

导航类微纳集群系统构建技术研究

虞业砾^{1,2}, 郑倩云^{1,2}, 杨善强^{1,2}, 施敏华^{1,2}, 刘虎^{1,2}

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203; 2. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203)

摘要: 微纳卫星具有小型化、研制周期短、开发和发射成本低、可组网运行等一系列优点, 在通信、遥感和导航等领域中都得到了快速发展, 单颗微纳卫星功能单一, 能力相对薄弱, 因此多采用集群的方式开展工作; 如何结合卫星研制、能力形成等多考量角度形成微纳集群系统构建显得尤为重要; 文章以微纳集群协同实现导航类任务为前提, 从卫星研制周期、发射响应时间、能力形成时间等角度提出一种导航类微纳集群系统构建技术, 并从任务综合效能满足角度对所设计的集群进行方法层面的优化; 系统建设能够为指定区域提供长期持续导航服务及有效的应急增强导航服务。

关键词: 微纳卫星; 卫星集群; 集群设计; 设计优化

Research on Construction Technology of Navigation Micro—nano Swarm System

YU Yeluo^{1,2}, ZHENG Qianyun^{1,2}, YANG Shanqiang^{1,2}, SHI Minhua^{1,2}, LIU Hu^{1,2}

(1. Innovation Academy for Microsatellite of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

(2. Shanghai Microsatellite Engineering Center, Shanghai 201203, China)

Abstract: With a series of advantages such as small size, short development cycle, low development, and launch cost, and network operation, micro—nano satellites have been rapidly developed in the fields of communication, remote sensing, and navigation, etc. Single micro—nano—satellites are relatively simple in function and weak in capability, so they mostly work in the way of swarms. How to combine satellite development, capability formation, and other multi—consideration perspectives to form a micro—nano swarm system construction is particularly important. The paper proposes a technique for building a navigation micro—nano swarm system from the perspectives of the satellite development cycle, launch response time, capability formation time, and optimizes the designed swarm at the methodological level from the perspective of comprehensive mission effectiveness satisfaction. The system construction can provide long—term continuous navigation service and effective emergency enhanced navigation service for the designated area.

Keywords: micro—nano satellites; satellite swarm; swarmdesign; design optimization

0 引言

随着微纳卫星的技术发展不断成熟, 微纳集群应用的不断普及, 全世界都在规划和关注未来微纳卫星

及其集群的发展与应用^[1-2]。我国对于微纳卫星的研制起步较之欧美等国相对较晚, 但发展迅速, 目前国内已有多家单位成功研制并发射多颗微纳卫星^[3-4]。其应用也不再仅仅局限于有限区域的遥感侦察, 伴随

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-14。

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2019130D015)

作者简介: 虞业砾(1989-), 男, 浙江宁波人, 硕士, 工程师, 主要从事集成电路设计、数字化仿真、体系构建综合评价等方向的研究。

引用格式: 虞业砾, 郑倩云, 杨善强, 等. 导航类微纳集群系统构建技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 246-251.

着越来越多的微纳卫星集群化组网式运行模式的使用, 其工作领域也扩展到了任意区域的遥感侦察、通信服务甚至导航增强服务^[5]。伴随着其广泛应用, 针对微纳卫星集群的系统构建需要如何综合考虑、如何有效构建的需求显得愈发急切^[6]。

1 系统整体结构

微纳卫星多采用标准化、模块化设计, 具有快速设计、快速组装、快速测试、快速发射、快速应用等优势, 其单颗卫星能力较之骨干大卫星能力一般较弱, 但通过集群编队、星座组网等途径, 可显著提升卫星系统服务时间及覆盖^[7-10]。综合成本及发射周期综合来看, 微纳集群卫星的构建较之传统大卫星建设具有显著优势。微纳集群的合理建设应用, 能够为当前卫星工作模式、模式应用等方面形成新的体制机制, 与大卫星优势互补、协同工作, 以期完成更高需求、更复杂环境下的天基任务。

系统整体结构由先决条件输入、集群建设技术研究方向、系统建设参数及集群设计及优化四大部分组成。顶层先决条件输入包含集群构型思想、集群设计、卫星类型等; 集群建设技术研究点则涵盖: 发射响应、轨道参数分析、集群覆盖形式分析、集群构型分析、集群部署分析等; 系统建设参数基于前述集群建设技术研究方向从发射窗口、轨道高度、轨道面数、火箭运载能力、单轨卫星数、单星质量、单星体积、卫星整流包络、轨道平面倾角、轨道偏心率、轨道半长轴、升交点赤经、近地点幅角、维度幅角、单星覆盖能力、地面仰角、轨道高度、覆盖圆心角、地球半径、相位调整、轨道倾角调整、升交点赤经调整

整流包络、轨道平面倾角、偏心率、轨道半长轴、升交点赤经、近地点幅角、维度幅角、地带覆盖特性、单星覆盖能力、地面仰角、轨道高度、覆盖圆心角、地球半径、相位调整、轨道倾角调整及升交点赤经调整等多角度多量值细化开展技术研究; 最终提交输出从集群设计结果、参数迭代优化及服务提供等方面实现集群设计及优化。整体结构框图如图1所示。

目前我国装备体系中已经初步实现微纳集群在通信、遥感等领域下的运用, 但导航类背景下的领域运用暂时还少有实际应用。因此有必要结合微纳集群系统特点和工作模式, 开展导航类微纳集群的建设, 以为后续导航类微纳集群系统的设计和应用提供指导。

2 导航类微纳集群建设研究

根据导航类微纳集群特点, 从发射响应、轨道参数分析、集群覆盖形式、集群构型及集群部署等方面开展技术研究。

2.1 发射响应

当前定义首颗导航类微纳卫星发射至最后一颗卫星发射入轨所需的时间为发射响应。对于导航类微纳集群卫星形成服务需要设定如何的系统发射周期, 综合考虑提供服务需要的卫星发射窗口为 T_{j_0} 、轨道高度 h 、集群系统轨道面数为 p 、单轨道面的卫星数量 s 、单颗微纳卫星的质量为 M_s 、单颗微纳卫星的体积为 V_s 、微纳卫星发射所搭载的火箭运载能力为 M_R 、

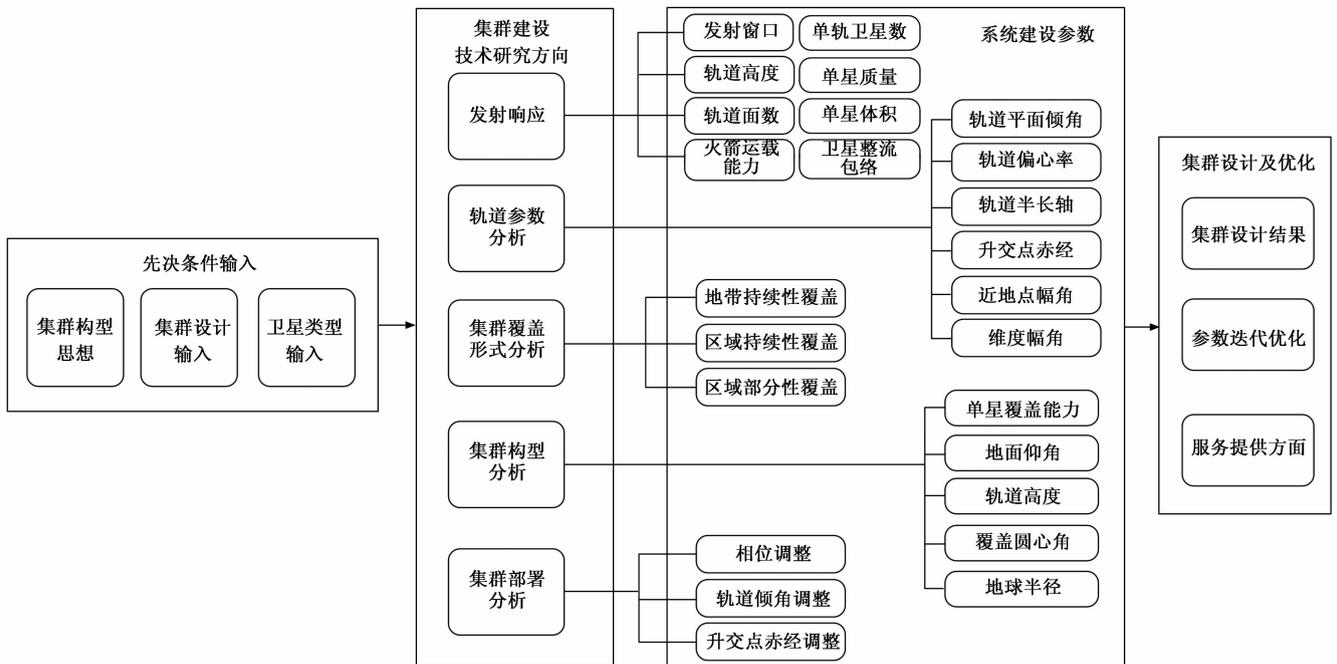


图1 系统整体结构框图

卫星整流罩最大包络为 V_R ，则系统发射周期指标计算公式为：

$$T_f = T_{f0} \sum_{i=1}^p \left\lceil \left[\frac{n_i}{\min \left\{ \frac{M_R}{hM_s} \cdot \frac{500\ 000}{V_S}, \frac{V_R}{V_S} \right\}} \right] \right\rceil \quad (1)$$

其中： $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整，对于不同的导航服务需求，可根据服务特点设置在不同参数情况下的发射周期。

2.2 轨道参数分析

受制于微纳卫星本身重量、载荷等的的能力限制，微纳卫星的轨道覆盖一般处于 3 500 公里之内的低轨道面。确定微纳卫星的轨道需要从卫星轨道平面倾角 i 、轨道偏心率 e 、轨道半长轴 a 、升交点赤经 Ω 、近地点幅角 ω 及卫星初始时刻的维度幅角 $\omega + f$ 等 6 个具体参数来进行分析^[11]。待发射后通过微纳卫星其轨道倾角与实际升交点位置来确定当前所处的轨道平面惯性空间位置；通过轨道偏心率与半长轴来确定所属轨道的形状及大小；卫星当前所属轨道面指向及轨道位置则通过近地点幅角、初始时刻的维度幅角来综合确定，如图 2 所示。

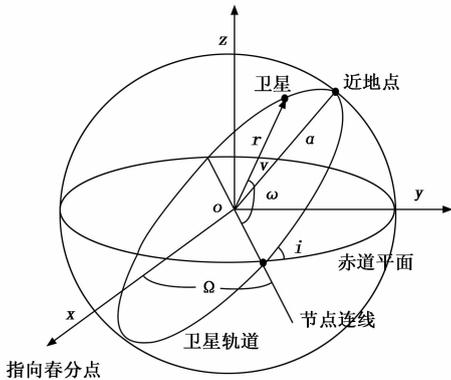


图 2 单颗微纳卫星的轨道参数

考虑到微纳卫星集群式作业特点，在进行轨道参数考虑时，需要进一步对集群的微纳卫星总数 N 及其所属的轨道面 P 、单平面卫星数 S 完成综合考虑，即 $N = P \times S$ 。

2.3 集群覆盖形式分析

导航类微纳集群的存在价值及应用实现主要体现在覆盖性上，其具体覆盖形式由实际任务来决定。当前导航类微纳集群任务所涉及的覆盖方式包含：

1) 地带（全球特定纬度）持续性覆盖，利用导航类微纳集群系统的构建，以实现对地带（全球特定纬度）范围内的地带进行持续性的导航覆盖，如图 3 (a) 所示；

2) 区域持续性覆盖，通过导航类微纳集群对某些重点区域进行连续覆盖，如图 3 (b) 所示；

3) 区域部分性覆盖，较之区域持续性覆盖，区域部分性覆盖指能够完成区域性非持续性的覆盖服务，如图 3 (c) 所示。

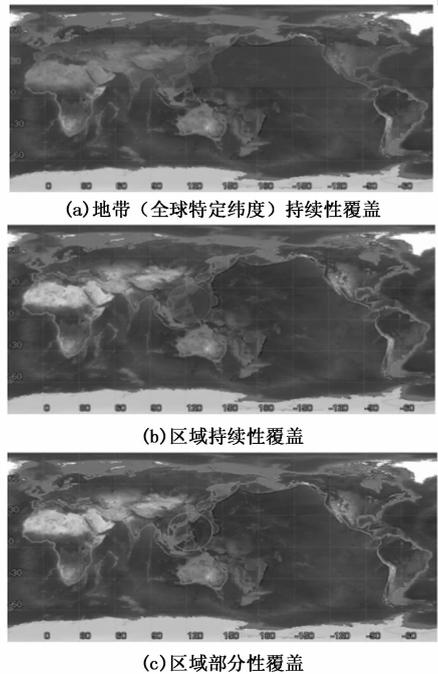


图 3 典型导航类微纳集群覆盖形式

2.4 集群构型分析

针对上述典型集群覆盖形式，同步结合相关导航覆盖性能、定位精度、传输特性等具体服务指标开展导航类微纳集群构型分析。假设所属微纳集群中单颗微纳卫星的最小地面仰角为 γ ，轨道高度为 h ，覆盖圆心角为 θ ，地球半径用 R_e 表示，则其覆盖能力如图 4 所示^[12]：

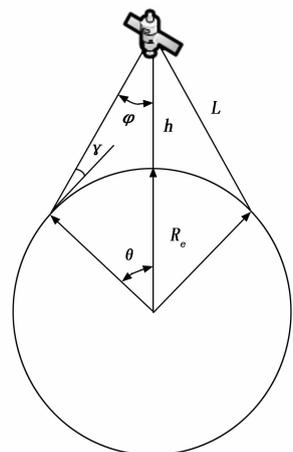


图 4 导航类微纳集群单星覆盖示意图

基于单星覆盖特性, 当构建导航类微纳集群设计时, 通过对应量转换大致估算单星覆盖面积等于球面六角形, 得到单星覆盖地球面积为:

$$S_F = 6R_e^2 \left(2 \arctan \frac{\sqrt{3}}{\cos\theta} - 2\pi/3 \right) \quad (2)$$

式中, S_F 代表单星覆盖地球面积。结合上式, 根据所设想的覆盖区域面积, 可以进一步得到对该区域覆盖所需的集群卫星数量 N 。

$$N = \frac{\pi}{3 \arctan \frac{\sqrt{3}}{\cos\theta} - \pi} \quad (3)$$

考虑到微纳集群卫星中必然存在冗余覆盖的可能, 因此实际集群所含卫星数量一般需略大于计算值 N 。

集群构型分析设计过程中除了考虑卫星数量、覆盖情况外还需要同步分析该集群轨道的运行特性。结合微纳卫星轨道低、数量多的既有特性, 常选取倾斜轨道 Walker 星座设计方式来完成集群构型实现, 集群轨道的运行特性兼顾集群卫星对称性、分布均匀性。

以导航类微纳集群任务为前期约束, 对微纳集群系统的初步构型进行设计分析。

1) 若该导航类微纳集群卫星需要提供 24 小时的持续性服务, 则选取单轨星链下的连续接力, 假设单轨卫星数量为 M , 其值计算来源于: 地球赤道周长 $\varphi \div$ (每颗卫星覆盖范围直径 $T \div$ 重叠系数 Z (一般情况下重叠率的选取为任意值, 考虑到实际卫星成本背景下的重叠系数, 一般设置为 1.1~1.5))。轨道面数 $N =$ 地球赤道周长 $\varphi \div (2 \times$ 每颗卫星覆盖范围直径 $S \div$ 重叠系数 Z (一般情况下重叠率的选取为任意值, 考虑到实际卫星成本背景下的重叠系数, 一般设置为 1.1~1.5)) $\div \sin$ (目标区域最小纬度 \div 轨道倾角 $\times \pi \div 2$)。得到 Walker 星座 $N/M/0$ 作为初始星座输入。

2) 若对该导航微纳集群任务需求是对某一区域或某时段进行导航任务实现, 则在进行微纳集群卫星数量 N 计算时则需要按照: 微纳集群卫星数量 $N =$ 提供服务所需时间 \div (单颗微纳卫星覆盖直径 \div 轨道速度 \div 重叠系数)。并对 N 值取整。

在明确集群卫星数量 N 的基础上, 根据覆盖区域选取轨道平面数 S , 进一步明确相位因子 F 后, 基于 Walker 星座均匀分布特性, 得到相邻两个轨道面的升交点赤经差 Ω_Δ :

$$\Omega_\Delta = 2\pi s/T \quad (4)$$

式中, s 代表相同轨道面下的卫星数, T 代表整个集群所包含的所有卫星数量。

共轨道面下的相邻微纳卫星之间的相位差 φ_Δ 、相邻轨道面内的相邻微纳卫星间的相位角 θ_Δ 分别等于:

$$\varphi_\Delta = 2\pi p/T \quad (5)$$

$$\theta_\Delta = 2\pi F/T \quad (6)$$

式中, p 代表整个微纳集群所包含的轨道面个数, F 代表不同轨道面内微纳卫星之间相对位置的无量纲值^[13]。完成整个导航类微纳集群的构型分析。

2.5 集群部署分析

微纳集群的部署分析需要综合考虑集群内卫星面内调整及面间调整的复杂程度、轨道倾角与卫星间的相位调整量等因素。

2.5.1 相位调整

微纳集群间各卫星间的相位调整需要通过改变各卫星间的不同轨道高度以形成轨道高度差及不同轨道角速度来完成, 对于常规微纳集群构型, 通常假设其轨道半长轴 a , 当前轨道角速度为 v 、地球引力系数为 $\mu = 3.98600 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, 原始相位 θ_1 、调整后相位 θ_2 、调整相位差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。且微纳集群构型下各卫星轨道角速度 v 与半长轴 a 之间有如下式关系:

$$\begin{cases} v = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \\ T = \frac{\Delta\theta}{n_1 - n_2} \end{cases} \quad (7)$$

同时得到相位调整所需周期 T 与调整前后微纳卫星间的高度差 Δh 关系为:

$$T = \frac{\Delta\theta}{\sqrt{\mu}} \cdot \frac{1}{(h + a_e)^{\frac{3}{2}} - (h + R_e + \Delta h)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$\Delta h = \left[(h + a_e)^{\frac{3}{2}} - \frac{\Delta\theta}{T \cdot \sqrt{\mu}} \right]^{\frac{2}{3}} - h - a_e \quad (9)$$

如上式所述, 可以得到微纳集群构型下所属不同轨道高度下完成相位调整所需的时间代价, 如图 5 所示。

2.5.2 轨道倾角调整

卫星轨道平面倾角设置主要受制于运载工具和发射场地情况^[15], 对于低轨微纳集群系统, 通常采用一箭多星的方式进行发射, 由于发射的卫星在空间进行变轨轨道面机动的代价极大, 且微纳卫星轨道机动能力的限制, 一般不对轨道面调整下的轨道机动做特殊考虑。设当前发射场地的地理纬度为 j 、轨道平面

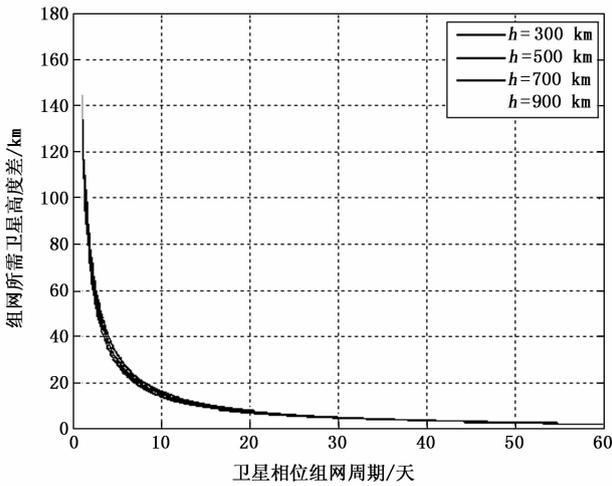


图 5 不同相位调整周期与所需调整的轨道高度量差关系

倾角为 i 、卫星发射时刻的方位角为 ω ，根据公式：

$$\cos i = \sin j \cos \omega \quad (10)$$

式中， $i \geq \omega$ 。

待卫星入轨后，需要对其进行轨道倾角的调整，对于微纳集群构型所处的轨道在法向推力作用下，轨道平面倾角 i 与升交点赤经 Ω 将同步收到影响而变化，但所变化值并不对轨道偏心率 e 、轨道半长轴 a 及近地点幅角 ω 产生同步影响。当目标卫星在轨道上受到法向推力 W 作用后，其轨道平面倾角与升交点赤经变化为^[15]：

$$\Delta i = \eta \frac{1}{V} \cos u_0 \Delta V_w \quad (11)$$

$$\Delta \Omega = \eta \frac{1}{V} \frac{\sin u_0}{\sin i} \Delta V_w \quad (12)$$

式中， V 为卫星轨道速度、 η 为卫星推力效率因子， ΔV_w 为在法向推力 W 作用下的法向速度增量。

当通过算子计算得到轨道倾角调整值后，可以很快计算获得在不同纬度幅角下所需的法相速度增量。最终完成轨道倾角的调整。

2.5.3 升交点赤经调整

微纳集群的轨道升交点赤经对应着卫星轨道平面的惯性空间所处的位置，处于低轨道面的微纳卫星受地球自转影响，普遍具有升交点赤经进动的特性，来应对对目标区域的升交点差造成的不稳定。

针对微纳卫星的集群部署调整，在完成相位调整及轨道倾角调整基础上，还需要通过将目标卫星与标准轨道拉开一定高度已形成升交点赤经的调整。其调整升交点赤经需要综合考虑地球引力 J_4 模型，依据

卫星轨道倾角 i 、轨道半长轴 a 、与升交点赤经之间的关系可得：

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R_e}{a} \right)^2 \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cos i \left\{ 1 + \frac{J_2}{16} \left(\frac{R_e}{a} \right)^2 \left[-16 + 76 \cos^2 i + \frac{10 J_4}{J_2^2} 3 - 7 \cos^2 i \right] \right\} \quad (13)$$

$$T = \frac{\Delta \Omega}{\dot{\Omega}_1 - \dot{\Omega}_2} \quad (14)$$

式中， $\Delta \Omega$ 代表升交点赤经调整角度差。

3 导航类微纳集群设计优化

导航类微纳集群设计分析中，不可避免的会因为任务约束、服务条件及集群各星对应载荷能力等形成多组导航类微纳集群设计，需要按照微纳集群系统综合效能评估体系所提供的计算手段，来对所给出的某一集群设计进行综合效能评分，并以该评分作为优化指标，迭代获取所需建设的微纳卫星及集群的建设^[16]。

假设对给定的导航类微纳集群系统（包括单星轨道参数定义、载荷配置定义、工作模式与约束定义）和集群构型，在指定的任务场景中（包括任务时间区间、目标类型定义、任务效能指标定义等）的综合效能进行分析，给出具体的任务执行汇总结果（如对某区域/目标的覆盖重数、定位质量，重访时长，系统规模成本，多目标可成像目标数量，全覆盖所需时间等），以及按照所执行的任务效能指标加权算法所得的效能评分。

在整个微纳卫星集群设计优化过程中将综合效能评分直接作为优化指标，参与卫星轨道参数与集群构型参数的确定，迭代的目标就是使系统综合效能评分达到最大值，评分所需的加权算法在集群系统综合效能评价指标体系建立中定义。对某些效能指标，可给出“满足性”阈值，根据效能计算结果判断此设计下的集群系统是否满足需求。

按照微纳集群系统综合效能评估体系所提供的系统综合效能计算手段，得到给定的某一集群系统任务综合效能评分，以该评分作为优化指标，迭代卫星轨道和集群构型参数（考虑系统约束和参数取值范围），最终获得使系统综合效能评分达到最大时所对应的集群系统参数。多星系统参数优化迭代过程如图 6 所示。

同时，结合参数迭代优化，通过前述发射响应、轨道参数、集群覆盖形式、集群构型及集群部署等多

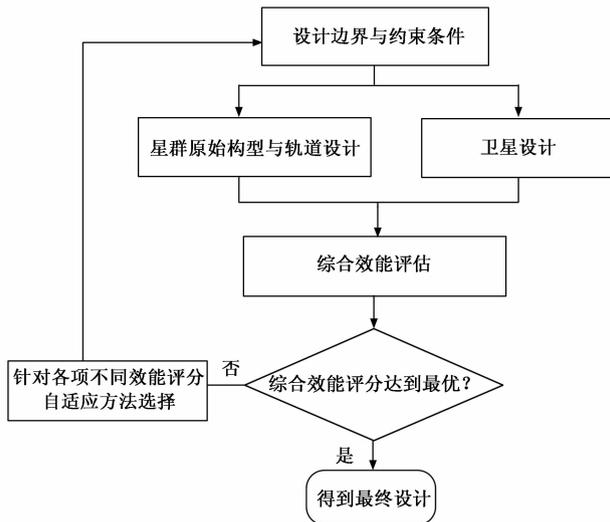


图 6 关系微纳集群多星设计参数优化迭代过程图

方面所开展的建设技术研究结果, 系统能够对以下导航类微纳集群的综合服务层面提供支撑。

3.1 指定区域长期持续导航服务提供

当前我国北斗导航卫星已全球组网完成, 但面向某些经纬度上的小区域目标, 并不能提供很好的针对性覆盖。利用系统建设, 从轨道类型、轨道高度约束(高度上下限定)、倾角约束(倾角上下限)、任务区域、其他约束(重访特性、覆盖率等)对微纳集群构建混合式网络, 以实现指定目标区域的多重覆盖。同时, 其服务的提供同步考虑卫星载荷宽视场等限制, 面向指定区域进行广域导航定位增强。

3.2 指定区域应急增强导航服务提供

微纳卫星具备较强的应急发射能力, 支持一箭多星。系统建设下则更多考虑与已有骨干大卫星星座的结合搭配, 从卫星轨道参数、星座参数估值、任务指标要求(重访时间、频率、完整覆盖周期、信息传输性能等)角度进行设计优化, 使其服务在充分考虑卫星的发射和测控能力限制情况下, 能够应对指定区域的应急导航增强需求。

4 结束语

在微纳集群应用被不断推广及使用的前提下, 从发射响应、轨道参数分析、集群覆盖形式、集群构型及集群部署等方面对微纳集群进行全方面的综合设计, 并提出利用综合效能评估的方式来实现微纳集群的优化迭代, 以满足日益增长的微纳集群服务需求。从设计与优化评估的角度全面介入微纳集群系统的构

建, 以期能够为微纳集群系统建设及服务提供提供重要的参考依据, 同时后续将进一步对集群的设计优化评估进行算子实现及验证工作。

参考文献:

- [1] IVANOV D, MONAKHOVA U, GUERMAN A, et al. Decentralized differential drag based control of nano-satellites swarm spatial distribution using magnetorquers [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 67 (11): 3489 - 3503.
- [2] 马定坤, 匡 银, 杨新权. 微纳卫星发展现状与趋势 [J]. *空间电子技术*, 2017, 14 (3): 42 - 47.
- [3] 李健全, 王倩莹, 张思晔, 等. 国外对地观测微纳卫星发展趋势分析 [J]. *航天器工程*, 2020, 29 (4): 126 - 132.
- [4] 陆 震. 小卫星和微纳卫星应用现状与挑战 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39 (6): 1 - 7.
- [5] 陈 夏, 黄 佳. 微纳卫星导航通信一体化系统设计与实现 [J]. *现代电子技术*, 2019, 42 (1): 5 - 8.
- [6] 闫晓娟, 张 锐, 谢祥华, 等. 微纳卫星产业发展探讨 [J]. *航天器工程*, 2018, 27 (4): 117 - 121.
- [7] 张 旭, 陈清刚, 蒋宇志, 等. 微纳卫星组网星间链路设计及关键技术分析 [J]. *电讯技术*, 2020, 60 (8): 883 - 889.
- [8] CHEN X, LIU S, SHENG T, et al. The satellite layout optimization design approach for minimizing the residual magnetic flux density of micro- and nano-satellites [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 163: 299 - 306.
- [9] 贝 超, 闻 新, 杨嘉伟. 微纳卫星星座建立与维护策略 [J]. *系统工程与电子技术*, 2001, 23 (12): 68 - 70.
- [10] 陆 震. 小卫星和微纳卫星应用现状与挑战 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39 (6): 1 - 7.
- [11] 李 丹, 于 洋. 基于轨道根数的低轨卫星轨道预测算法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 34 (10): 2540 - 2548.
- [12] 计晓彤, 丁良辉, 钱 良, 等. 全球覆盖低轨卫星星座优化设计研究 [J]. *计算机仿真*, 2017 (9): 64 - 69.
- [13] 吴正午, 任 华, 蒋昊东. 区域侦察小卫星星座设计与仿真 [J]. *计算机仿真*, 2015 (2): 87 - 91.
- [14] 韦 娟, 张 润. 对地侦察卫星星座优化设计及仿真分析 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40 (2): 138 - 141.
- [15] 杨海峰, 尹路明. 近地卫星编队构形保持方法 [J]. *航天控制*, 2010, 28 (1): 17 - 20.
- [16] 陈韬亦. 基于快响空间的地面控制系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (7): 132 - 137.