



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

## 研究生学位论文开题报告

报告题目 惯导辅助高轨卫星导航接收机信号捕获与跟踪技术研究

学生姓名 张春杰 学号 202128019427044

指导教师 葛建 职称 高级工程师

学位类别 工学硕士

学科专业 信息与信号处理

研究方向 组合导航

研究所（院系） 中国科学院空天信息创新研究院

填表日期

中国科学院大学制

# 1、选题的背景与意义

高轨航天器，如地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)、高偏心轨道(Highly Elliptical Orbit, HEO)卫星以及月球深空探测器等，在卫星通信、气象探测、未知天体和环境探测等领域有着重要用途。当前，高轨卫星主要依赖地面测控实现轨道确定。随着高轨航天器种类和数量日益增多，高轨航天器对高精度定轨需求逐步提高，传统地面测控系统资源日趋紧张。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能为使用者提供全天时、全天候、实时、连续、高精度的三维位置、三维速度和时间信息，已广泛应用于陆、海、空载具和低轨(Low Earth Orbit, LEO)航天器。如果能将 GNSS 导航方式拓展到高轨空间，会对缓解地面测控压力、实现高轨航天器自主导航、提高定轨精度有着极大的帮助。

20 世纪 80 年代，美国提出了在 GEO 卫星上使用 GPS(Global Positioning System)导航的概念。2000 年美国提出了空间服务空域(Space Service Volume, SSV)的概念，并在 2006 年正式描述了 SSV 的概念，明确卫星导航需要在 SSV(轨道高度 3000~36000km)高轨空间提供导航服务，同时也给出了 GPS 高轨接收功率分析、覆盖性分析及信号可用性评估。后续许多国家的学者对 SSV 展开了大量的研究工作，美国、欧洲和中国等先后研制出用于高轨空间的卫星导航接收机，并开展了在轨验证试验，奠定了 GNSS 高轨应用的基础。于此同时 SSV 的概念也得到了拓展，主要体现在：

1) 轨道高度不再局限于 3000~36000km，而是包含了小于 3000km 的近地轨道以及 36000km 以上的高轨轨道甚至地月轨道；

2) 导航方式不局限于 GNSS，而是使用一切可以利用的导航方式，如惯性导航(Inertial Navigation, INS)、脉冲星导航等，都纳入了 SSV 的范畴之内；

3) SSV 的核心问题不再局限于为航天器提供 PNT(Positioning, Navigating, Timing)服务，而是综合了所有与完成 PNT 服务相关的技术环节，不仅包含导航信号的接收和处理，也包含了性能评价体系的建立和服务标准的制定，形成一项综合性的系统工程。

我国在 2016 年提出大力发展以北斗导航定位系统为核心的综合 PNT 体系，

要求 PNT 体系能提供全时段、空天地海全域覆盖的高度安全可信的定位导航授时服务。在高轨空间实现**卫星导航**是建设我国综合 PNT 体系的重要一环。实现卫星定位的前提是准确地捕获并跟踪上导航卫星的信号。由于在高轨空间导航卫星信号传播距离长、信号弱、卫星可见性差、几何精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)差等特点, 因此需要研究适用于高轨航天器的卫星导航接收机。

不同于地面或低轨卫星导航接收机, 高轨卫星导航接收机通常只能接收来自地球另一侧的导航卫星发出的旁瓣信号, 且高轨接收机与导航卫星之间的距离更加遥远。这使得接收机接收到的旁瓣信号功率更加微弱, 普通接收机难以实现捕获跟踪。另一方面, **高轨空间导航卫星的可见性较差**, 在航天器运行过程中换星的发生比较频繁, 导致接收机需要重新捕获卫星信号。另外, 高轨航天器在近地点附近运动速度较快, 多普勒频率和多普勒频率变化率较大, 给卫星信号的捕获和跟踪带来了巨大的挑战。

多传感器融合是提升高轨接收机性能的重要手段, 也是综合 PNT 体系的关键技术手段之一。惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)具有无需接收外界信号, 短时间内精度较高, 环境适应性强, 可提供高频(100Hz 以上)位置解等特点, 可用于辅助接收机进行导航卫星信号的捕获与跟踪。在信号捕获环节, 接收机可以通过惯性导航解算获得接收机大概的速度和位置信息, 再根据星历估算导航卫星的速度和位置, 从而缩小捕获过程中多普勒频率和码相位的搜索范围, 提升信号捕获的效率和成功率; 在信号跟踪环节, GNSS/INS 进行深组合, 可以利用惯导提供的动态信息, 使接收机工作在准静态条件下, 从而提升信号跟踪的精度和灵敏度。

本文主要研究了惯性导航辅助高轨导航卫星接收机信号捕获与跟踪技术, 旨在提高高轨接收机信号的捕获效率和信号跟踪的精度, 进而提升高轨航天器的自主导航能力和自主导航的可靠性, 一定程度上推动高轨接收机技术的发展。

## 2、国内外本学科领域的发展现状与趋势

从 20 世纪末开始, 对高轨 GNSS 自主导航技术的在轨验证一直在进行中。

高轨接收机在轨试验可大体分为两个阶段：

第一阶段，对已经成熟的商业或低轨导航接收机进行改造，提高信号接收灵敏度和高轨环境适应能力，具有代表性的有 AO-40、GIOVE-A 等高轨航天器搭载的 GPS 接收机。它们验证了高轨 GNSS 技术的可行性，但距离产品应用仍存在一定的差距。

第二阶段，各国均针对高轨航天器技术特点，展开了高灵敏度信号处理和导航解算技术研究，并研制出针对高轨航天器的卫星导航接收机，并取得了在轨实际应用。如美国磁层多尺度任务卫星(MMS)搭载的 GSFC Navigator GPS 接收机在 17 万千米的轨道上仍可收到 GPS 信号，位置精度小于 60m，证明了 GPS 覆盖范围可以更高。我国的 GEO 轨道通信技术试验二号星(TJS-2)完成了北斗导航信号兼容接收，并达到了 27m、0.03m/s 的位置和速度精度。

随着卫星导航技术发展和芯片处理能力的提高，目前研制的星载 GNSS 接收机通过简单配置，可适用于 LEO、HEO、GEO 等不同场景，具有较强的轨道适应能力。接下来本节将对高轨接收机信号捕获与跟踪技术研究现状进行总结。

## 2.1 高轨接收机信号捕获技术研究现状

传统的捕获技术主要可分为时域串行捕获、并行码相位捕获和并行频率搜索三种。高轨空间由于导航卫星信号传播距离长，且通常只能接收到旁瓣信号等特点，高轨接收机需要有更高的灵敏度，才能捕获导航卫星的信号。在高灵敏度信号捕获技术方面，David M. Lin 等人提出了一种使用较少的步骤，来处理较长的数据的相干累积和非相干累积操作，被称为双块补零算法(Double Block Zero Padding, DBZP)。Mark L.Psiaki 提出了半位法和全位法这两种弱信号捕获算法，它们能改善数据比特翻转造成的性能损失。Nesreen I. Ziedan 提出了改进的 DBZP 算法——多重数据位循环相关算法，同时结合了 FFT(Fast Fourier Transform)技术，提升了捕获性能。巴晓辉等人提出了一种基于差分相干的自适应门限捕获算法，该算法能有效地减少在积分过程中由平方计算引起的平方损耗。莫建文第一次把 DBZP 和差分相干算法组合起来，并提出 FFT、差分相干、DBZP 和频率误差修正技术这四种技术，并基于上述四种技术改进了信号捕获算法，该算法能有

效降低 FFT 计算过程中有关的功率损失，同时也减小了残余的多普勒频率引起的功率损失，显著提高了捕获性能。杨燕姣通过使用秒级的积分时长提高积分增益以及码多普勒补偿设计降低信号处理损耗，获得高灵敏度捕获性能，另外结合信号的特点与应用环境设计精细捕获模式，进一步提高捕获结果的可靠性。测试表明对北斗 B1I 信号和 GPS L1CA 信号可以达到优于 18dB-Hz 的捕获灵敏度。近年来，有学者根据导航信号自相关峰值在时域上的稀疏特性，提出了利用稀疏傅里叶变换(Sparse Fourier Transform, SFT)实现卫星信号捕获方法，可有效提高捕获性能和运算效率。

上述信号捕获算法均在一定程度上提高了接收机的捕获灵敏度，为卫星导航接收机在高轨运行环境的进一步应用提供了参考。但这些算法大多没有经过在轨试验。文献[ ]给出了 GSFC Navigator GPS 接收机的基于 FFT 循环相关的弱信号捕获方法。仿真分析结果表明，该捕获算法可完成 25dB-Hz 微弱导航信号的快速捕获，且实际在轨应用也达到了预期效果。为提高捕获处理效率和降低处理器资源，提出了一种基于梳状滤波器(comb filters)架构的高灵敏度信号捕获方法，在伪码搜索前通过 comb 滤波器完成相干积分，在 TJS-2 任务中的高轨接收机使用了此方法。

尽管这些算法在弱信号捕获上具有一定的优势，但仍无法充分应对高轨环境带来的挑战。以 HEO 航天器 AO-40 为例，由于在近地点附近运动速度较大，对 GPS L1 信号的多普勒频移最大值将超过 40kHz，对北斗 B1 信号的多普勒最大值甚至会超过 60kHz。而如果是应用于地面的接收机，多普勒频移往往不超过 10kHz。由于在高轨空间导航卫星信号弱，需要较长时间的相干积分，所以在信号捕获时要减小频率搜索的步长。仿真表明如果使用长度为 20ms 的相干积分，需要频率搜索步长小于 35Hz 才能完成捕获。大多普勒搜索范围和小频率搜索步长导致高轨接收机在信号捕获时需要非常多的搜索次数，成为了限制信号捕获效率的主要因素。

如果能够在信号捕获之前获取接收机粗略的位置和速度信息，扣除接收机运动带来的影响，则可以大幅减小频率搜索范围，提升信号捕获的效率。利用惯性导航可以获取接收机的位置和速度信息，进而辅助接收机进行信号捕获。叶萍、何晓峰等人对比了有惯导辅助和无惯导辅助下接收机在冷启动、温启动、热启动

时的平均信号捕获时间，发现有惯导辅助的情况下，无论是哪种启动方式，平均捕获时间都大幅缩短。Groves 和 Kubark 等人发现有惯导辅助的情况下，接收机可以捕获载噪比更低的信号，接收机具有更高的灵敏度。Feng Qin 等人使用不同误差水平的惯导器件辅助接收机进行信号捕获，仿真结果表明惯导的精度越低，速度误差越大，信号不获所需要的频率搜索范围也越大。Chunxi Zhang 等人还研究了如何使用惯导缩小码相位的搜索范围，对于长码的捕获有一定参考价值。

## 2.2 高轨接收机信号跟踪技术研究现状

信号捕获的精度决定了信号能否成功跟踪，而信号跟踪的精度直接决定了卫星定位的精度。传统接收机采用延时锁定环(Delay Lock Loop, DLL)跟踪伪码，使用锁相环(Phase Lock Loop, PLL)或锁频环(Frequency Lock Loop, FLL)跟踪载波。环路通常由一个鉴频器/鉴相器、环路滤波器和控制本地载波频率的数控振荡器(Numerically-controlled Oscillator, NCO)组成。加长相干积分时间，压缩环路带宽是提高信号跟踪质量的常用手段。为了方便使用更长的积分时间提高接收机的弱信号跟踪能力，各大导航系统都增加了不含点位数据的导频通道，如 GPS L5 信号和北斗 B1C 信号，便于进行长时间的相干积分，提高捕获和跟踪的灵敏度。为了进一步提高跟踪灵敏度，Yunhang Zhu 等利用卡尔曼滤波算法代替传统的跟踪环路，提高了信号跟踪精度。严昆仑等提出了一种基于 FFT 的鉴频器，增强了弱信号的跟踪能力。采用矢量跟踪技术，联合跟踪多个通道上所有的卫星信号，可进一步提高跟踪灵敏度。Lashley 第一次证实了矢量跟踪环路在弱信号和高动态环境下有更好的表现。Li Hui 等利用矢量延迟锁定环(Vector Delay Lock Loop, VDLL)和矢量频率锁定环(Vector Frequency Lock Loop, VFLL)对传统跟踪算法进行改进，并使用真实的 GPS 数据对提出的算法进行验证，结果显示矢量跟踪算法要优于传统跟踪算法。对于星载接收机来说，其自身的运动轨迹本身就有一定的规律。文献[]在利用轨道动力学模型和 GNSS 观测量实现高轨定轨滤波的基础上，使用轨道滤波结果辅助跟踪环路，将跟踪灵敏度提升至 11dB-Hz。杨洁等对矢量跟踪算法进行改进，利用轨道动力学模型对导航参数进行一步预测，从而实现了对各通道信号跟踪参数的准确预测及联合跟踪，提高了高轨空间中弱信号的



跟踪性能及可用性，并对中断信号具有一定的桥接能力。

上述无辅助的跟踪环路尽管通过各种各样的改进，在灵敏度和鲁棒性上有一定提升，但必须在动态性能和抗噪声性能之间进行权衡。使用惯导辅助 GNSS 信号跟踪是解决这一问题的重要手段。GNSS 和 INS 进行深组合——导航接收机为 INS 提供误差校正，INS 提供导航信息辅助 GNSS 进行捕获跟踪。在高动态场景下，惯导能剔除大部分接收机动态，使得接收机工作在准静态环境下。因此环路带宽可以缩小，相干积分时间可以加长，信号跟踪的精度得以提高。班亚龙建立了高动态条件下标量深组合系统的误差模型，基于 MEMS(Micro Electronic Mechanical System)惯导实现了高动态圆周运动场景下的载波相位稳定跟踪。BAE System 公司研制的 NavStrike 系列 GPS/INS 深组合接收机在高动态条件下能提供高精度定位结果，已经用于武器系统的精确制导。张提升将惯导算法和误差模型引入深组合模型，建立了惯导误差和 GNSS 基带跟踪性能的理论定量关系，并进行了相应的测试。严昆仑研究了城市复杂环境下的高精度标量深组合基带技术，实现了车载接收机 26dB-Hz 的载波相位跟踪灵敏度。

### 3、课题主要研究内容及预期目标

从上世纪八十年代至今，许多专家学者在高轨 GNSS 信号可用性分析、高轨接收机信号捕获与跟踪、高轨航天器定轨等方面进行了大量研究。为了增强高轨空间卫星导航的稳健性，本课题主要研究惯导辅助下的高轨卫星导航接收机(HEO 接收机)信号失锁后对信号进行重新捕获与跟踪。

#### 3.1 研究内容

##### (1) HEO 轨道 GNSS 信号可用性分析

通过模拟器输入航天器运行的轨迹，模拟航天器在高轨的运行过程。由于本文仅研究信号的捕获与跟踪，因此重点分析卫星可见性、换星的频繁程度，以及在一个周期内 GNSS 信号多普勒频率的变化范围和多普勒频率变化率的变化范围。找出在哪些位置会因为换星或多普勒频率变化快导致接收机需要进行信号重

新捕获和跟踪，进而证明进行本课题研究的必要性。

### (2) 惯导辅助 HEO 轨道接收机信号捕获算法的研究

首先学习惯导机械编排算法和惯导误差模型，为惯导辅助接收机信号捕获奠定基础。其次用导航信号模拟器模拟卫星信号中断、仅使用惯导进行导航的场景，通过观察惯导误差的发散水平来决定信号重新捕获时频率的搜索范围。然后学习卫星轨道动力学相关的知识，将轨道动力学和惯导相结合，尝试进一步减小卫星导航信号消失时惯导的误差，进而进一步缩小信号捕获的频率搜索范围。

### (3) 惯导辅助 HEO 轨道接收机信号跟踪算法的研究

学习 GNSS/INS 深组合算法，构建一套深组合软件仿真平台。然后在此基础上研究现有的惯导辅助的信号跟踪算法，并比较他们的优缺点。分析现有跟踪算法在处理高轨信号时的表现，针对高轨信号的特点对跟踪算法进行修改，从而增强跟踪精度和灵敏度。

## 3.2 预期目标

针对以上研究内容，本课题的预期目标具体如下：

(1) 使用 STK(Satellite Tool Kit)软件分析 HEO 轨道 GNSS 信号可用性，找出 GNSS 信号容易失锁的位置，验证进行本课题研究的必要性。

(2) 在 GNSS 信号失锁时，结合轨道动力学和惯导来推算失锁期间**高贵**航天器的位置，从而减小信号重新捕获时的频率搜索范围。由于使用了轨道动力学，一定程度上能减小惯导的误差传播，使得接收机可以进一步缩小频率搜索范围，或接收机在不增加频率搜索次数的条件下可以使用误差更大的惯导。

(3) 研制 GNSS/INS 仿真平台，并在此基础上针对高轨空间的特点改进信号跟踪算法，提升了信号跟踪的灵敏度。

## 4、拟采用的研究方法、实验方案、技术路线、可行性分析

### 4.1 研究方法、实验方案



## 4.2 技术路线

- 1) 学习惯导机机械编排算法、惯导误差建模和 GNSS/INS 深组合相关知识；
- 2) 学习并使用导航模拟器，根据载体运动轨迹生成对应的 GNSS 信号数据和对应的惯导数据；
- 3) 对现有的惯导辅助接收机进行信号捕获与跟踪的方法进行调研，比较不同算法的优劣，寻找更适用于高轨接收机的算法；
- 4) 使用 STK 软件对导航星座进行仿真，研究高轨接收机在运动过程中可能发生信号失锁的位置，验证研究信号重新捕获的必要性；
- 5) 在卫星信号失锁期间，利用卫星轨道动力学和惯导结合对接收机的位置速度进行估计，缩小纯惯导推算的误差，提升信号重新捕获的效率；
- 6) 开发 GNSS/INS 软件仿真平台，在此基础上对现有的信号跟踪算法进行改进，提升信号跟踪的灵敏度与精度。

## 4.3 可行性分析

首先，美国、中国、欧洲都进行了高轨航天器在轨试验，验证了高轨卫星导航的可行性，且在弱信号和高动态情况下的捕获和跟踪技术已经被充分地研究。其次，GNSS/INS 组合早在上世纪末就已投入研究，有许多学者验证过在惯导的辅助下可以提高接收机信号捕获的效率、提升信号捕获与跟踪的灵敏度。最后，本人所在的实验室参与过高轨接收机的研制工作，在高轨航天器信号捕获、跟踪与定位领域有丰富的经验。

综上所述，本课题的研究内容可行。

# 5、已有科研基础与所需的科研条件

## 5.1 已有的科研基础

(1) 通过对高轨航天器自主导航、惯导辅助接收机信号捕获与跟踪技术的调研，对卫星轨道动力学、高轨接收机和 GNSS/INS 深组合技术的发展有了一定的

认识。对提高信号捕获精度和捕获效率的方法有一定了解。对提高信号跟踪精度的方法有一定的了解。

(2) 本人所在课题组承担过高轨接收机的研发工作，老师们具有丰富的高轨接收机实践经验，对本人的科研工作有重要指导作用。

## 5.2 所需科研条件

(1) 计算机一台，用于算法的设计与数据分析。

(2) 卫星信号模拟器一台，用于仿真高轨接收机的运动轨迹以及相应的导航卫星数据和惯导数据。

## 6、研究工作计划与进度安排

依据本课题的研究内容及技术路线，拟将课题分为三部分逐步完成。

第一部分：学习 GNSS 信号捕获和跟踪算法；学习惯导机械编排算法和惯导误差模型；学习 GNSS/INS 深组合算法。

第二部分：学习导航信号模拟器的使用。用模拟器模拟高轨航天器轨迹，获取对应的 GNSS 数据和 IMU 数据。

第三部分：【】。

根据课题的整个时间跨度，做出以下的时间安排：