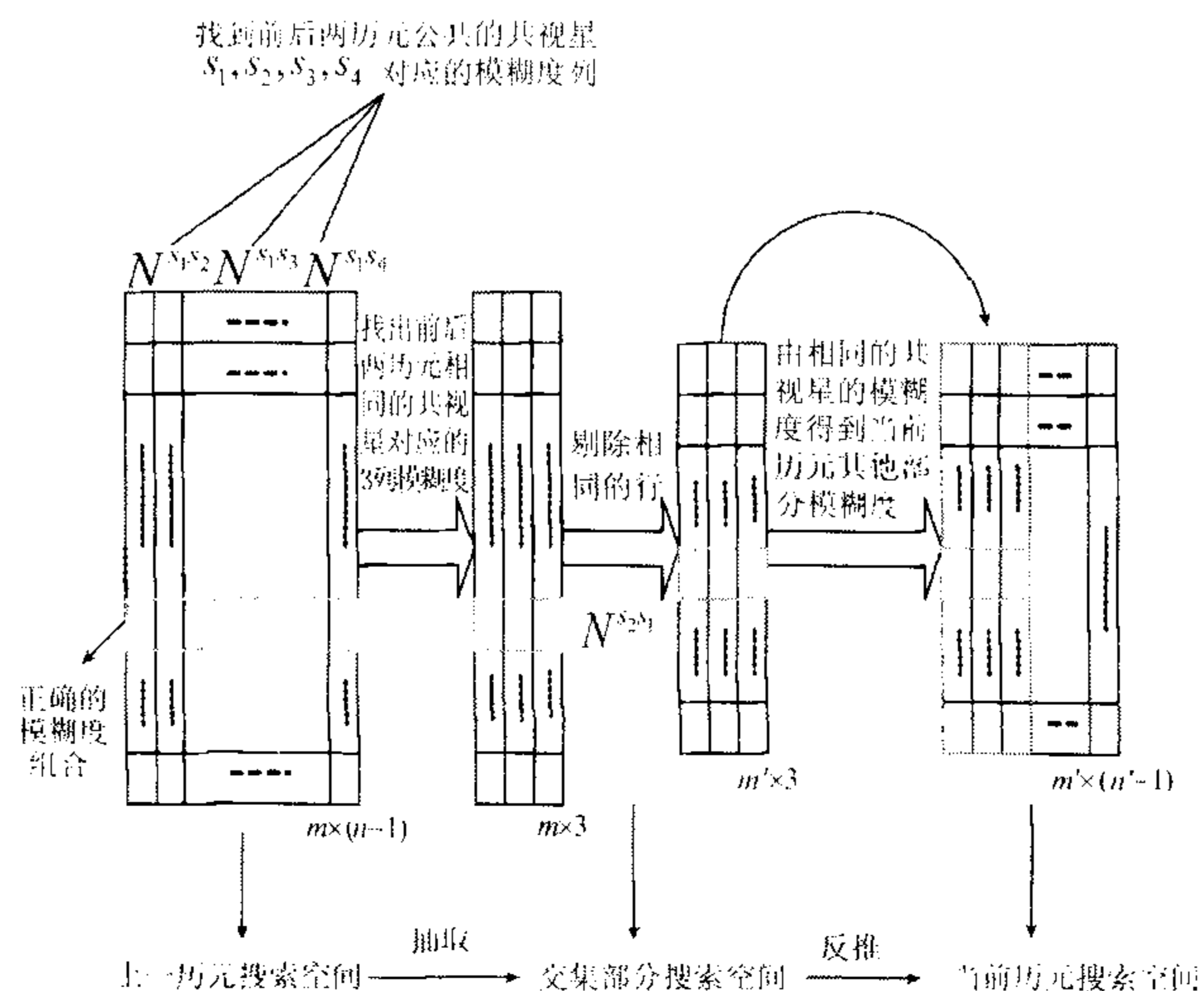


图4 模糊度空间传递示意图

一历元残差最小对应的模糊度组合, 剩余的组合数为  $m'$ 。第三步, 在  $m' \times 3$  的搜索空间中, 对该空间中的每一组合求取基线矢量, 利用该基线矢量反求当前历元非公共星  $s_5 - s_n$  的模糊度, 这样得到了当前历元的所有星的模糊度搜索空间  $m' \times (n' - 1)$ ,  $n'$  为当前历元卫星的数目。这就是模糊度空间的传递过程。

### 3 实验验证

为了验证该软件, 选用型号为 Novatel oemv-1 的接收机以及两个 Novatel 型 521 天线进行双天线定向实验。采样频率为 2Hz。实验时间为 2011 年 6 月, 实验地点为国防科技大学机电工程与自动化学院天台。基线长度为 2.9681m, 在实验之前已通过本实验室的电子陀螺经纬仪测得基线的航向角为 3.3078 度。

#### 3.1 静态试验

取第 600 - 1200 个历元的数据, 这段时间受到的外界环境的干扰较小。观测到的卫星有 10 颗, 且无变化, 星号为 20、26、24、19、7、8、28、11、17、32, 参考星为 8 号星。

实验结果如下:

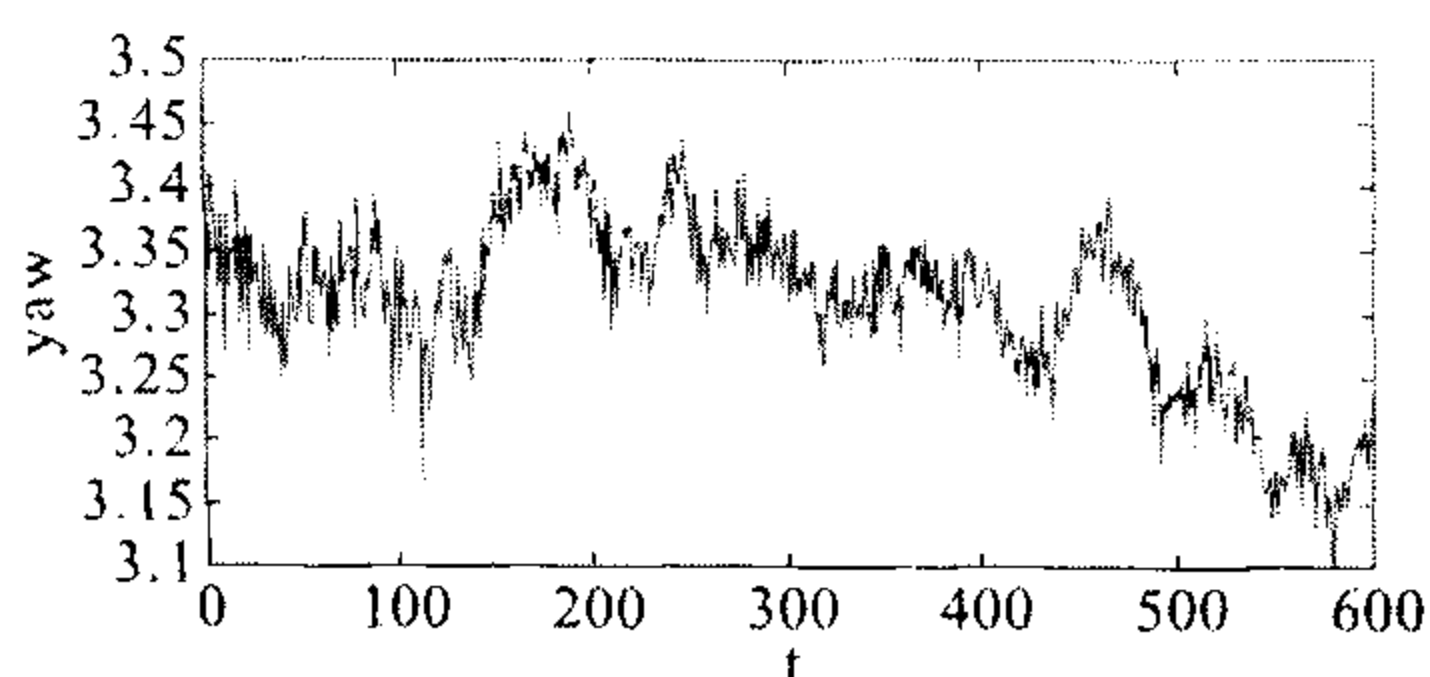


图5 航向角随时间的变化图

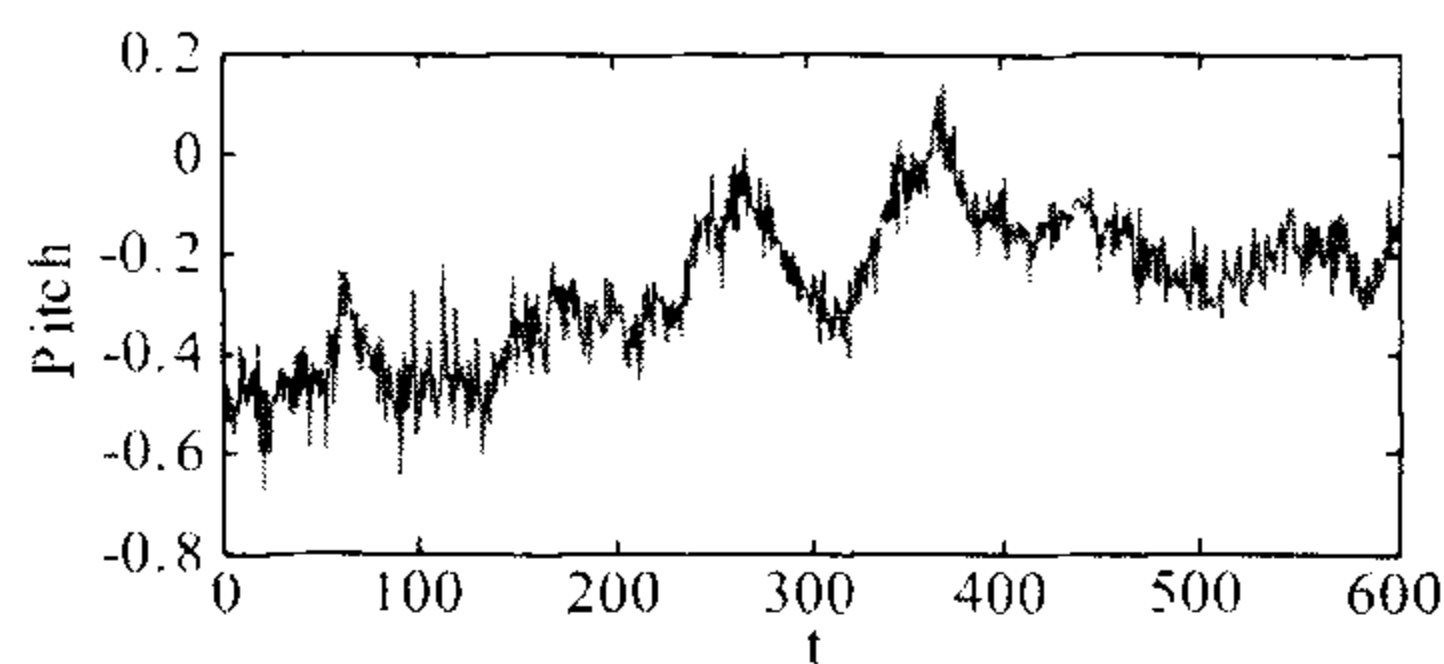


图6 俯仰角随时间的变化图

表1 航向角和俯仰角的统计参数表

静态试验	均值	标准差
航向角(度)	3.3092	0.0674
俯仰角(度)	-0.2642	0.1440

#### 3.2 变星试验

考虑到实验条件有限, 要在动态环境下验证软件比较困难, 所以本实验采用半实物仿真的方式进行试验。具体做法是人为地对静态观测数据进行处理, 如在第 600 个历元观测到的卫星为 20、26、24、19、7、8、28、11、17、32, 我们从数据文件中直接去掉 20、26、24 号星的观测数据, 这三颗去掉的星可视为被遮挡的星。

为了更好地说明软件的作用, 我们假设载体处于这样一种环境, 载体在 0 - 300 个历元的时间段内时有遮挡, 且遮挡规律是每隔 10 个历元遮挡一次, 一次持续时间为 10 个历元, 遮挡的星为 1 到 4 颗不等, 且每次遮挡的星均是随机选择的。

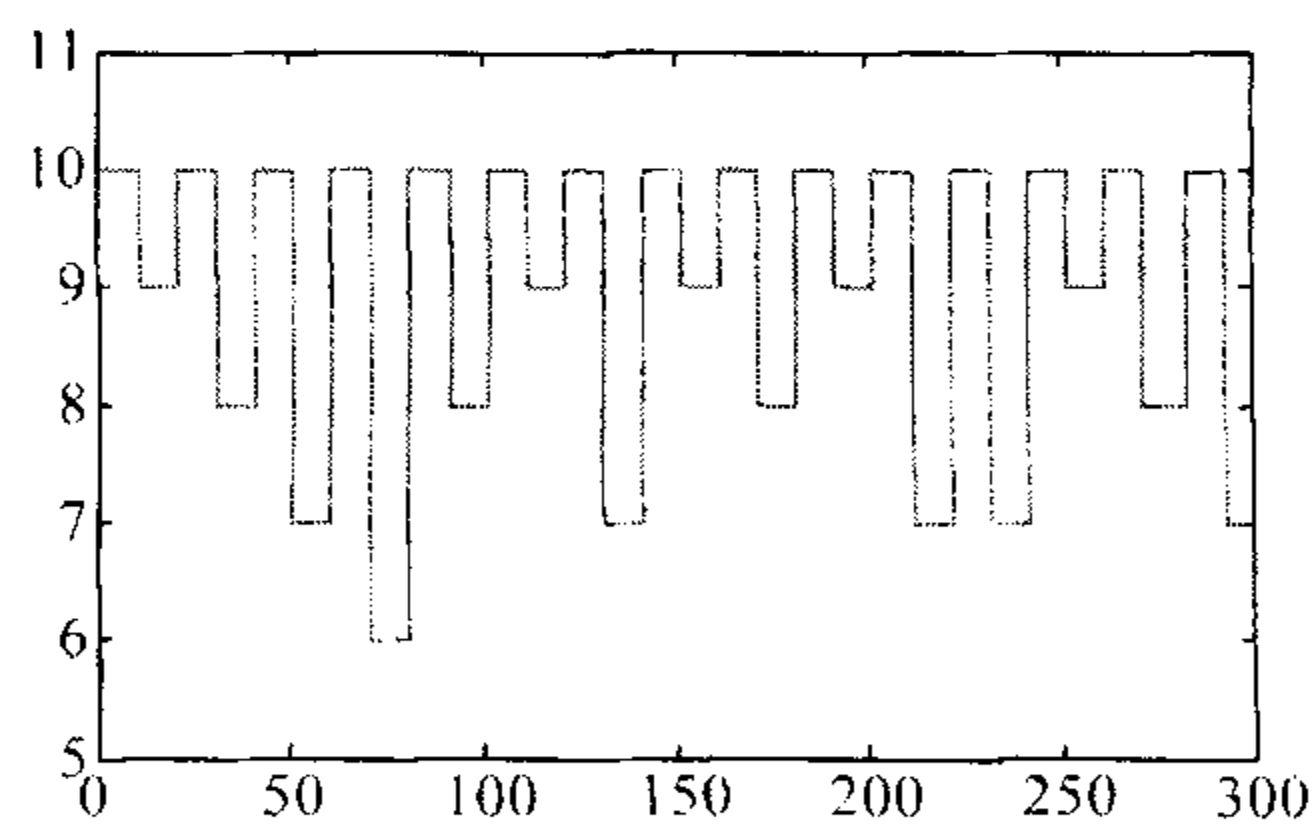


图6 卫星数目随时间的变化图

仿真结果如下:

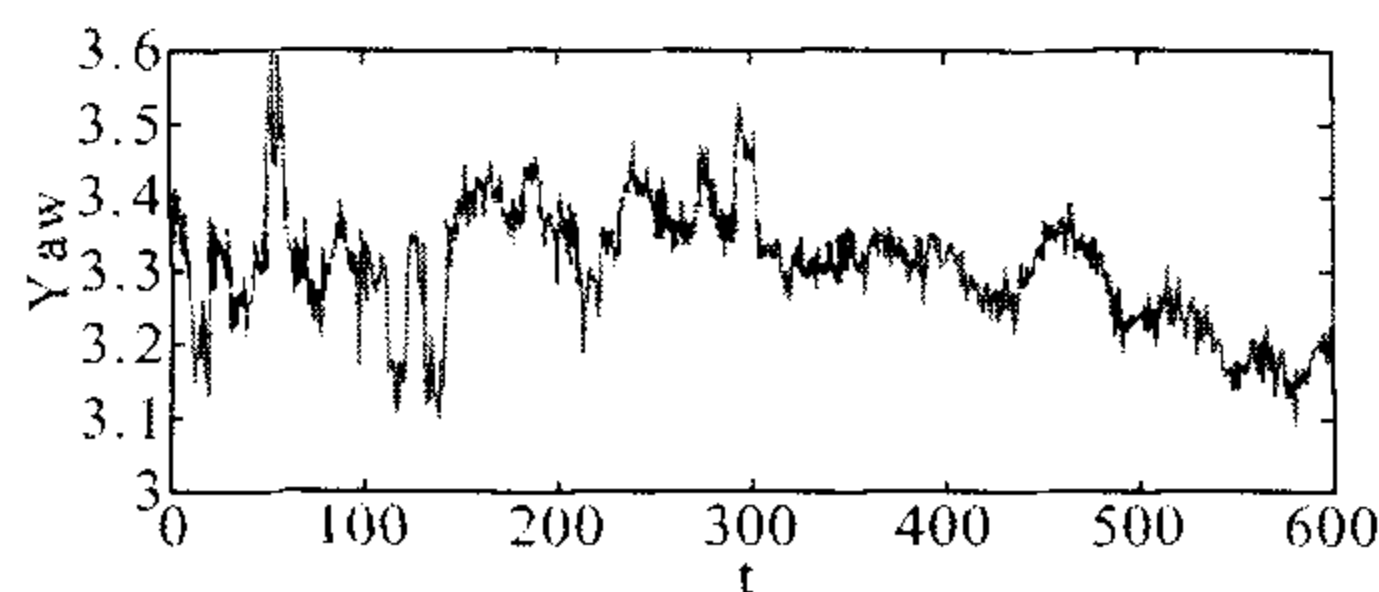


图7 航向角随时间的变化图

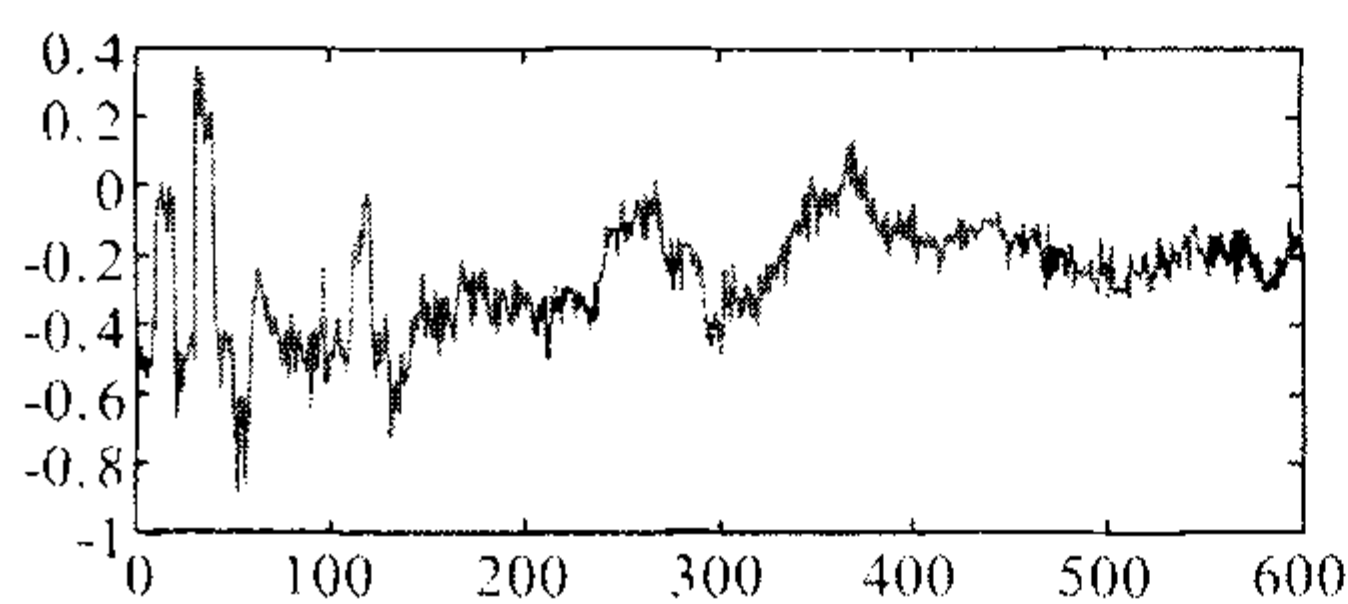


图8 俯仰角随时间的变化图

表2 航向角和俯仰角的统计参数表

变星试验	均值	标准差
航向角(度)	3.3049	0.0831
俯仰角(度)	-0.2538	0.1680

从表1和表2可以发现,静态试验和变星试验航向角的均值均接近电子陀螺经纬仪测得的航向角,这说明实验结果是可信的。

另外,对比图5和图7以及图6和图8可以发现变星后较变星前的航向角和俯仰角的波动稍大,但它们的统计参数差别不大,这说明变星后的结果也是可信的。产生波动的原因是卫星的数目发生变化导致观测量的个数发生变化,进而导致姿态解算结果发生微小变化。变星试验的结果至少可以说明在频繁的变星环境中本软件是适用的。

## 4 结论

本文将系统的工作情况划分为四种状态,用户可时刻了解系统的进程,并根据系统的运行情况进行相关的实时处理。文章的出发点在于能适应复杂的观测环境,尤其是变星比较频繁的环境。在变星过程中本文的处理思路是由前后两历元公共的共视星的模糊度来推得当前历元所有星的模糊度,即模糊度空间的传递,这避免了模糊度的重新搜索过程,节省了模糊度解算的时间。本文从理论和半实物仿真的角度来分析是切实可行的,且实验结果比较理想。但现实环境是十分复杂的,要想投入到工程应用还需要大量的现场验证。这也是作者下一步将做的工作。

## 参考文献

- [1] 吴美平,胡小平. 卫星定向技术[M]. 长沙,国防科技大学出版社,2007:19-20.
- [2] 张守信. GPS卫星测定定位理论与应用[M]. 长沙,国防科技大学出版社,1996:91-92.
- [3] 逯亮清. GPS快速定向技术研究[硕士学位论文]. 国防科技大学,2001.

(上接第15页)

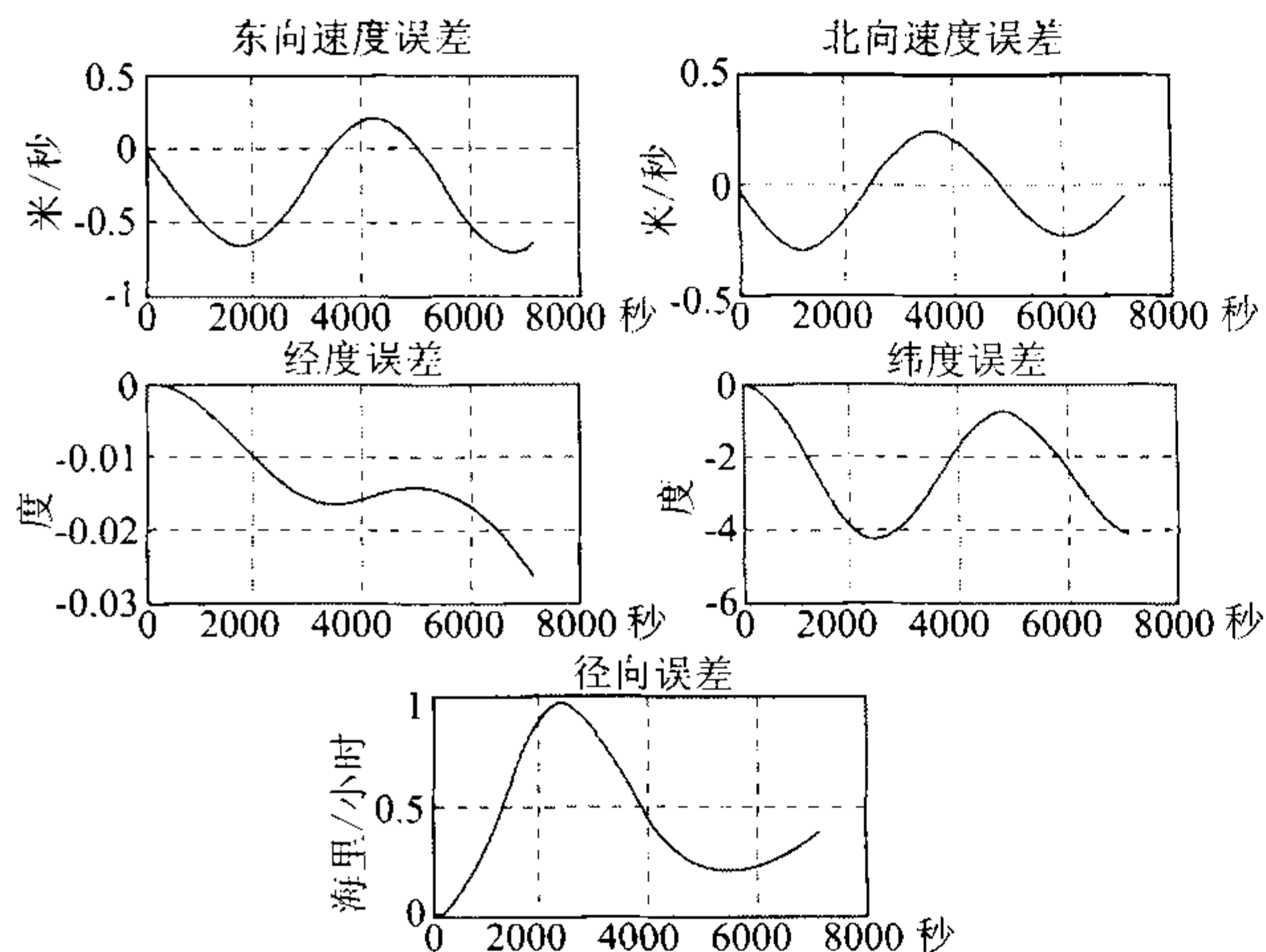


图5 动基座自对准导航试验误差曲线

## 4 结论

本文通过某型激光惯导系统岸边系泊和海上抛锚两种环境的动基座自对准试验研究,验证了基于惯性系的粗对准算法以及降阶变噪声卡尔曼滤波算法在上述对准环境下的适应性,提出了海上动态环

境下激光惯导实现高精度对准的工程方法:利用基于惯性系重力加速度的粗对准算法获得了较高精度的初始姿态和航向,在此基础上利用降阶卡尔曼滤波对姿态和航向残差进行估计和修正,可以实现岸边系泊和海上抛锚两种环境动基座条件下高精度对准。

## 参考文献

- [1] 王慧南, GPS导航原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 秦永元,严恭敏,顾冬晴,郑吉兵. 摇摆基座上基于信息的捷联惯导粗对准研究[J]. 西北工业大学学报, 2005年19月,第23卷第5期:682-683.
- [3] 段江锋,秦永元,张亮,顾冬晴,较大幅度摇摆条件下舰船捷联惯导自对准研究[J]. 弹箭与制导学报,2005,第25卷第1期:130-132.
- [4] 王养柱, 动态环境下捷联惯性导航系统设计与研究[D], 北京航空航天大学博士学位论文,2001年2月,第二章:29-31.
- [5] 张光天等,捷联惯性导航技术[M], 国防工业出版社, 2007年12月,第十章:10.5海上对准.



## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>