



**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 低轨卫星导航性能评估

学生姓名 江旭东 学号 2018E8017261021

指导教师 徐颖 职称 研究员

学位类别 工程硕士

学科专业 电子与通信工程

研究方向 卫星导航增强技术

研究所（院系） 中国科学院空天信息创新研究院

填表日期 2019 年 11 月 16 日

中国科学院大学制



---

## 目 录

1.	选题的背景与意义 .....	1
2.	国内外本学科领域的发展现状与趋势 .....	3
2.1	国内外低轨卫星导航发展现状.....	3
2.2	低轨卫星导航性能评估研究现状.....	4
3.	课题的主要研究内容和预期目标 .....	7
3.1	研究内容.....	7
3.2	预期目标.....	7
4.	拟采用的研究方法、实验方案、技术路线、可行性分析 .....	8
4.1	研究方法、实验方案.....	8
4.2	技术路线.....	15
4.3	可行性分析.....	16
5.	已有科研基础与所需的科研条件 .....	17
5.1	已有的科研基础.....	17
5.2	所需科研条件.....	17
6.	研究工作计划与进度安排 .....	18
	参考文献.....	19



---

## 1. 选题的背景与意义

低轨道（Low Earth Orbit, LEO）卫星系统主要是指运行在低轨道平台的卫星系统，即轨道飞行高度为 200~2000km 的卫星集合。由于低轨卫星距离地面较近，低轨道卫星主要用于遥感，通过遥感卫星获得目标物体高分辨率图像，获得的数据可监测到农业、林业、海洋、国土、环保、气象等情况。低轨道卫星也用于通信，多个通信卫星组成的通讯系统可以实现真正的全球覆盖。低轨道高度使得卫星通信的传输延时短，路径损耗小，质量高。低轨道卫星是最新最有前途的卫星移动通信系统。

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）是重要的时空信息基础设施，已广泛应用于导航、定位和授时的众多领域，在国民经济建设与国防安全领域发挥着十分重要的作用<sup>[1-2]</sup>。我国的北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）也广泛地用于交通管理、天气监测、抢险救灾、智能农业和国防建设中。但随着科学技术的发展和生产生活需要的提高，GNSS 定位精度有限、室内和偏远地区信号强度弱、易受干扰等问题逐渐影响着用户的体验。

人们一直尝试着用各种方式提升卫星导航系统的性能。这些卫星导航增强系统按照导航增强方式可分为两大类：（1）信息增强。信息增强一般是指通过地面跟踪网数据来解算误差改正数和完好性信息，用户接收到 GNSS 的误差改正数后就能够修正 GNSS 的信号误差，从而提高卫星定位精度和完好性。信息增强方式提高了用户实时定位的精度，但是只能在有 GNSS 覆盖的情况下才有作用。

（2）信号增强。信号增强技术是指从信号源头进行增强，即通过其他地基或者星基的平台来发射导航信号，使得用户在使用 GNSS 定位效果不佳的场景中依然可以通过其他导航平台进行导航定位。

随着商业航天的蓬勃发展，基于低轨卫星星座的导航增强技术正成为热点。低轨卫星几何位置改变快的特点以及通信速率大的特点为导航增强研究提供了契机。人们在探讨如何利用这样的 LEO 星座来增强 GNSS 导航功能，甚至可以

---

作为完全独立的备份。与位于中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)中的 GNSS 系统相比,LEO 卫星具有更接近地球的优势,因此经历较少的路径损耗并且可能提供更强的信号,更能适应干扰。LEO 卫星在天空中也有更快的运动,几分钟就可以从头顶飞过(相对于 MEO 卫星的几小时)。这些星座的加入增加了几何多样性,减小了定位精度衰减因子(Dilution of Precision, DOP)<sup>[6]</sup>。与地基信号增强相比,低轨卫星信号覆盖范围更大,对于高度 650 km 的卫星,半波束角为 60° 的信号覆盖半径大于 2500 km<sup>[3]</sup>。低轨卫星平台能够实现全球范围的信号增强。低轨星座具有地面接收信号强、几何图形变化快的优势,能够与中高轨 GNSS 星座形成互补,有望实现对导航系统精度、完好性、连续性和可用性的全面增强。

使用低轨卫星进行导航增强,就必须要对低轨卫星导航性能进行评估,从而判断低轨卫星进行导航增强的能力。低轨卫星导航性能的评估内容主要分为低轨卫星导航的信号性能、与 GNSS 的兼容性和对 GNSS 的增强性能三部分。低轨卫星导航的信号性能评估还应该考虑低轨卫星的一些特性,特别是低轨卫星一般采用较高 Ka/Ku 波段,受降雨衰减的影响较为严重。在室内或者遮蔽物较多的情况下,低轨卫星的信号强度也值得分析。低轨卫星加入导航系统后,还需要评估与 GNSS 星座的兼容性以及与 GNSS 联合定位能力的问题。

对于使用低轨卫星导航增强的用户,需要比较直观有效的方式对低轨卫星的导航性能做出评估。对于低轨卫星星座的设计者,也需要根据实际条件的约束下得出合理的低轨卫星星座设计方案。所以研发出一个低轨卫星导航性能评估软件是有重要意义的。本课题的研究可以在一定程度上推动我国低轨卫星导航性能评估体系的发展,有利于我国低轨卫星的整体建设。

---

## 2. 国内外本学科领域的发展现状与趋势

### 2.1 国内外低轨卫星导航发展现状

自 20 世纪 90 年代以来, 欧美等发达国家相继掀起了两次低轨星座发展热潮。上世纪九十年代初期, 面向个人移动通信服务, 低轨卫星迎来第一次发展热潮, 摩托罗拉、劳拉、阿尔卡特、波音等公司相继提出二十多种低轨星座方案, 陆续建成极具代表性的 Iridium(铱星)、ORBCOMM、Globalstar 等低轨卫星通信系统。

第 1 代铱星系统于 1998 年 5 月建成, 空间段由 66 颗低轨卫星均匀分布在 6 个近圆极轨道上, 每个轨道 11 颗, 高度 780 km, 倾角  $86.4^{\circ}$ , 顺行轨道面夹角  $31.6^{\circ}$ , 逆行轨道面夹角  $22^{\circ}$ , 顺行轨道面间相邻主星相位差  $16.4^{\circ}$ <sup>[4]</sup>。铱星地面上行和下行链路使用 Ka 频段; 卫星语音和数据信号发射使用 L 波段 (1616-1626.5 MHz), 目前由 Satelles 公司取得唯一授权发射专用 STL (satellite time and location) 脉冲信号, 既可以提供独立的导航、定位和授时 (PNT) 服务, 也能对 GNSS 系统进行信号增强。目前, 铱星系统已于 2019 年 1 月 11 日完成了全部卫星的更新换代, “铱星二代”空间段由 66 颗主星和 9 颗备份星构成<sup>[5]</sup>。到了最近几年, 在互联网应用、微小卫星制造和低成本发射等技术发展的驱动下, 面向卫星互联网接入服务, 低轨星座研究迎来规模更大、更猛烈的第二次发展热潮, 2015 年以来, 国际企业 OneWeb、Space X、Boeing 和 Samsung, 国内的中国的航天科技集团和航天科工集团等, 先后宣布发射和部署各自的商用低轨星座, 卫星数量由数十至上万颗不等, 初衷是为了从太空提供全球范围内、无缝稳定的宽带互联网通信服务。低轨星座建设进入蓬勃发展时期。文献[6]从整个系统的架构, 包括星座几何图形条件、空间信号测距误差、星载原子钟性能和定轨方法等方面, 全面探索其扩展成为导航增强星座的可能性, 结果令人振奋。航天科技的“鸿雁”星座和航天科工的“虹云”工程等都将搭载导航增强有效载荷, 既能为我国北斗导航卫星系统提供增强改正数和完好性信息, 又能够自主地播发导航测距信号, 增强 PNT 服务性能。2018 年 3 月, 中国科学院光电研究院依托天仪研究院研制的卫

---

星平台,开展了低轨卫星导航信号增强在轨试验,旨在验证通信与导航增强在信号层面深度融合新体制的功能和性能,探索基于低轨卫星导航信号增强的应用模式。试验卫星轨道高度 537 km,导航增强信号采用时分多载波体制、S 频段播发,信号发射功率 33 dBmW,落地电平-129~-118.5 dBmW,卫星过境时长约 10 min。2018 年 6 月 2 日,武汉大学研制的“珞珈一号”科学实验卫星 01 星(Luojia-1A)成功发射,是我国开展低轨夜光遥感、导航增强卫星研究以及集成化空间信息系统建设的有益探索。“珞珈一号”01 星位于高度 645 km 的太阳同步轨道,同样使用(OCXO)代替原子钟。初步导航性能显示,星历内符合精度为 0.1 m,钟差稳定度为  $3 \times 10^{-10}$ ,伪距和载波测量精度分别为 2.6 m 和 0.013 m,高仰角条件下优于 1.5 m 和 1.7 mm,因而能够联合现有的 GNSS 增强实时导航服务<sup>[3,7]</sup>。2018 年下半年,“鸿雁”星座、“虹云”工程和北京未来导航科技有限公司的“微厘空间”,均发射了各自的首颗验证卫星开展测试论证工作。预计 2023 年前后,全球将形成多个低轨星座增强 Multi-GNSS 的新局面<sup>[8]</sup>。

## 2.2 低轨卫星导航性能评估研究现状

目前卫星导航性能的评估主要集中在 GNSS 方面,低轨卫星导航性能评估的研究较少。文献[9] 建立北斗卫星导航系统性能评估体系,系统研究卫星导航系统的基本理论、模型、方法,并自主设计进而研制了以北斗系统为主、兼顾 GPS、GLONASS、Galileo 的性能评估软件系统,实现了从空间信号层到服务层性能综合评估的较为完善的体系。该文从影响高精度定位的载波观测值的数据质量入手,对比分析相同环境下北斗系统与 GPS 的载噪比、多路径和噪声水平。文献[10]主要针对 GNSS 空间信号质量评估内容及方法、GNSS 空间信号畸变现象产生机理、GNSS 空间信号畸变对测距性能影响三个方面来展开研究,并给出 GNSS 信号质量评估结果。文献[20]提出了卫星导航信号体制的性能评估方法,并评估了 Compass 信号的性能。该评估方法包含了精度、抗干扰、抗多径、兼容性四个方面的内容,分别采用 Gabor 带宽、解调抗窄带/匹配谱干扰品质因数、跟踪抗窄带/匹配谱干扰品质因数、多径误差包络、连续平均多径误差包络、谱分离系数、



---

谱安全指数等指标来刻画这些方面的性能。

由于低轨卫星一般采用频率较高的 Ka/Ku 波段，在信号的空间传播中易受雨衰影响。文献[23]主要分析了影响 Ka 频段卫星通信信号传播的衰减因素，着重探讨了降雨对信号造成的衰减。该文还详尽地讨论了雨衰减预测模型，包括 ITU-R 模型、DAH 模型及其相应的改进形式，并对这几种模型进行了细致的比较。文献[24]总结了国际上流行的七种降雨衰减预报模型(Crane Global 模型，Assis Einloft Improved 模型，SAM 模型，DAH 模型，ITU R 模型，UK 模型和 China 模型)及其特点、相关参数和计算步骤，给出了 Ka 频段雨衰特性的测量系统的结构，详述了实验方案，各个模块的功能和实验参数，实验数据的检测、记录和初步处理方法，使用 Matlab 软件针对不同谱分布、不同参数的特征衰减进行了仿真计算分析。文献[25]介绍了 Ka 频段卫星通信国内外发展情况，讨论了降雨对电波传播的影响，利用 ITU—R 雨衰预报模型对我国的雨衰情况做了详细计算分析。

卫星信号的兼容性评估方面，文献[26]全面分析了 GNSS 信号兼容评估的模型和方法，分别构建基于频谱分离系数 (Spectral Separation Coefficient, SSC) 和码跟踪谱灵敏度系数 (Code Tracking Spectral Sensitivity Coefficient, CT\_SSC) 的兼容评估模型，确立有效载噪比衰减作为 L、C、S 频段 GNSS 信号兼容评估的通用方法，仿真计算各频段兼容性，并对结果进行评估。

卫星导航增强性能评估方面，精度衰减因子是重要的评定参数。DOP 的数值大小取决于卫星星座的位置、可见卫星数目、卫星高度及方位这几个因素，它用于反映地面站与可见卫星星座的几何关系。通过精确测定 DOP 值，可以衡量卫星星座的位置精度。小的 DOP 值表示强的卫星几何位置和精度的较高概率，大的 DOP 值表示弱的卫星几何位置和精度的较低概率。很多学者讨论了普通导航卫星系统共用时的 DOP 值的改善情况。文献[29]在北斗和 GNSS 兼容与互操作条件下，分析全球导航定位定时用户的卫星可见性和精度衰减因子改善情况，利用仿真数据分析北斗卫星导航系统对全球用户的贡献，侧重分析北斗卫星导航系统与 GPS，GLONASS 和 Galileo 多卫星导航系统组合模式下用户获得的收益。仿真效果显示，多个导航系统的共同使用，将极大改善卫星的几

---

何分布，获得 DOP 值的改善，显著提高导航定位服务的可用性。文献[31]通过 STK 软件中的卫星数据库模拟了 GLONASS 卫星星座，根据 GPS 卫星的设计参数设计卫星星座。对 GPS、GLONASS、GPS/GLONASS 组合的卫星可见数与 GDOP 值在昆明地区进行了比较。得出两个系统的组合比单独的 GPS 单独系统的 GDOP 值降低了 18.7%，比单独 GLONASS 单独系统 GDOP 值降低了 24.8%。文献[32] 基于 STK 从可见卫星数量和 GDOP 两个方面对铱星的导航性能进行了仿真和分析。同时将其与 GPS 和 GALILEO 系统进行了比较，以证明其性能。实验表明铱星卫星系统在两极具有良好的覆盖优点，甚至优于 GPS 和 GALILEO。但是铱星的全球覆盖范围不稳定，GDOP 从高纬度区域向低纬度区域急剧变化。文献[30] 研究基于鸿雁单颗 LEO 卫星和 GEO 轨道卫星资源实现天基卫星导航备份问题，提出了基于单颗 LEO 和 3 颗 GEO 卫星和基于单颗 LEO 和 2 颗 GEO 卫星构成的导航备份方案，分别建立了两种系统模型，给出了相应的定位授时体制，并通过数值计算仿真，分析了波束覆盖区域内的 GDOP 和覆盖性、定位授时的统计分布和不同测距误差下的定位授时精度。文献[19]分别从数学和测量角度研究了 GDOP 的最小值，结论表明 GDOP 越小，星座卫星布局越均匀。基于该结论构建了用于度量星座空间布局均匀度的两个因子：瞬时星座几何构型品质因数和平均几何构型品质因数，并验证了可行性。分析了 DOP 采样在时空域上的变化特点，研究了最佳空间颗粒度和时间颗粒度，提出了受限条件下的精度评估模型，实验表明可视卫星方位角的分布密度与观测点的纬度具有密切关系。

---

### 3. 课题的主要研究内容和预期目标

#### 3.1 研究内容

##### (1) 低轨卫星导航性能评估体系研究

通过对国内外文献的调研,分析现有/未来的低轨导航/通信卫星星座的性能,构建一套低轨导航卫星性能评估体系。

评估低轨卫星的导航信号性能。包括导航信号功率、测距精度、导航定位精度、抗干扰性能等指标;根据当前低轨星座的设计评估其特有性能,如评估 Ka/Ku 波段信号的空间传播特性、室内定位性能等。

评估低轨星座与 GNSS 星座的兼容性。评估低轨星座信号与北斗、GPS 等导航信号之间的兼容性。

评估低轨卫星对 GNSS 的导航增强性能。评估低轨星座对 GNSS 星座的 DOP 值改善情况;评估低轨星座与 GNSS 星座联合定位情况。

##### (2) 低轨卫星导航性能评估软件研发

研发一套低轨卫星导航性能评估软件,能够对当前低轨卫星星座的导航性能进行可视化评估;并具备根据约束条件下的参数设定给出合理的低轨卫星星座设计的功能。

##### (3) 低轨卫星实测数据性能验证

根据我国低轨卫星导航星座的建设情况,利用实验室的低轨监测站的接收数据,对实际的低轨导航星座的性能进行评估,验证评估体系的正确性。

#### 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) 通过对低轨卫星导航性能评估体系研究,对具体低轨星座的导航信号性能、与 GNSS 星座的兼容性以及对 GNSS 的增强性能等提出评估分析报告。

(2) 完成低轨卫星导航性能评估软件的研发。

(3) 通过实验室低轨监测站的接收数据,检验评估方法的正确性。

---

## 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

#### 1. 低轨卫星导航性能评估体系研究

##### (1) 低轨卫星导航性能评估

低轨卫星导航信号的一些指标的评估可以参考 GNSS 的评估通用性方法。如评估低轨卫星信号功率、测距精度、导航定位精度、抗干扰性能等指标，可以利用标准差、均方根误差(rms)、95%分位数误差等参数评估。

低轨卫星导航性能评估内容还应包括低轨星座的特有的性能。由于低轨卫星主要采用频率较高的 Ka/Ku 波段，信号强度受降雨衰减的影响较为严重，所以本课题需要评估雨衰对低轨卫星信号的影响。本课题采用文献[33]提出的 ITU-R 雨衰预报模型进行低轨卫星信号雨衰分析计算，从而评估低轨卫星信号强度能否用于导航增强。

ITU-R 模型是国际上各个无线通信协会广泛认可的雨衰预报模型，与 1982 年写入 ITU-R 组织的无线通信建议书中，并一直在不断地更新，以使雨衰模型更加易于理解和全面，通用性更好。其中，ITU-R Rec.618.8 模型是用于 55GHz 以下频段的卫星通信系统倾斜路径降雨衰减的长期统计均值的估计模型，该模型适用于 Ka/Ku 频段，简单易用，输入变量少，平均精度高。

本课题以 Ka 波段为例进行雨衰分析。在进行雨衰值估计时，信号的衰减程度与降雨率、降雨高度、传播路径长度、信号频率等参数有关，而降雨率和降雨高度则是预测雨衰所需要的最重要的两个参量。ITU-R 模型中会用到以 1 分钟为积分时间的降雨率  $R_{0.01}(\text{mm/h})$  来计算雨衰率的值。雨衰率即指单位传输路径上的衰减量，单位是 dB/km，它取决于电波的极化方式和降雨强度，计算公式如下：

$$\gamma(\text{dB/km}) = k(R_{0.01})^\alpha \quad (4-1)$$

其中， $k$  和  $\alpha$  是与频率有关的回归系数，计算表达式如下：

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \quad (4-2)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k \quad (4-3)$$

上式中,  $\theta$  为天线仰角;  $\tau$  是极化面倾角 ( $\tau=0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  分别代表水平极化、圆极化和垂直极化方式);  $k_H$ 、 $\alpha_H$  表示的是水平极化系数;  $k_V$ 、 $\alpha_V$  是垂直极化系数。用于 Ka 波段信号衰减回归系数  $k_H$ 、 $\alpha_H$ 、 $k_V$ 、 $\alpha_V$  的计算式为:

$$k_H = \frac{f^2}{0.818f^2 - 2749.5\ln(f) + 13400.5} \quad (4-4)$$

$$k_V = -52.573f \ln(f) - 0.495f^2 \ln(f) + 3.228f^2 + 164.8f - 280.6\ln(f) \quad (4-5)$$

$$\alpha_H = \frac{0.85 - 0.088 \ln(f) - 0.28(\ln(f))^2 + 0.105(\ln(f))^3 - 0.005(\ln(f))^4}{1 - 1.14 \ln(f) + 0.78(\ln(f))^2 - 0.32(\ln(f))^3 + 0.067(\ln(f))^4 - 0.01(\ln(f))^5} \quad (4-6)$$

$$\alpha_V = \frac{0.83 - 0.09 \ln(f) - 0.28(\ln(f))^2 + 0.105(\ln(f))^3 - 0.005(\ln(f))^4}{1 - 1.14 \ln(f) + 0.77(\ln(f))^2 - 0.31(\ln(f))^3 + 0.065(\ln(f))^4 - 0.01(\ln(f))^5} \quad (4-7)$$

将 Ka 波段的频率带入式(4-4)~(4-7)中, 可得出  $k_H$ 、 $\alpha_H$ 、 $k_V$ 、 $\alpha_V$  的值。

假设信号穿过雨区的长度为  $L(\text{km})$ , 降雨在信号的传播路径上是均匀的, 那么总雨衰可由雨衰率的积分得出:

$$A(\text{dB}) = \int_0^L \gamma dl \quad (4-8)$$

但在真实的传播路径上, 降雨率是随机的, 导致雨衰率也是时变的。于是引入等效路径长度的概念, 即将信号穿过雨区的路径上降雨的非均匀性进行均匀化, 为此而引入能起等效作用的路径缩短因子来确定电波传播的有效路径长度, 使得有效路径长度与雨衰率乘积恰好是实际的雨衰值, 这就是 ITU-R 模型的核心思想。

ITU-R 模型所需参数有: ①  $R_{0.01}(\text{mm/h})$ : 当地平均一年内 0.01% 时间被超过的降雨率(mm/h); ②  $h_s$ : 地面站海拔高度(km); ③  $h_R$ : 雨顶高度(km); ④

$\phi$ : 地面站纬度( $^{\circ}$ ); ⑤  $\theta$ : 地面站天线仰角( $^{\circ}$ ); ⑥  $\tau$ : 极化角( $^{\circ}$ ); ⑦  $f$ : 工作频率(GHz); ⑧  $R_e$ : 地球等效半径(8500km)。

ITU-R 模型预测雨衰的步骤为:

第 1 步: 计算雨顶高度  $h_R$ , 即有效降雨高度的值, 它是关于接收地面站纬度  $\phi$  的分段函数:

$$h_R(\text{km}) = \begin{cases} 3.0 + 0.028\phi & (0^{\circ} \leq \phi \leq 36^{\circ}) \\ 4.0 - 0.075(\phi - 36) & (\phi \geq 36^{\circ}) \end{cases} \quad (4-9)$$

第 2 步: 由雨顶高度  $h_R$ 、天线仰角  $\theta$  以及接收地面站的海拔高度  $h_s$  可计算出电波经过雨区的倾斜路径长度  $L_s$  及其水平投影  $L_G$  的值。

$$L_s(\theta)(\text{km}) = \begin{cases} (h_R - h_s) / \sin \theta & \theta \geq 5^{\circ} \\ \frac{2(h_R - h_s)}{\left[ \sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{1/2} + \sin \theta} & \theta < 5^{\circ} \end{cases} \quad (4-10)$$

$$L_G(\theta)(\text{km}) = L_s \cos \theta \quad (4-11)$$

第 3 步: 获取降雨速率  $R_{0.01}$  的值, 即当地平均一年内 0.01% 时间被超过的降雨率值。

第 4 步: 计算时间概率为 0.01% 的路径缩短因子  $r_{0.01}$  的值, 该公式仅适用于  $R_{0.01} \leq 100 \text{km/h}$  的情况:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + L_G / [35 \exp(-0.015 R_{0.01})]} \quad (4-12)$$

第 5 步: 计算雨衰率  $\gamma_{0.01}$ :

$$\gamma_{0.01}(\text{dB/km}) = k(R_{0.01})^{\alpha} \quad (4-13)$$

第 6 步: 年平均 0.01% 时间将被超过的降雨衰减估计值为:

$$A_{0.01} = \gamma_{0.01} L_s r_{0.01} \quad (4-14)$$

第7步：时间概率为  $p\%$ （ $p\%$  取值从 0.001%~1%）的雨衰估计值  $A_p(\text{dB})$  可由时间概率是 0.01% 的雨衰值  $A_{0.01}(\text{dB})$  通过下式计算得出：

$$A_p = 0.12 p^{-(0.546+0.043 \log p)} A_{0.01} \quad (4-15)$$

上述即是 ITU-R 模型预测降雨衰减值的详细计算步骤。

低轨卫星距离地球表面近，地面接收信号强度高，有利于改善信号受遮蔽环境下的定位性能。所以本课题通过对电磁波穿透墙体的衰减特性进行分析，对低轨卫星室内定位性能做出评估。

## （2）低轨卫星信号与 GNSS 信号的兼容性评估

兼容性是指两个或多个系统同时工作时，不会引起冲突，相对于单个系统工作的情况不会产生显著的性能下降，即系统间干扰引起的性能降低应在一个可接受的范围内。本课题建立低轨卫星信号与 GNSS 导航信号兼容性评估的模型，对其兼容性进行评估。文献[34-38]提出了等效载噪比的概念，并基于谱分离系数给出了等效载噪比的计算方法。谱分离系数反映信号重叠程度，等效载噪比衰减反映信号性能下降程度。本课题采用分析码跟踪谱灵敏度系数、谱分离系数和等效载噪比衰减的方法评估兼容性。

在同时存在噪声和干扰的接受环境中，噪声加干扰信号的合成功率谱密度可表示为

$$G_w(f) = N_0 + P_J G_J(f) \quad (4-16)$$

式中， $N_0$  为噪声功率谱密度， $P_J$  为干扰功率， $G_J(f)$  为归一化的干扰功率谱密度。

相干 EML 环路中，码跟踪谱灵敏度系数  $\eta_{J,s}$  为

$$\eta_{J,s} = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_J(f) G_{S_0}(f) \sin^2(\pi f d T_c) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_{S_0}(f) \sin^2(\pi f d T_c) df} \quad (4-17)$$

式中， $\beta_r$  为接受带宽， $G_w(f)$  为干扰功率谱密度， $G_{S_0}(f)$  为信号的归一化功率谱密度。 $d$  为归一化的相关器间隔。

干扰对相干 EML 环路的影响可用等效载噪比降级表示为

$$\left( \frac{C}{N_0} \right) = \frac{N_0}{N_0 + P_J \eta_{J,s}} \quad (4-18)$$

其 dB 形式的表达式为:

$$\left( \frac{C}{N_0} \right) (\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{N_0}{N_0 + P_J \eta_{J,s}} \right) \quad (4-19)$$

非相干 EMLP 环路的情况较为复杂。\$d \rightarrow 0\$ 时, 谱分离系数 \$\kappa\_{J,s}\$ 为

$$\kappa_{J,s} = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_J(f) G_{S_0}(f) \cos^2(\pi f d T_c) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_{S_0}(f) \cos^2(\pi f d T_c) df} = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_J(f) G_{S_0}(f) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_{S_0}(f) df} \quad (4-20)$$

干扰对非相干 EMLP 环路的影响可用码跟踪性能降级表示为

$$DEG_{CT} = \frac{(\sigma^2)_n}{(\sigma^2)_J} \quad (4-21)$$

其 dB 形式的表达式为:

$$DEG_{CT} (\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{(\sigma^2)_n}{(\sigma^2)_J} \right) \quad (4-22)$$

式中, \$(\sigma^2)\_n\$ 为不存在干扰时的码跟踪方差, \$(\sigma^2)\_J\$ 为引入干扰后的码跟踪方差。

系统内有效载噪比衰减可以表示为

$$\Delta \left( \frac{C_s}{N_0} \right)_{\text{eff}} = \frac{\frac{C_s}{N_0}}{\frac{C_s}{N_0 + I_{\text{Intra}}}} = 1 + \frac{I_{\text{Intra}}}{N_0} \quad (4-23)$$

其 dB 形式的表达式为:

$$\phi_{\text{Intra}} = 10 \log \left( 1 + \frac{I_{\text{Intra}}}{N_0} \right) = 10 \log(N_0 + I_{\text{Intra}}) - 10 \log N_0 \quad (4-24)$$

系统间有效载噪比衰减可以表示为



$$\Delta\left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff} = \frac{\frac{C_s}{N_0 + I_{Intra}}}{\frac{C_s}{N_0 + I_{Intra} + I_{Inter}}} = 1 + \frac{I_{Inter}}{N_0 + I_{Intra}} \quad (4-25)$$

其 dB 形式的表达式为：

$$\phi_{Inter} = 10\log\left(1 + \frac{I_{Inter}}{N_0 + I_{Intra}}\right) = 10\log(N_0 + I_{Intra} + I_{Inter}) - 10\log(N_0 + I_{Intra}) \quad (4-26)$$

其中， $\frac{C_s}{N_0}$  表示载噪比， $I_{Intra}$  为系统内干扰的等效噪声功率谱密度， $I_{Inter}$  为系

统间干扰的等效噪声功率谱密度。

### （3）评估低轨卫星对 GNSS 的 DOP 值的改善情况

精度衰减因子(DOP)被广泛用于分析导航精度和观测几何结构强度。假定伪距观测量是  $P_i$ ，则观测模型可写为

$$P_i = \rho_i + c(dt_u - dt_i) + I_i + T_i + e_i \quad (4-27)$$

其中， $\rho_i$  是信号接收时刻接收机天线相位中心到信号发射时刻卫星天线相位中心间的几何距离， $dt_u$  和  $dt_i$  分别为接收机钟差和卫星钟差； $I_i$  和  $T_i$  分别为电离层延迟和对流层延迟； $e_i$  为观测噪声和未模型化误差，如多路径效应等； $c$  是真空中光速。

进一步，假定伪距观测量中的卫星钟差和大气层延迟已经得以改正，在观测模型中只考虑接收机钟差。如此，观测模型可表示成<sup>[28]</sup>

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{e} \quad (4-28)$$

其中， $\mathbf{L}$  是观测向量，该观测向量是改正后的伪距观测量与由坐标近似值计算的伪距之差。 $\mathbf{X}$  是包含 3 维位置和接收机钟差（单位：m）在内的未知参数向量， $\mathbf{A}$  是  $c \times 4$  设计矩阵，若考虑观测向量  $\mathbf{L}$  的权矩阵  $\mathbf{P}$ ，则未知参数向量的最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (4-29)$$

其中,  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$ 。几何精度衰减因子(GDOP)定义为

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}})} \quad (4-30)$$

水平精度衰减因子(HDOP)为

$$\text{HDOP} = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}} \quad (4-31)$$

垂直精度衰减因子(VDOP)为

$$\text{VDOP} = \sqrt{q_{uu}} \quad (4-32)$$

时间精度衰减因子(TDOP)为

$$\text{TDOP} = \sqrt{q_{tt}} \quad (4-33)$$

为了分析低轨卫星对 DOP 值得改善, 先假设由其他卫星导航系统解得的未知参数向量  $\hat{\mathbf{x}}_0$  的协因素矩阵为  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0}$ 。而加入低轨卫星信号后相应的观测方程变为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ \mathbf{L}_{\text{LEO}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_{\text{LEO}} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e}_{\text{LEO}} \end{bmatrix} \quad (4-34)$$

其中  $\mathbf{L}_{\text{LEO}}$  和  $\mathbf{P}_{\text{LEO}}$  分别为低轨卫星的观测向量及其权矩阵,  $\mathbf{A}_{\text{LEO}}$  为低轨卫星的设计矩阵。从而加入低轨卫星信号后未知参数向量  $\hat{\mathbf{x}}$  的新协因素矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} &= \left( \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_{\text{LEO}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{P} & 0 \\ 0 & \mathbf{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_{\text{LEO}} \end{bmatrix} \right)^{-1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}_{\text{LEO}}^T \mathbf{P}_{\text{LEO}} \mathbf{A}_{\text{LEO}})^{-1} \\ &= \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0} \mathbf{A}_{\text{LEO}}^T (\mathbf{Q}_{\text{LEO}} + \mathbf{A}_{\text{LEO}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0} \mathbf{A}_{\text{LEO}}^T)^{-1} \mathbf{A}_{\text{LEO}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0} \end{aligned} \quad (4-35)$$

其中,  $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}$ ,  $\mathbf{Q}_{\text{LEO}} = \mathbf{P}_{\text{LEO}}^{-1}$  是低轨卫星观测向量权矩阵的逆矩阵。则精度衰减因子 DOP 的改善值为

$$\Delta \text{DOP} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_0}) - \text{tr}(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}})} \quad (4-36)$$

易得精度衰减因子 DOP 的改善的百分比。

本课题使用 STK 仿真软件对低轨卫星 DOP 值、北斗等全球导航卫星系统的 DOP 值以及两者组合后的 DOP 值进行仿真。分析 DOP 值改善百分比分布情

---

况，DOP 值平均值和最高值的变化，高低纬度地区改善情况的程度等，通过以上研究，提出合理的极轨道和倾斜圆轨道的组合低轨星座构型方案。

#### （4）评估低轨星座与 GNSS 星座联合定位情况

将低轨卫星视为普通导航卫星，利用卫星通过下行通信链路快速下发高精度钟差和轨道参数的星历播发体制，通过四球几何交会原理进行定位，与北斗等全球导航卫星系统的定位精度进行比较，评估低轨星座与 GNSS 星座联合定位情况。

### 2. 低轨卫星导航性能评估软件研发

本课题利用 Matlab 设计评估软件。能够通过交互界面导入已有低轨星座或者输入低轨卫星的星座信息建立星座，对导航性能进行可视化评估；并根据参数设定给出合理的低轨卫星星座设计。主要研究内容包括软件总体框架、功能模块、算法流程等。

## 4.2 技术路线

技术路线如图 4-1 所示。

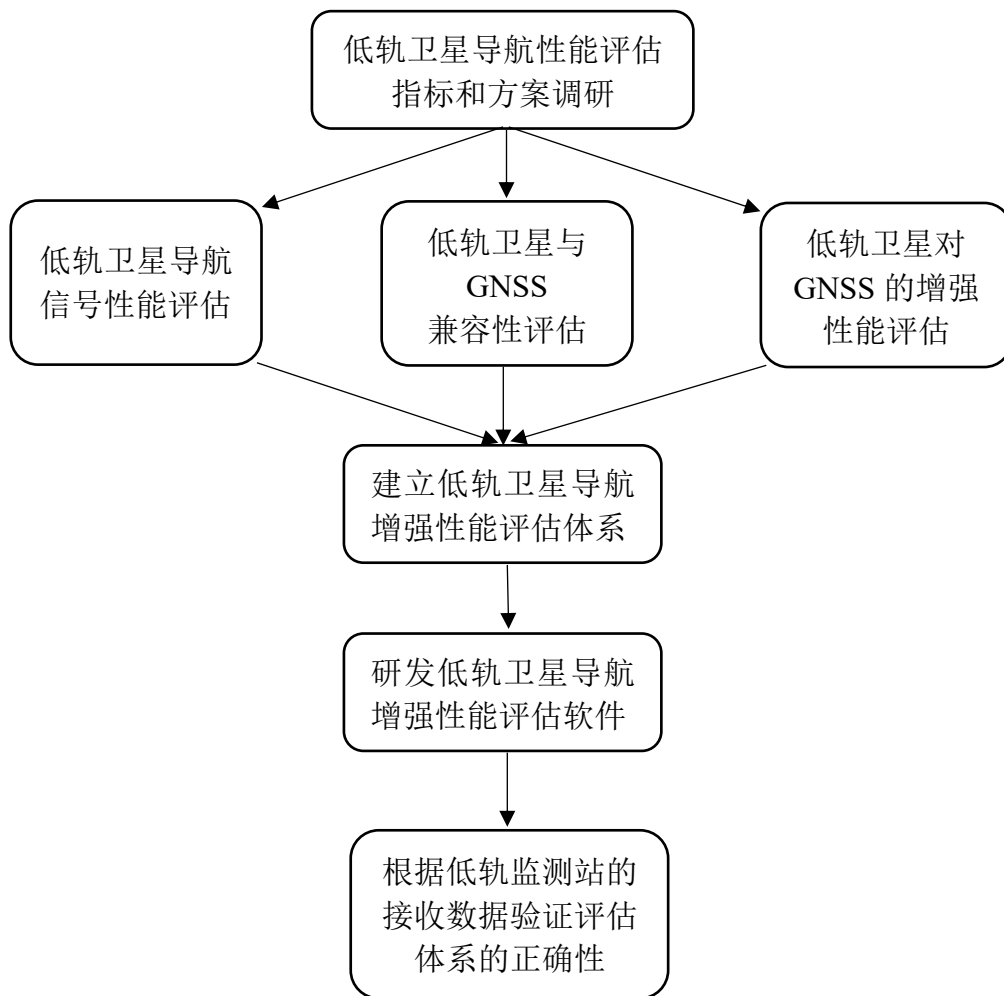


图 4-1 技术路线示意图

### 4.3 可行性分析

首先，本人所在的实验室在低轨卫星导航增强领域取得过重要的研究成果并且拟在全国构建低轨监测站，具有评估研究的基础；其次，全球导航卫星系统的信号评估体制已经较为成熟，可以用作低轨卫星导航信号性能评估的参考，全球导航卫星系统之间的信号的兼容性和增强性能研究也有利于低轨星座与 GNSS 星座的兼容性和增强性能的评估，本文方法可行；最后，实验室拥有低轨卫星监测站的接收数据，可以对评估体系提出验证为本论文的实施提供支撑。

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）通过对卫星导航性能文献的调研，对低轨卫星的导航性能评估的指标有了一定的了解并且学习了一些重要的评估方法。

（2）本人所在实验室在低轨卫星导航增强领域取得过工程和研究上的重要进展，对本人的学习有重要指导作用。

（3）本人所在的实验室拥有低轨监测站的接收数据，为课题的研究提供了条件和保障。

### 5.2 所需科研条件

（1） 计算机一台，用于文献阅读，评估方法分析，STK 等软件的运行以及评估软件的设计。

（2） 低轨监测站的接收数据，用于评估方法的验证和优化。

---

## 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：完成低轨卫星导航性能评估体系研究。

第二部分：完成低轨卫星导航性能评估软件研发。

第三部分：完成低轨卫星实测数据性能验证。

根据课题的整个时间跨度，做出以下的时间安排：

2019 年 12 月——2020 年 6 月：完成第一部分的目标；

2020 年 6 月——2020 年 9 月：完成第二部分的目标；

2020 年 9 月——2020 年 11 月：完成第三部分的目标，并且完成小论文的撰写、投稿；

2020 年 11 月：撰写中期报告，准备中期答辩；

2020 年 11 月——2021 年 4 月：撰写毕业论文，准备毕业答辩。

---

## 参考文献

- [1] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等.广域差分 GPS 原理和方法[M].北京测绘出版社,1999.
- [2] 宁津生,姚宜斌,张小红.全球导航卫星系统发展综述[J].导航定位学报,2013,1(1)3-8.
- [3] 王磊,陈锐志,李德仁,蔚保国,伍蔡伦.珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2191-2196.
- [4] JOERGERM, GRATTONL, PERVANB, etal. Analysis of Iridium-Augmented GPS for Floating Carrier Phase Positioning. [J].Navigation,2010,57(2):137-160.
- [5] GEBHARDTC. Iridium boss reflects as final NEXT satellite constellation launches [EB/OL].(2019-01-11).
- [6] REIDTG,NEISH A M,WALTER TF,etal. Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigation [C]//Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (IONGNSS+2016).Portland,Oregon:ION,2016:2300-2314.
- [7] WANG Lei, CHEN Ruizhi, LI Deren, etal. Initial assessment of the LEO based navigation signal augmentation system fromLuojia-1A satellite[J].Sensors,2018,18(11):3919.
- [8] 张小红,马福建.低轨导航增强 GNSS 发展综述[J].测绘学报,2019,48(09):1073-1087.
- [9] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D].武汉大学,2013.
- [10] 贺成艳. GNSS 空间信号质量评估方法研究及测距性能影响分析[D].中国科学院研究生院（国家授时中心）,2013.
- [11] 闫野,任萱,陈磊.卫星对地球覆盖情况的判据及算法探讨[J].宇航学报,1999(02):56-61.
- [12] 柴霖,袁建平,方群,李新刚.基于 STK 的星座设计与性能评估[J].宇航学报,2003(04):421-423.

- 
- [13]刘绍奎,刘虎东.低轨卫星通信系统星座设计与性能仿真[J].全球定位系统,2014,39(03):19-23.
- [14]李勇军,赵尚弘,吴继礼.一种低轨卫星星座覆盖性能通用评价准则[J].宇航学报,2014,35(04):410-417.
- [15]John G, Walker. Continuous whole-earth coverage by circular orbit satellite patterns[R]Farnborough England, Royal Aircraft Establishment, March 1977.
- [16]曾喻江,胡修林,王贤辉.Flower 卫星星座设计方法研究[J].宇航学报,2007(03):659-662.
- [17]邓勇,王春明,胡晓惠,张中兆.基于空间纬度区域优化的红外近地轨道星座设计[J].宇航学报,2010,31(05):1368-1373.
- [18]闫野,任萱,陈磊.卫星对地球覆盖情况的判据及算法探讨[J].宇航学报,1999(02):56-61.
- [19]李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D].解放军信息工程大学,2012.
- [20]唐祖平,周鸿伟,胡修林,冉一航,刘禹圻,周艳玲.Compass 导航信号性能评估研究[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(05):592-602.
- [21]FENG SJ, OCHIENG Y. An efficient worst user locational-gorithm for the generation of the galileo integrity flag[C]//Proceedings of ION GNSS2005. Long Beach:IEEE,2005:2374-2382.
- [22]NOAKES M D, CAIN J B, ADAN L S S L, et al. An adaptive link assignment algorithm for dynamically changing topologies [J].IEEE Transactions on Communications,1993,41(5):694-706.
- [23]于淼. Ka 频段卫星通信系统雨衰特性及混合补偿技术的研究[D].吉林大学,2015.
- [24]肖璐. Ka 频段雨衰特性的测量和模型研究[D].西安电子科技大学,2010.
- [25]郑进宝. 我国 Ka 频段卫星通信雨衰分析及抗雨衰技术[D].国防科学技术大学,2007.
- [26]牛满仓. 多频段 GNSS 信号兼容技术研究[D].上海交通大学,2014.



- 
- [27]]杨颖,王绮.STK 在计算机仿真中的应用[M].北京国防工业出版社, 2005.
- [28]Langley R B. Dilution of precision. GPS World, 1999, 10 52–59.
- [29]杨元喜,李金龙,徐君毅,汤静,郭海荣,何海波.中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J].科学通报,2011,56(21):1734-1740.
- [30]雷文英,李毅松,周昀,严涛,边朗.基于鸿雁单颗 LEO 卫星和 GEO 卫星的天基导航备份[J].空间电子技术,2017,14(05):47-51.
- [31]高晋宁,方源敏,杨展,张志斌.基于 STK 的 GLONASS 系统与 GPS 系统 DOP 值的仿真分析[J].科学技术与工程,2011,11(15):3384-3387+3392.
- [32]Shiyue Fan,Lijun Zhao,Wenjun Xiao,Zhenghang Li. Performance analysis and simulation of Iridium navigation satellite based on STK[P]. Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), 2012 Second International Workshop on,2012.
- [33]F.Fedi, A simple method for predicting rain attenuation on terrestrial and Earth-Space paths, RIF:1B1081 Fondazione Vgo Bordoni, Segale. Viale Transtewere 108000153 Rome, Italy.
- [34]Betz J W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of CINIO: Theory: Defense Technical Information Center. 2001.
- [35]Van Dierendonck A J, Hegarty C. Methodologies for Assessing Intrasytem and Intersystem Interference to Satellite Navigation Systems. in:ION GPS 2002:15 th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. 2002.1241-1250.
- [36]Titus B M, Betz J W, Hegarty C J, et al.. Intersystem and Intrasytem Interference Analysis Methodology. in:Proceedings of IONGNSS-2003. Portland. OR, 2003.2061-2069.
- [37]Van Dierendonck A J. Hegarty C. Pullen S. A More Complete and Updated Methodology for Assessing Intrasytem and Intersystem Interference for GPS and Galileo. in:ION GPS/GNSS 2003 Portland, OR, 2003.1484-1493.
- [38]Wanner S, Hein G. Pany T, et al.. Interference Computations between GPS and

---

Galileo. in:ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite  
Division Long Beach. CA, 2005.861-876.

- [39] 刘莉,战兴群,刘卫,牛满仓.北斗卫星导航系统和 GPS 兼容性评估(英文)[J].测绘学报,2011,40(S1):11-18.
- [40] 唐祖平. GNSS 信号设计与评估若干理论研究[D].华中科技大学,2009.
- [41] 刘天雄.解读卫星导航系统的兼容与互操作[J].卫星与网络,2017(12):26-37.
- [42] 高斯. 关于 SAR 信号和 GNSS 信号的兼容性研究[D].华中科技大学,2018.
- [43] 陈冰雪. GNSS 兼容评估中精确等效载噪比计算模型研究[D].广西大学,2018.