



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目: NGSO 星座与 GSO 卫星间的干扰规避波束规划方法
作者: 高翔, 姚秀娟, 李颖, 齐奕玮, 智佳, 闫毅
收稿日期: 2024-09-13
网络首发日期: 2025-07-14
引用格式: 高翔, 姚秀娟, 李颖, 齐奕玮, 智佳, 闫毅. NGSO 星座与 GSO 卫星间的干扰规避波束规划方法[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20250714.1648.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.11887/j.issn.1001-2486.24090021

NGSO 星座与 GSO 卫星间的干扰规避波束规划方法

高翔¹, 姚秀娟^{1*}, 李颖^{1,3}, 齐奕玮^{1,2}, 智佳¹, 闫毅¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100194)

摘要: 面向非对地静止轨道 (none geostationary satellite orbit, NGSO) 星座系统快速发展所造成的频谱资源日益拥挤的现状, 针对 NGSO 与地球静止轨道卫星 (geostationary satellite orbit, GSO) 系统间的频谱共享问题, 提出了一种基于空间隔离禁区的星载相控阵天线干扰规避波束规划方法, 通过对 NGSO 与 GSO 卫星系统间干扰场景分析, 将地面按经纬度划分为若干网格并进行空间均匀枚举, 进而建立基于时间切片的 NGSO 系统对于同步轨道弧段的集总干扰分析模型; 根据干扰噪声比限值标准, 构建面向 NGSO 与 GSO 系统间频率共享的相控阵天线波束规划目标函数, 揭示了空间隔离禁区与波束规划策略的映射机理, 由此提出波束规划方法实现干扰规避; 通过仿真实验, 验证了方法有效性, 可为低地球轨道卫星星座系统设计和实现提供参考。

关键词: 低地球轨道星座; 相控阵天线; 隔离禁区; 干扰规避; 波束规划

中图分类号: TN972

Interference avoidance beam planning method between NGSO constellation and GSO satellite

GAO Xiang¹, YAO Xiujuan^{1*}, LI Ying^{1,3}, QI Yiwei^{1,2}, ZHI Jia¹, YAN Yi¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100194, China)

Abstract: With the rapid expansion of NGSO (non-geostationary satellite orbit) constellation systems, spectrum resources have become increasingly congested. To address the issue of spectrum sharing between NGSO and GSO (geostationary satellite orbit) systems, an interference-avoidance beam planning method for spaceborne phased array antennas was proposed, based on spatial isolation zones. By analyzing interference scenarios between NGSO and GSO systems, the Earth's surface was discretized into a grid based on latitude and longitude for uniform spatial enumeration. A time-sliced aggregate interference analysis model was then established to assess the interference from NGSO systems to segments of the GSO arc. Based on the interference-to-noise ratio threshold criterion, an optimization objective for phased array antenna beam planning was formulated to facilitate spectrum sharing between NGSO and GSO systems. Furthermore, the mapping mechanism between spatial isolation zones and beamforming strategies was elucidated, leading to the proposed method for interference-avoiding beam planning. Simulation results validate the effectiveness of the approach, offering a valuable reference for the design and implementation of LEO (low Earth orbit) satellite constellations.

Keywords: LEO constellation; phased array antenna; isolation zone; interference avoidance; beam planning

低轨互联网星座系统具有通信范围广, 通信容量大、时延短等特点, 已成为空间基础设施建设的新的制高点。频率和轨道资源是世界各国必争的一种宝贵的战略资源^[1], 同时也是低轨互联网星座发展的基本要素。如今, 巨型低轨卫星星座系统已在轨大量部署并快速发展, 目前在轨卫星数已近万颗, 国外典型系统如 Starlink OneWeb、Telesat 等^[2-4], 国内典型系统如星网等^[5-6], 使得空间频率轨道资源竞争愈发激烈。多星共轨、多星

同频大量出现的发展局面使得频轨资源日益枯竭、通信干扰问题日益突出, 并且存在严重影响对地球静止轨道 (geostationary satellite orbit, GSO) 卫星系统的正常使用的可能性, 因此, 迫切需要探索合理可行的干扰规避方法^[7], 以保证非对地静止轨道 (none geostationary satellite orbit, NGSO) 大规模互联网星座的业务用频, 并保护 GSO 卫星系统的正常用频提供技术支撑。

现阶段, 在 NGSO 与 GSO 卫星系统共存场

景中, 为避免 NGSO 卫星系统对 GSO 卫星系统造成干扰, 低轨卫星系统必须采取措施以符合国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 制定的干扰评估准则, 如建议书 ITU-R S.1432-1 将系统噪声的百分数转换成相应的干扰噪声比 (interference-to-noise ratio, I/N), 来表示干扰容限, 提出 $I/N = -12.2$ dB 的干扰门限值, 其他卫星业务和场景也可参考该值^[8]。基于此, 国内外学者开展了 NGSO 与 GSO 卫星系统间干扰规避技术的相关研究, 提出的干扰规避方法大致分为基于功率分配、基于频谱动态监测、基于极化隔离和基于空间隔离的方法。如文献[9]总结分析了 NGSO 星座的同频干扰分析与规避的挑战、技术与发展趋势; 文献[10]根据 GSO 与 NGSO 卫星干扰场景中的空间特征、波束特征等, 提出了融合多特征的功率分配策略; 文献[11-13]通过划分信道频段或采用动态频谱监测的手段对空闲频谱进行分配, 从而实现频率重复利用; 文献[14]从极化隔离的角度对高低轨卫星系统间频率兼容提出了建议。此外, 目前基于空间隔离的方法仍然是实现干扰规避的主要途径, 如文献[15]提出了一种空间隔离的方法, 通过引入 GSO 卫星隔离带的概念, 对 NGSO-GSO 卫星系统的空间隔离角进行确定, 从而实现 NGSO 卫星对 GSO 卫星的干扰规避; 文献[16]提出了一种对 NGSO 系统的联合波束管理和功率分配方法, 在保证 (low Earth orbit, LEO) 卫星的持续无线传输的同时最大化 GEO 用户的信号干扰噪声比; 文献[17]提出一种基于发射波束旁瓣零陷的干扰规避策略, 通过在共线区域方向上形成一条“零陷带”进行干扰规避; 文献[18]提出经过规避区域时切换信关站或者馈电链路关闭下行波束的方案, 结合相控阵天线特点, 信令波束通过上注星载相控阵天线波位表实现干扰规避; 文献[19]基于大规模低轨卫星星座系统与 GSO 系统之间的干扰机制, 制定了相应的干扰规避策略; 文献[20]进一步从几何学角度对地面干扰禁区进行确定, 指出当 NGSO 卫星经过地面干扰禁区时, 可采用波束偏转的方式进行干扰规避; 文献[21]研究了 NGSO 与 GSO 共存的多卫星系统的波束跳变方案。这些文献从理论上分析说明了空间隔离角和干扰禁区判定方法对实现 NGSO-GSO 卫星系统的干扰规避具有一定的可行性, 但是提出的措施大多针对单波束卫星星座系统, 且在实现时对星座密度和轨道位置有严格要求, 需要通过合理的星座构

型来保证与地面站之间通信不中断。当低轨星座规模庞大时, 将使得该方法复杂度提升, 导致难以划分空间隔离角度, 无法准确判断禁区, 同时, 相对应的波束偏转或切换机理也将难以实现, 降低了其实用性。

针对上述问题, 提出了一种新型的基于空间隔离禁区的星载相控阵天线干扰规避波束规划方法。首先通过对 NGSO 与 GSO 卫星系统间干扰场景分析, 将地面按经纬度划分为若干网格并进行空间均匀枚举, 进而建立基于时间切片的 NGSO 系统对于同步轨道弧段最恶劣集总干扰分析模型; 其次, 根据 I/N 干扰限值标准, 构建面向 NGSO 与 GSO 系统间频率共享的相控阵天线波束规划目标函数, 揭示了空间隔离禁区与波束规划策略的映射机理, 由此提出波束规划方法实现干扰规避; 最后, 通过仿真实验, 验证了方法有效性, 可为低轨卫星星座系统设计提供参考。

1 干扰分析模型

1.1 地面网格划分

考虑 NGSO 卫星搭载的天线类型为相控阵天线。因为相控阵天线具有灵活性, 可以根据链路条件灵活调整波束状态, 因此可以根据相控阵天线某波束指向的干扰计算, 来判断该波束是否需要调整, 而不影响其他指向波束的工作状态。为便于对 NGSO 卫星相控阵天线仰角覆盖下的地区进行干扰计算, 因此将地面划分为网格, 计算干扰时以网格作为基本单元进行计算, 在合理划分的情况下, 网格内部的干扰通常变化很小, 故可用网格中心点的集总干扰代替整个网格的集总干扰, 如图 1 所示。

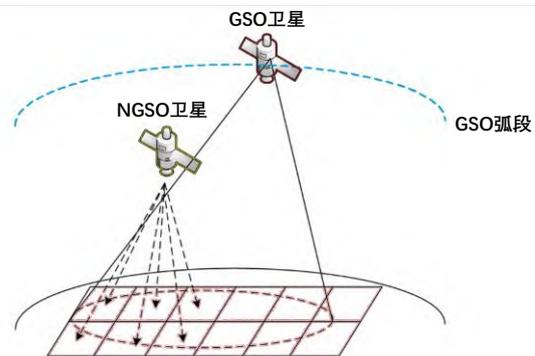


图 1 下行链路网格划分示意图

Fig 1 Diagram of downlink grid division
在地心惯性参考系中, 在地面网格区域以 s

(度)为步长取点,考虑地球表面曲率,则每个地面点的三维坐标矩阵 G_{ef} 可表示为,

$$G_{ef} = \begin{bmatrix} x_{G_{ef}} \\ y_{G_{ef}} \\ z_{G_{ef}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_g \cos(i * s + lon_{start}) \cos(j * s + lat_{start}) \\ R_g \sin(i * s + lon_{start}) \cos(j * s + lat_{start}) \\ \sin(j * s + lat_{start}) (a / \sqrt{1 - e \sin(j * s + lat_{start})^2 + 6378}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, R_g 表示地球半径, i 为经度间隔步长, j 为纬度度间隔步长, lon_{start} 表示起始经度, lat_{start} 表示起始纬度, a 表示椭圆半长轴, e 表示偏心率。同样,在 GSO 卫星覆盖的弧段上以 s (度) 为步长取点,可得 GSO 地面站在地固系下的三维坐标

$$ES_{GSO} = \begin{bmatrix} x_{ES_{GSO}} \\ y_{ES_{GSO}} \\ z_{ES_{GSO}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{GSO} \cos(i * s) \cos(lat_{GSO}) \\ R_{GSO} \sin(i * s) \cos(lat_{GSO}) \\ R_{GSO} \sin(lat_{GSO}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, R_{GSO} 表示 GSO 卫星的轨道高度, i 为经度间隔步长, lat_{GSO} 表示 GSO 卫星地面投影所在纬度。

NGSO 卫星的空间位置可由其星历确定,在任意时刻,卫星的位置可设为 $(x_{NGSO}, y_{NGSO}, z_{NGSO})$, 将经纬高坐标转换为地固系坐标

$$NGSO_{ef} = \begin{bmatrix} x_{NGSO} \\ y_{NGSO} \\ z_{NGSO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{NGSO} \cos(j * s + lat_{NGSO}) \cos(i * s + long_{NGSO}) \\ R_{NGSO} \sin(j * s + lat_{NGSO}) \cos(i * s + long_{NGSO}) \\ R_{NGSO} \sin(j * s + lat_{NGSO}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, R_{NGSO} 表示 NGSO 卫星的轨道高度, lat_{NGSO} 表示 NGSO 卫星地面投影所在纬度, $long_{NGSO}$ 表示 NGSO 卫星地面投影所在经度。

1.2 分析场景

NGSO 卫星链路对 GSO 卫星链路的干扰复杂多样,主要考虑同频干扰下的集总干扰,包括共线干扰和旁瓣干扰。共线干扰指 NGSO 卫星链路与 GSO 卫星链路在空间上重合或接近重合时,对 GSO 卫星链路产生的干扰,通常为空间中单链路最严重的干扰,所以首先考虑该种干扰;旁瓣干扰是由无用信号的发射天线旁瓣对准受扰接收机所造成的干扰,当 NGSO 卫星系统中的波束数量或地球站数量较多时,旁瓣干扰容易产生集总效应并超出 ITU 标准或建议书中所规定的干扰阈值,所以在分析计算时也必须予以考虑。

考虑到 NGSO 卫星星载相控阵天线的特性,以及 NGSO 卫星与 GSO 卫星系统的空间位置关系,为便于对 NGSO 卫星波束覆盖地区下的 GSO 地球站受扰情况进行计算,且使 NGSO 卫星位于任何位置时的干扰隔离禁区范围大小和具体位置能明确定义,然后通过均匀枚举,将地面按经纬度进行网格划分,计算干扰时以网格作为基本单

元进行分析计算,并地面站或终端位于在网格中心点处。图 2 中, θ_{down} 指 GSO 地球站接收的载波偏离该波束中心方向的夹角, β_{down} 指 NGSO 卫星第 m 个波束偏离其波束中心方向与地球站连线的夹角, α_{down} 指 GSO 地球站接收的 NGSO 卫星的第 m 个波束偏离地球站天线中心方向的角度,即隔离角;图 3 中, α_{up} 表示 NGSO 地球站和 GSO 卫星连线与 NGSO 地球站天线波束方向的夹角, θ_{up} 表示 NGSO 地球站和 GSO 卫星的连线与 GSO 卫星天线波束方向的夹角。

对 GSO 与 NGSO 卫星系统的上、下行链路分别建立了多波束卫星系统模型干扰场景模型,场景示意图如图 2 和图 3 所示。设 GSO 卫星、NGSO 卫星均工作在 Ka 频段,NGSO 卫星形成 m 个可动态调整开闭状态的波束,假设这些波束的发射功率和天线方向图相同。

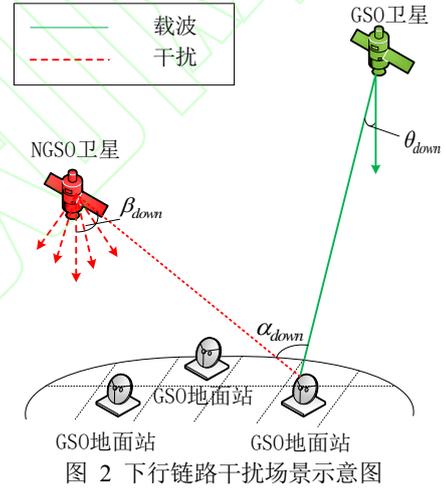


Fig 2 Downlink interference scenario diagram

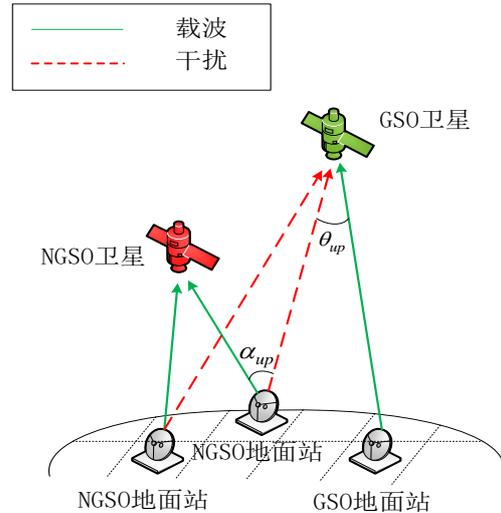


图 3 上行链路干扰场景示意图

Fig 3 Uplink interference scenario diagram

1.3 最恶劣集总干扰分析模型

1.3.1 下行干扰分析模型

在图 2 所示的干扰分析场景中, 在单个地面网格点内的集总干扰变化很小, 故可用网格中心点的集总干扰代替整个网格的集总干扰。假设网格中心存在地球站, 对于 NGSO 卫星与 GSO 卫星之间的干扰情况, 定义单入干扰如下

$$\begin{cases} \left(\frac{I}{N}\right)_{i,j} = \frac{P_{i,j}G_t(\beta_{\text{down},i,j})G_r(\alpha_{\text{down},i,j})}{L_{i,j}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{down},i,j} \leq \alpha_{th} \\ \beta_{\text{down},i,j} \geq \beta_{th} \end{cases} \quad (4)$$

其中, 对于地面网格 (i, j) , $(I/N)_{i,j}$ 表示 NGSO 卫星天线每个指向下的单入干扰, $P_{i,j}$ 表示 NGSO 卫星的发射功率, G_t 表示 NGSO 卫星天线增益, 角 $\beta_{\text{down},i,j}$ 表示 NGSO 卫星的发射离轴角, G_r 表示 GSO 卫星地球站的天线增益, 角 $\alpha_{\text{down},i,j}$ 表示 NGSO 卫星与 GSO 卫星的隔离角, $L_{i,j}$ 表示链路损耗, β_{th} 表示地球站起跟仰角, α_{th} 表示地球站和其可视 GSO 卫星弧段顶点连线与 NGSO 卫星链路的夹角。

然后, 定义网格状态 $s(\lambda, \varphi)$, 结合 ITU 建议的干扰隔离门限对其进行判定, 得到禁区网格状态集合 S_ψ 。该问题可构建为

$$\begin{cases} s(\lambda, \varphi) \in S_\psi \\ s.t. \left(\frac{I}{N}\right)_{total}^{N,M} \geq \left(\frac{I}{N}\right)_{th} \\ \lambda_{\text{GSO}_{start}} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{GSO}_{end}} \\ \varphi_{\text{NGSO}_{start}} \leq \varphi \leq \varphi_{\text{NGSO}_{end}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ 表示经度, φ 表示纬度, $\lambda_{\text{GSO}_{start}}$ 与 $\lambda_{\text{GSO}_{end}}$ 约束了 NGSO 天线覆盖下的受扰 GSO 弧段起止点, $\varphi_{\text{NGSO}_{start}}$ 与 $\varphi_{\text{NGSO}_{end}}$ 约束了 NGSO 卫星天线覆盖范围的纬度起止点, $(I/N)_{th}$ 为 ITU 建议的干扰隔离门限, 这里取 -12.2dB。

1.3.2 上行干扰分析模型

上行链路场景的考虑方法与下行链路类似, 在分析时考虑同频干扰下的共线干扰和旁瓣干扰所构成的集总干扰。对地面按经纬度进行网格划分, 建立如图 3 所示的干扰模型, 并对其进行分析计算。同样, 假设每个地面网格中心存在 1 个

地球站, 并用网格中心的发射功率近似替代网格内的发射功率, 得上行链路的单入干扰为:

$$\begin{cases} \left(\frac{I}{N}\right)_{i,j} = \frac{P_{i,j}G_t(\beta_{\text{up},i,j})G_r(\alpha_{\text{up},i,j})}{L_{i,j}} \\ 0 \leq \alpha_{\text{up},i,j} \leq \alpha_{th} \\ \beta_{\text{up},i,j} \geq \beta_{th} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $(I/N)_{i,j}$ 表示 GSO 卫星所受 NGSO 地面站的干扰, $P_{i,j}$ 表示 NGSO 地面站的发射功率, G_t 表示 NGSO 地面站发射天线增益, 角 $\beta_{\text{up},i,j}$ 表示 NGSO 卫星的发射离轴角, G_r 表示 GSO 卫星接收天线增益, 角 $\alpha_{\text{up},i,j}$ 表示 NGSO 卫星与 GSO 卫星的隔离角, $L_{i,j}$ 表示链路损耗, β_{th} 表示地球站起跟仰角, α_{th} 表示地球站可视 GSO 卫星弧段顶点连线与 NGSO 卫星链路的夹角。

然后, 定义网格状态 $s(\lambda, \varphi)$, 结合 ITU 建议的干扰隔离门限对其进行判定, 得到禁区网格状态集合 S_ψ 。与下行场景类似, 该问题可构建为

$$\begin{cases} s(\lambda, \varphi) \in S_\psi \\ s.t. \left(\frac{I}{N}\right)_{total}^{N,M} \geq \left(\frac{I}{N}\right)_{th} \\ \lambda_{\text{GSO}_{start}} \leq \lambda \leq \lambda_{\text{GSO}_{end}} \\ \varphi_{\text{NGSO}_{start}} \leq \varphi \leq \varphi_{\text{NGSO}_{end}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $(I/N)_{total}$ 为上行集总干扰, $(I/N)_{th}$ 同式 (5) 干扰隔离门限取值。

2 高低轨卫星干扰隔离的相控阵波束调度方法

2.1 下行链路波束规划方法

2.1.1 目标函数定义

所提算法的目标是根据 NGSO 卫星覆盖范围内各个 GSO 卫星地面站的受扰情况动态选择波束规划策略, 使 NGSO 卫星的波束被精准关闭, 而不是因为经过 GSO 隔离带而导致 NGSO 卫星完全关机, 从而最大化 NGSO 卫星的工作效率, 并且使其波束覆盖下的 GSO 地面站受扰情况最小, 该问题可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \arg \max_{q_{i,j}} \frac{R(q_{i,j})}{\sum_i \sum_j q_{i,j} (I/N)_{i,j}} \quad (8) \\ \text{s. t. } \begin{cases} (I/N)_{i,j} \leq \eta_{th}, i=1, \dots, \phi; j=1, \dots, \varphi \\ q_{i,j} \in \mathbf{Q}, i=1, \dots, \phi; j=1, \dots, \varphi \end{cases} \end{array} \right.$$

其中, \mathbf{Q} 表示波束规划策略矩阵, $q_{i,j}$ 表示 NGSO 卫星波束开闭状态, $(I/N)_{i,j}$ 表征 NGSO 卫星波束覆盖下的 GSO 地面站受扰情况, ϕ 表示 NGSO 卫星下行波束覆盖的经度范围, φ 表示 NGSO 卫星下行波束覆盖的纬度范围, η_{th} 为 ITU-R S.1432-1 建议的干扰隔离门限 -12.2dB, $R(q_{i,j})$ 表示 NGSO 卫星下行波束的工作效率。

$$R(q_{i,j}) \triangleq \frac{\text{sum}(q_{i,j})}{\phi \cdot \varphi} \quad (9)$$

2.1.2 基于空间隔离禁区的下行波束规划方法

在 NGSO 卫星对于 GSO 卫星地面站的下行干扰场景中, 通过集总干扰分析计算, 得到地面干扰隔离禁区, 并兼顾 GSO 卫星系统和 NGSO 卫星系统的可用性, 建立地面干扰隔离禁区与波束映射关系, 进而更新 NGSO 卫星的波束调度策略, 以达到干扰规避的目的, 如图 4 所示。

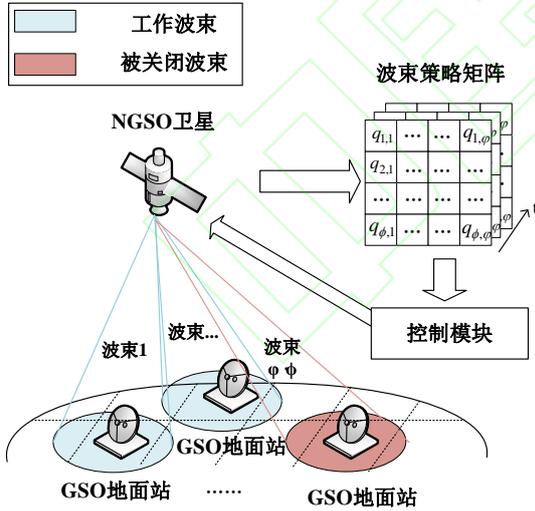


图 4 下行链路波束规划策略示意图

Fig 4 Downlink beam controlling strategy diagram

首先, 假设波束处于全部开启状态, 即 \mathbf{Q} 矩阵中元素均为 1, 然后, 遍历 GSO 弧段集合 M , 依据集总干扰模型计算 NGSO 卫星波束覆盖下的每个网格区域 GSO 地面站的下行集总干扰 $\sum (I/N)_{i,j}$, 若该超过干扰门限 η_{th} , 则 $q_{i,j}$ 置 0, 然后再次对该网格进行干扰计算, 最后重复此

过程直至 NGSO 卫星波束覆盖下的所有网格区域的干扰程度降至可接受范围内, 上述方法如算法 1 所示。

算法 1 基于空间隔离禁区的波束规划算法

Alg.1 Beam controlling algorithm based on space isolation

forbidden zone

输入: GSO 卫星系统参数, NGSO 卫星系统参数, 仿真步长 step(可调), 仿真区域 $\Omega = \{\phi, \varphi\}$, NGSO 星座集合 N , GSO 轨道弧段集合 M
输出: 波束策略 \mathbf{Q}

初始化 NGSO 卫星波束覆盖网格区域 Ω

for $n \in N$

for $m \in M$

for $i, j \in \Omega$

根据式(1)计算 NGSO 卫星波束覆盖下的每个网格点的对应下行干扰值 $(I/N)_{i,j}$

遍历 GSO 轨道弧段集合 M

if $(I/N)_{i,j} \geq \eta_{th}$

更新 $q_{i,j}$

end if

end for

end for

更新波束策略 \mathbf{Q}_n

end for

更新波束策略 \mathbf{Q}

上述方法的具体实现流程如图 5 所示。

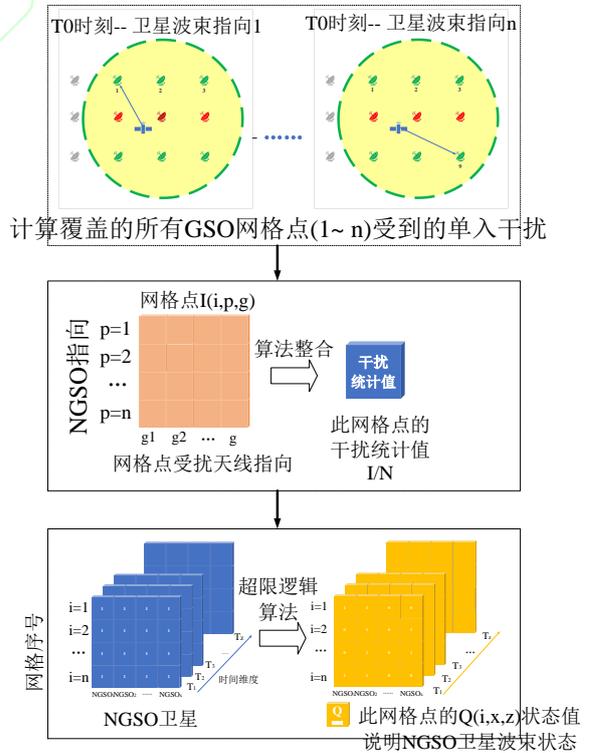


图 5 算法流程图

Fig 5 Algorithm flow chart

2.2 上行链路干扰规避波束规划方法

2.2.1 目标函数定义

根据NGSO卫星波束覆盖范围内的地面站对GSO卫星所产生的干扰,动态选择波束通信策略,使对应的地球站发射天线及NGSO卫星接收天线被精准关闭(或规划),从而最大化NGSO卫星系统的工作效率,并使GSO卫星接收机受扰情况最小,该问题可表示为

$$\begin{cases} \arg \max_{v_{i,j}} \frac{R(v_{i,j})}{\sum_i^P \sum_j^M v_{i,j} (I/N)_{i,j}} \\ \text{s. t. } \begin{cases} (I/N)_{i,j} \leq \eta_{th}, i=1, \dots, \alpha; j=1, \dots, \beta \\ v_{i,j} \in \mathbf{V}, i=1, \dots, \alpha; j=1, \dots, \beta \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

其中, \mathbf{V} 表示波束规划策略矩阵, $v_{i,j}$ 表示NGSO卫星波束开闭状态, $(I/N)_{i,j}$ 表征GSO卫星受到各地面站的干扰情况, α 表示NGSO卫星上行波束覆盖的地面经度范围, β 表示NGSO卫星上行波束覆盖的地面纬度范围, η_{th} 为ITU-R S.1432-1建议的干扰隔离门限-12.2dB, $R(v_{i,j})$ 表示NGSO卫星系统上行波束的工作效率,计算方式同式(9)。

2.2.2 基于空间隔离禁区的上行波束规划方法

与下行干扰场景类似,通过上行集总干扰分析计算,得到地面干扰隔离禁区,建立地面干扰隔离禁区与波束映射关系,进而更新NGSO卫星的波束调度策略,以达到干扰规避的目的。如图6所示。

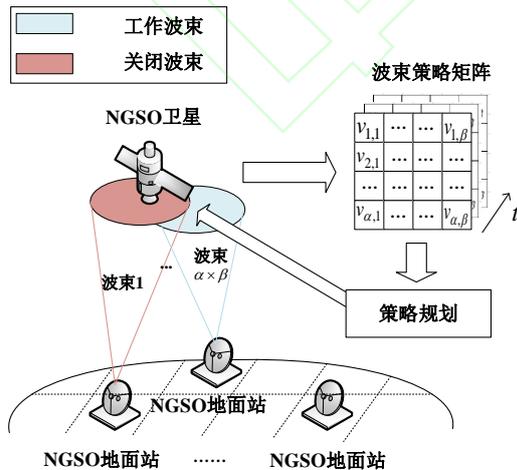


图6 上行链路波束规划策略示意图

Fig 6 Uplink beam controlling strategy diagram

首先,假设所有NGSO地面站均处于全部开

启状态,即 \mathbf{V} 矩阵中元素均为1,然后,依据集总干扰模型计算NGSO地球站对于GSO卫星上行波束的集总干扰 $\sum (I/N)_{i,j}$,若大于干扰门限 η_{th} ,则 $v_{i,j}$ 置0,然后再次对地面站进行干扰计算,最后重复此过程直至NGSO地面站覆盖下的所有GSO卫星的干扰降至可接受范围内,上述方法如算法2所示。

算法2 基于空间隔离禁区的波束规划算法

Alg.2 Beam controlling algorithm based on isolation

forbidden zone

输入: GSO卫星系统参数, NGSO卫星系统参数, 仿真步长 step(可调), 仿真区域 $\Omega = \{\alpha, \beta\}$, NGSO星座集合 N , GSO轨道弧段集合 M

输出: 波束策略 \mathbf{V}

初始化NGSO地面站开启集合 Ω

for $n \in N$

for $m \in M$

for $i, j \in \Omega$

根据式(1)计算该NGSO地面站波束开启时的GSO卫星的对应干扰值 $(I/N)_{i,j}$

if $(I/N)_{i,j} \geq \eta_{th}$

更新 $v_{i,j}$

end if

end for

end for

更新波束策略 \mathbf{V}_n

end for

更新波束策略 \mathbf{V}

3 仿真分析

为便于分析,干扰NGSO卫星系统参考Starlink星座的轨道构型,即轨道高度为630km的卫星,发射功率、载波带宽及中心频率参考其在ITU登记的波束信息^[22],天线模型选用ITU-R S.1528天线模型^[23];受扰GSO卫星弧段以我国为例,选取东经75°至东经135°,轨道高度35768km;地面站天线模型选用ITU-R S.580-6天线模型^[24],NGSO卫星与地面站的可视仰角阈值设定为25°,其余参数详见表1、表2。

表1 下行仿真参数

Tab.1 Downlink simulation parameters

参数名称	数值
NGSO卫星下行发射功率	-77.1
谱密度/dBW/Hz	
载波带宽/MHz	49
中心频率/GHz	17.75

GSO 地面站天线波束宽度 /°	3.46
NGSO 卫星天线峰值增益 /dBi	39
GSO 卫星天线峰值增益 /dBi	55

表 2 上行仿真参数

Tab.2 Uplink simulation parameters

参数名称	数值
NGSO 地面站上行发射功率谱密度/dBW/Hz	-70
载波带宽/MHz	100
中心频率/GHz	27.55
NGSO 地面站天线波束宽度/°	1.58
NGSO 地面站天线峰值增益/dBi	47.7
GSO 卫星天线峰值增益/dBi	49

仿真得到的波束规划区域如图 7、图 8 中所示。其中，图 7、图 8 和图 9 分别展示了本方法在上下行链路的不同经纬度场景下，卫星波束状态随波控策略而变化的情况，白色网格点处即该时刻干扰超出阈值的不可服务凿孔区域示意。

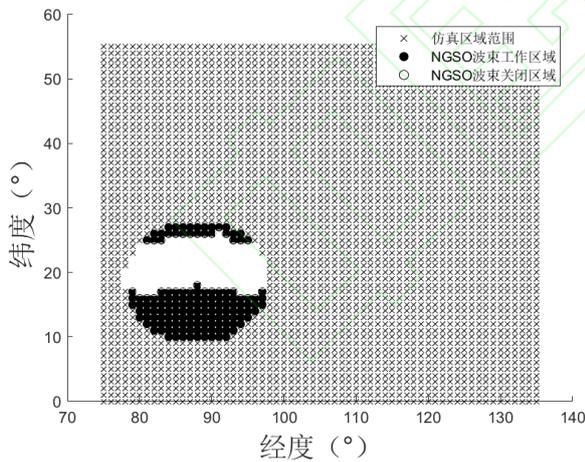
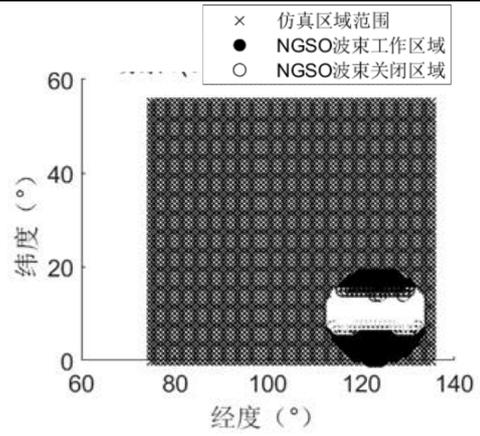


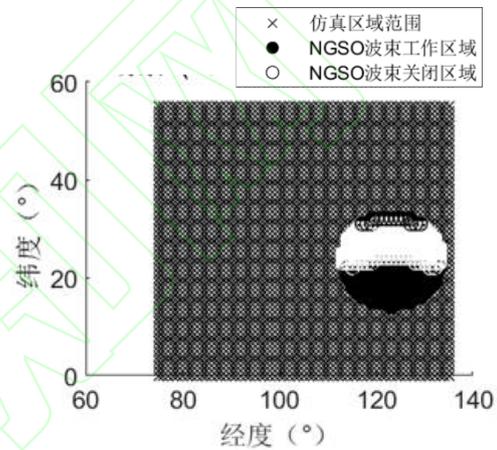
图 7 卫星位于(18.481°N,87.856°E)时干扰规避波束规划仿真结果图

Fig 7 Simulation results of interference avoidance beam steering when the satellite is at (18.481°N, 87.856°E)



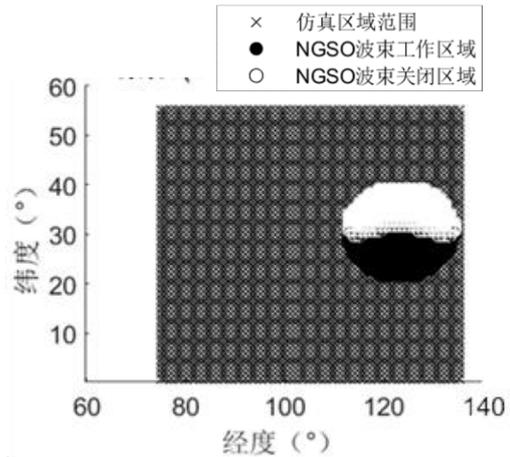
(a) 场景 1 (9.332°N,123.201°E)

(a) Scenario 1 (9.332°N,123.201°E)



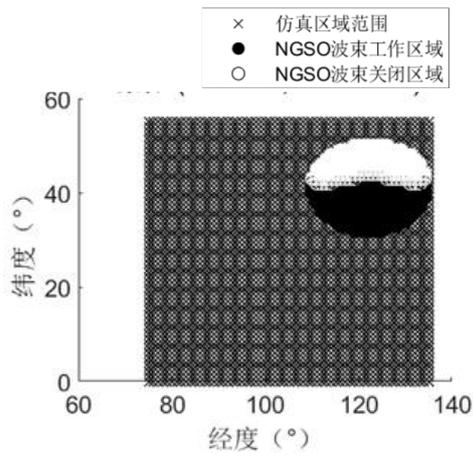
(b) 场景 2 (23.412°N,123.134°E)

(b) Scenario 2(23.412°N,123.134°E)



(c) 场景 3(30.441°N,123.171°E)

(c) Scenario 3(30.441°N,123.171°E)



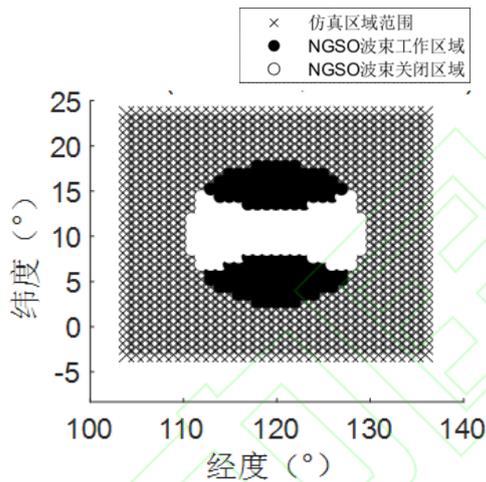
(d) 场景 4(40.96°N,123.197°E)

(d) Scenario 4(40.96°N,123.197°E)

图 8 下行链路不同经纬度下干扰隔离区域仿真结果图

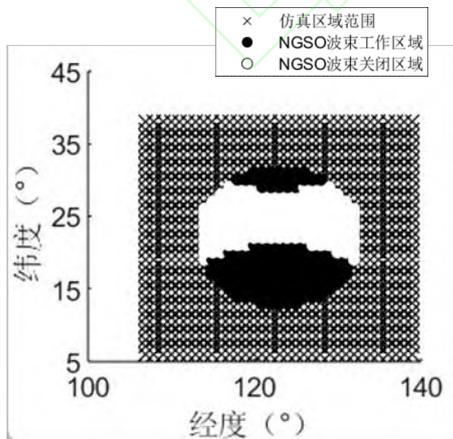
Fig 8 Simulation Results of Downlink Interference Isolation

Areas at Different Latitude and Longitude Coordinates



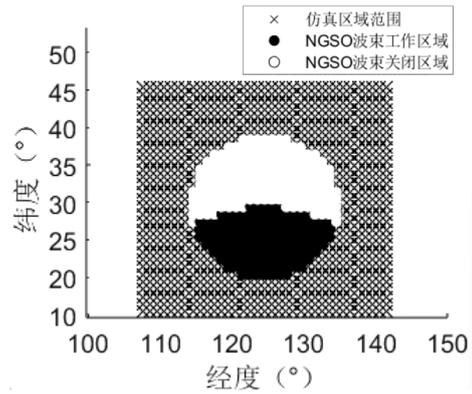
(a) 场景 1 (9.332°N,123.201°E)

(a) Scenario 1 (9.332°N,123.201°E)



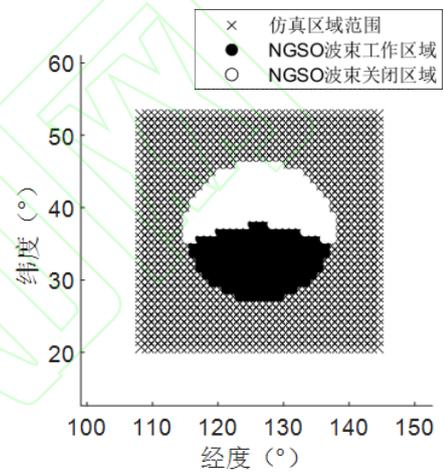
(b) 场景 2 (23.412°N,123.134°E)

(b) Scenario 2(23.412°N,123.134°E)



(c) 场景 3(30.441°N,123.171°E)

(c) Scenario 3(30.441°N,123.171°E)



(d) 场景 4(40.96°N,123.197°E)

(d) Scenario 4(40.96°N,123.197°E)

图 9 上行链路不同经纬度下干扰隔离区域仿真结果图

Fig 9 Simulation Results of Uplink Interference Isolation

Areas at Different Latitude and Longitude Coordinates

图 10 展示了未进行波束规划前, NGS0 卫星波束覆盖下的下行链路干噪比分布情况, 可以看出对应需波控区域的位置, 干扰明显超出限值 -12.2dB; 图 11 展示了进行了波束规划之后, NGS0 卫星波束覆盖下的下行链路干噪比分布情况, 可以看出, 干噪比明显降低至阈值以下。

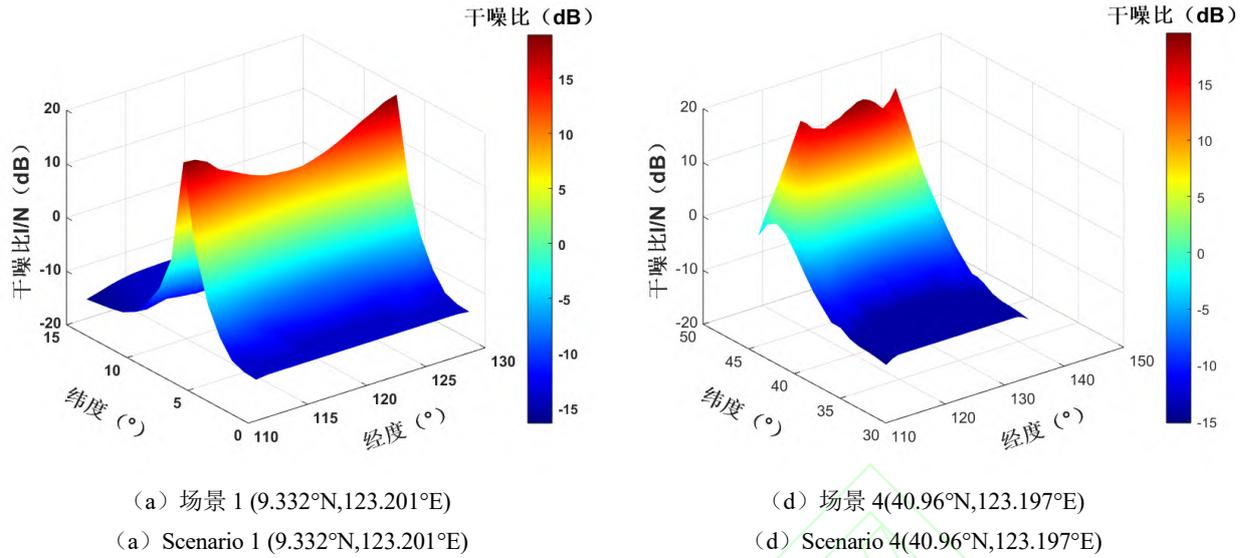
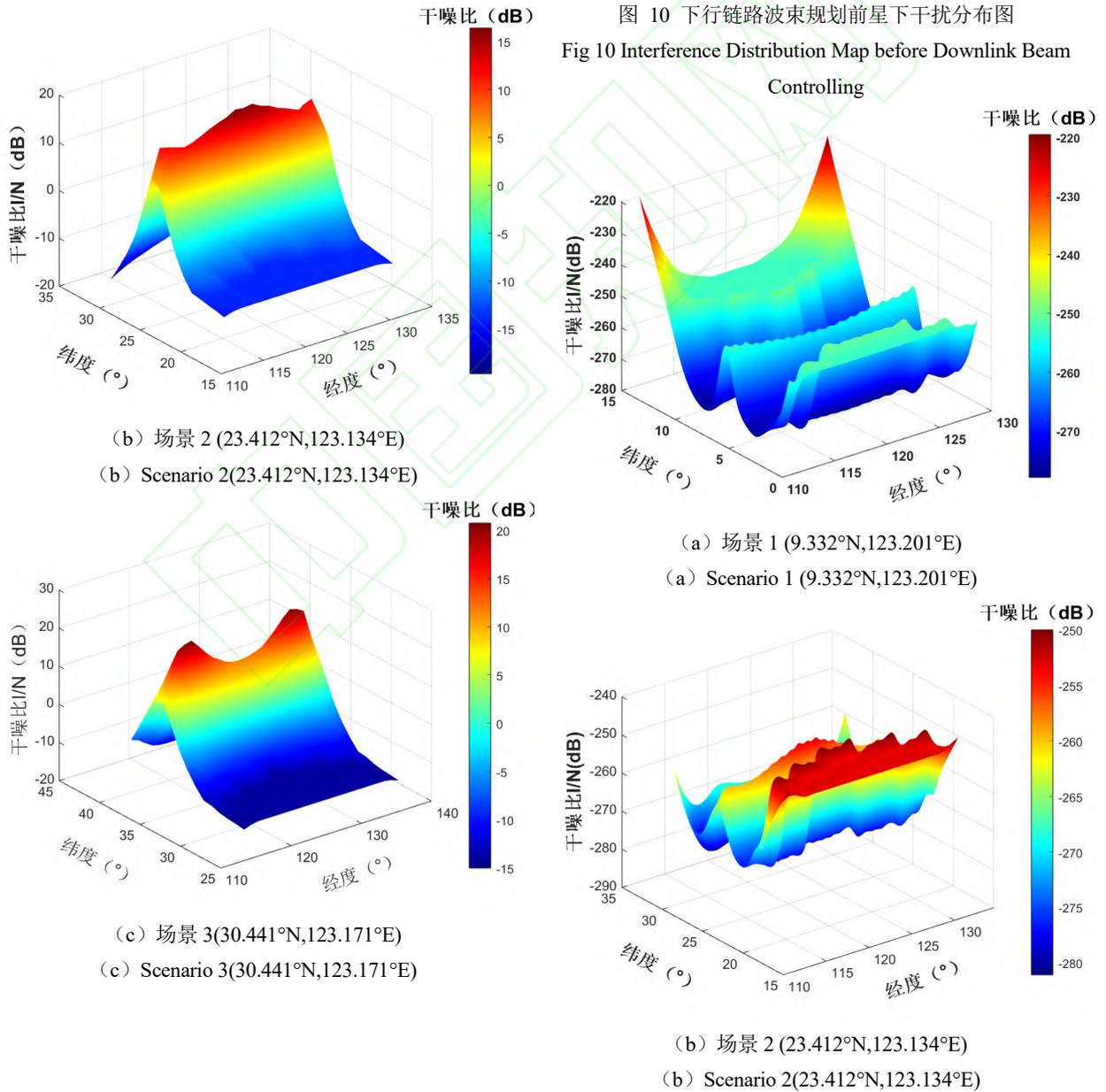


图 10 下行链路波束规划前星下干扰分布图

Fig 10 Interference Distribution Map before Downlink Beam



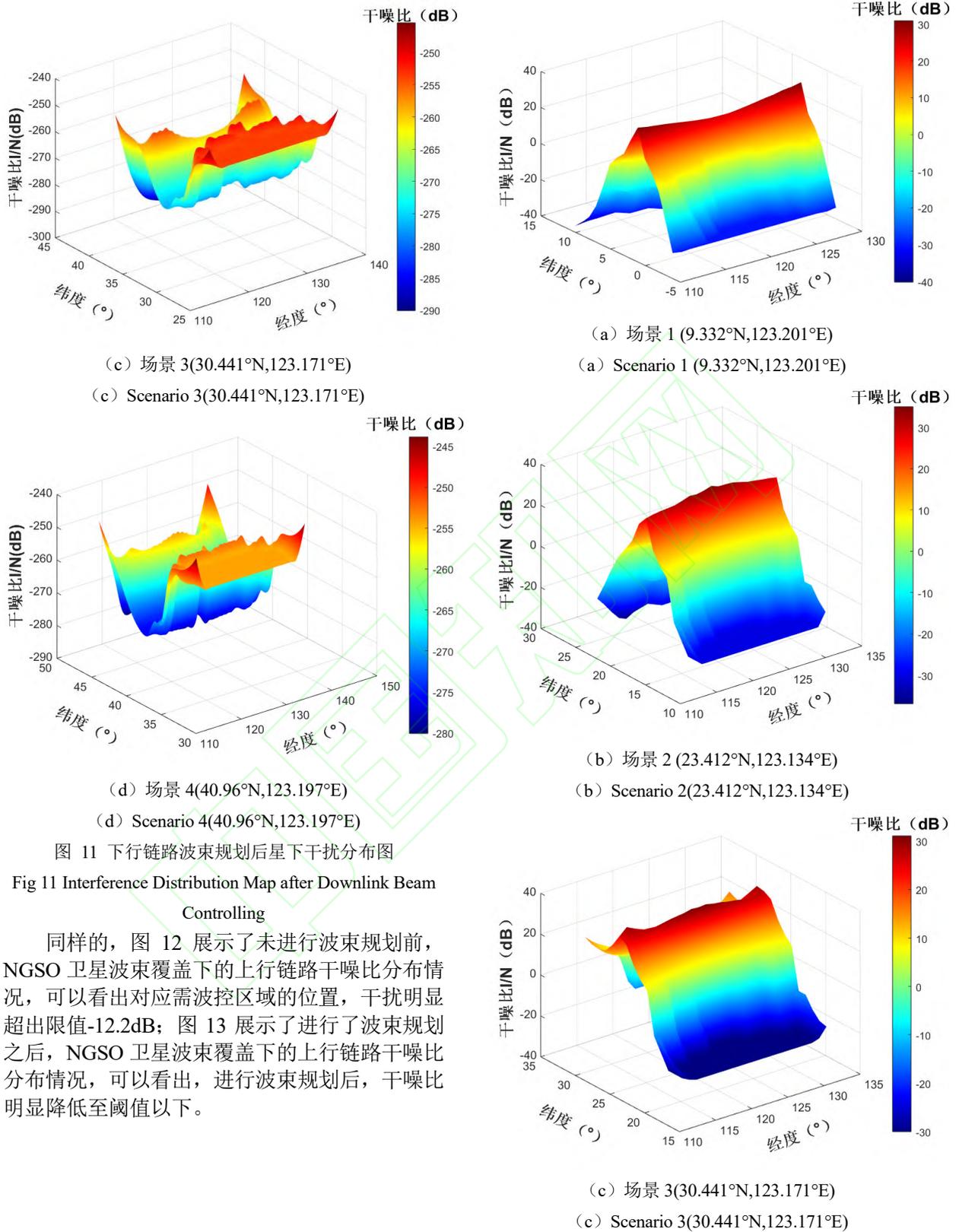


图 11 下行链路波束规划后星下干扰分布图

Fig 11 Interference Distribution Map after Downlink Beam Controlling

同样的, 图 12 展示了未进行波束规划前, NGSO 卫星波束覆盖下的上行链路干扰比分布情况, 可以看出对应需波控区域的位置, 干扰明显超出限值-12.2dB; 图 13 展示了进行了波束规划之后, NGSO 卫星波束覆盖下的上行链路干扰比分布情况, 可以看出, 进行波束规划后, 干扰比明显降低至阈值以下。

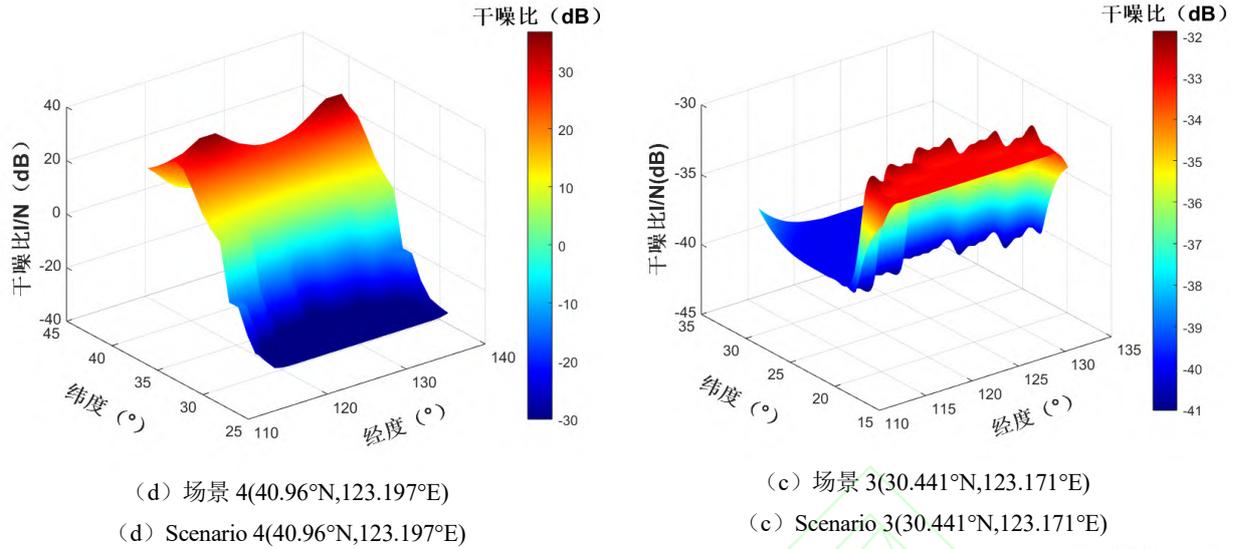


图 12 上行链路波束规划前星下干扰分布图

Fig 12 Interference distribution map before uplink beam

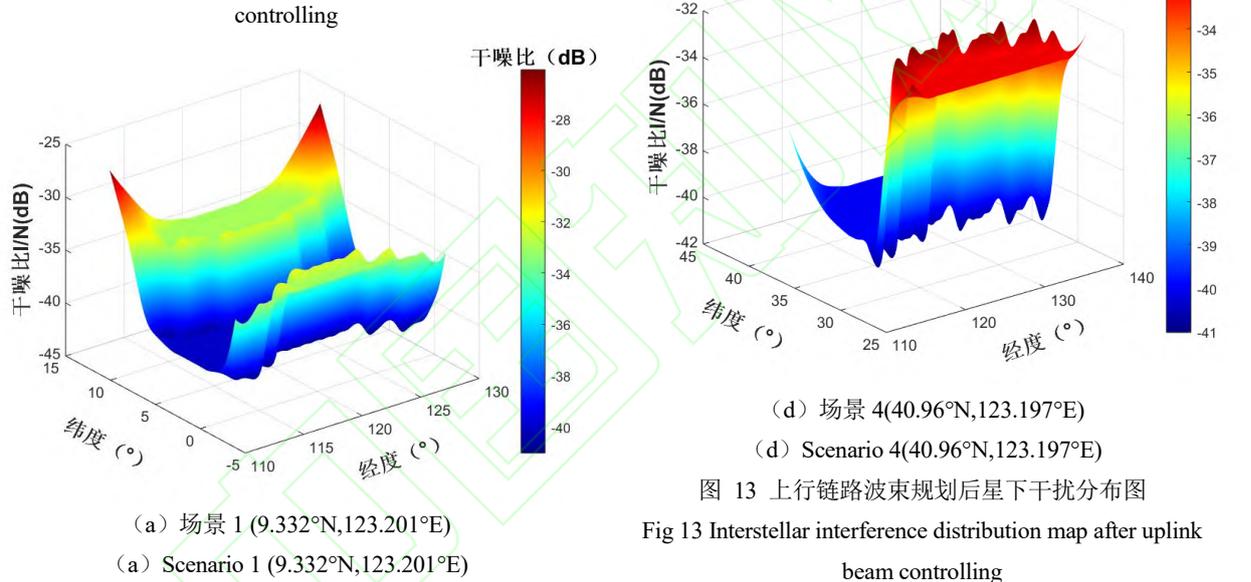


图 13 上行链路波束规划后星下干扰分布图

Fig 13 Interstellar interference distribution map after uplink beam controlling

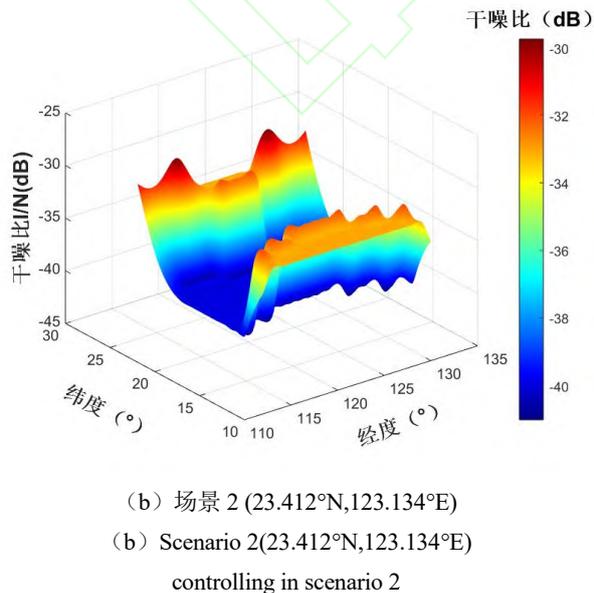


图 14、15 分别展示了未进行干扰规避前，NGSO 卫星波束覆盖遍历全球的上行、下行场景干扰比分布情况，可以全球大部分区域均存在干扰超出限值-12.2dB 的情况；图 16、17 展示了进行了波束规划干扰规避之后，NGSO 卫星波束覆盖遍历全球的上行、下行场景干扰比分布情况，可以看出全球所有区域均不存在干扰，说明了本方法的有效性。

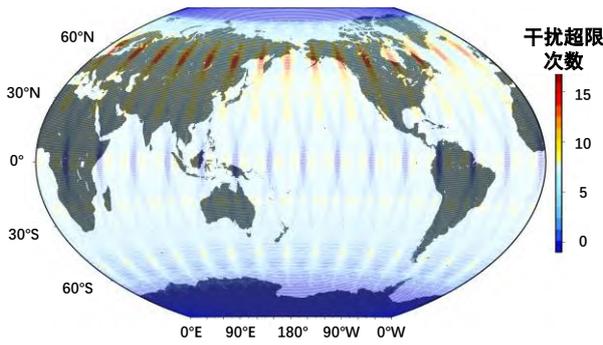


图 14 下行链路波束规划前全球干扰频度图
Fig 14 Global interference frequency picture before downlink beam planning

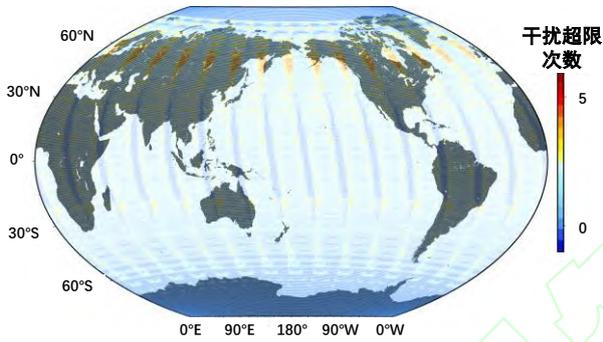


图 15 上行场景波束规划前全球干扰频度图
Fig 15 Global interference frequency picture before uplink beam planning

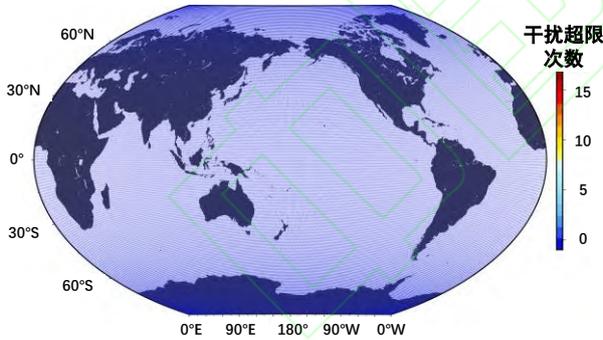


图 16 下行链路波束规划后全球干扰频度图
Fig 16 Global interference frequency picture after downlink beam planning

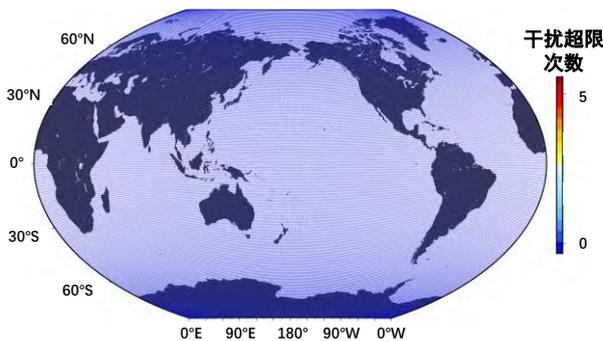


图 17 上行场景波束规划后全球干扰频度图
Fig 17 Global interference frequency picture after uplink beam planning

另外, 从图 7、图 8 和图 9 可以看出, 在进行干扰规避时, 无论是上行链路还是下行链路, 仍有部分波束保持工作。在传统的基于隔离角或隔离带的干扰规避方法中, NGSO 卫星系统使用波束切换的方法来实现干扰规避, 即卫星在进入规避区域后, 需要关闭全部波束, 而地面站需要与邻近未在规避带内的 NGSO 卫星进行通信[15], 这对 NGSO 卫星星座的密度有所要求, 且使处于规避带内的 NGSO 卫星波束利用率近似为 0。为进一步说明卫星的波束使用情况, 引入波束利用率作为评价指标, 具体定义为下式

$$R_{beam} = 1 - \frac{num_{K_{off}}}{num_K} \quad (11)$$

其中, $num_{K_{off}}$ 表示已关闭的波束数量, num_K 表示总波束数量。

图 18、图 19 展示了基于本方法的上行、下行链路的波束利用率在不同经纬度条件下的情况。可以看出, 在不同经纬度场景下, 本方法针对上行、下行链路的单星波束利用率均高于 38.9%, 证明了方法的有效性。

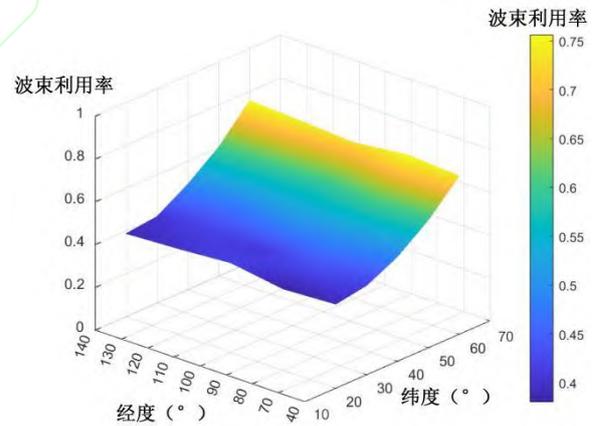


图 18 下行链路不同经纬度下的波束利用率
Fig 18 Downlink beam utilization at different latitude and longitude

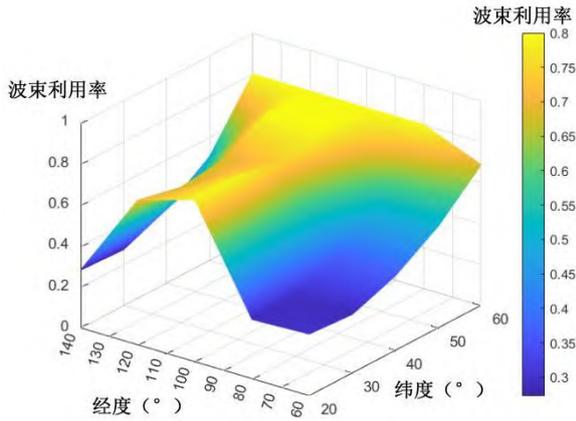


图 19 上行链路不同经纬度下的波束利用率

Fig 19 Uplink beam utilization at different latitude and longitude

4 结论

本文提出了一种基于空间隔离禁区的星载相控阵天线干扰规避波束规划方法，在对干扰规避隔离禁区实现了量化分析基础上，提出了具体的波束规划方法，通过地面均匀网格枚举，建立了空间隔离禁区与波束调度策略的映射机制，形成 NGSO 星座系统多波束的全球规划地图，克服了传统基于隔离角或隔离带的干扰规避方法需要关闭全部卫星波束的缺点，实现了 NGSO 卫星波束调度图案设计，为 NGSO 卫星系统的设计与波束服务调度提供了方法参考和技术支撑。

参考文献 (References)

[1] ITU. Radio regulations[Z]. Geneva: [s.n.], 2024.
 [2] RADTKE J, KEBSCHULL C, STOLL E. Interactions of the space debris environment with mega constellations—using the example of the OneWeb constellation[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 131: 55-68.
 [3] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 123-135.
 [4] MCDOWELL J C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 892(2): L36.
 [5] 吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座

发展研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(1): 1-11.

WU S F, WANG W, WEN J F, et al. Review on development of LEO Internet constellation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(1): 1-11. (in Chinese)

[6] 赵长林. 大规模非静止轨道互联网卫星星座间同频干扰分析和干扰规避研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.

ZHAO C L. Analysis and avoidance method of Co-frequency interference between large scale Non-geostationary Internet satellite constellations[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.(in Chinese)

[7] BRAUN C, VOICU A M, SIMIC L, et al. Should we worry about interference in emerging dense NGSO satellite constellations? [C]//Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2019: 1-10.

[8] ITU-R. Apportionment of the allowable error performance degradations to fixed-satellite service (FSS) hypothetical reference digital paths arising from time invariant interference for systems operating below 30 GHz: ITU-R S.1432-1[S/OL]. (2006-04-27)[2024-06-30].

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.1432-1-200604-I!!PDF-E.pdf.

[9] HE Y Z, LI Y, YIN H. Co-frequency interference analysis and avoidance between NGSO constellations: challenges, techniques, and trends[J]. *China Communications*, 2023, 20(7): 1-14.

[10] 董苏惠, 潘冀, 姚秀娟, 等. 融合功率分配策略的 NGSO-GSO 频率干扰计算方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(4): 1382-1392.

DONG S H, PAN J, YAO X J, et al. Research on NGSO-GSO frequency interference calculation method fused with power allocation strategy[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(4): 1382-1392. (in Chinese)

[11] 王闯, 胡婧, 李永强, 等. 空间信息网络中面向双卫星的频谱共享方法[J]. *航空学报*, 2019, 40(9): 322863.

WANG C, HU J, LI Y Q, et al. Spectrum sharing method for dual satellite in space information network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,

2019, 40(9): 322863. (in Chinese)

[12] REED A G, POSEN M C J. Interference in the fixed satellite service bands between the feeder-links of networks using non-geostationary satellites and network using geostationary satellites [C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Satellite Communications-ECSC-3, 1993: 251-256.

[13] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Cognitive radio techniques for satellite communication systems[C]//Proceedings of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2013: 1-5.

[14] ITU-R. Procedure for determining if coordination is required between geostationary-satellite networks sharing the same frequency bands: ITU-R S.738-0[S/OL]. (1992-03-08)[2024-06-30]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.738-0-199203-1!!PDF-E.pdf.

[15] 张泓湜, 蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(9): 1909-1917.

ZHANG H S, JIANG B F. Spatial isolation methodology for spectral coexistence in LEO satellite systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 1909-1917. (in Chinese)

[16] DING X J, REN Z Z, LU H B, et al. Improving SINR via joint beam and power management for GEO and LEO spectrum-sharing satellite communication systems[J]. China Communications, 2022, 19(7): 25-36.

[17] 王海旺, 邹诚, 常家超, 等. 基于发射波束旁瓣零陷的低轨卫星干扰规避策略[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024, 41(4): 541-549.

WANG H W, ZOU C, CHANG J C, et al. Interference avoidance strategy for LEO satellite based on transmit beam sidelobe nulling[J]. Journal of the University of Chinese Academy of Sciences, 2024, 41(4): 541-549. (in Chinese)

[18] 韩晓娱, 刘昊昱, 张世层, 等. LEO 卫星系统对 GSO 卫星系统干扰规避技术研究[J]. 计算机与网络, 2024, 50(1): 74-79.

HAN X Y, LIU H Y, ZHANG S C, et al. Research on interference avoidance technology of LEO satellite

systems to gso satellite systems[J]. Computer and Network, 2024, 50(1): 74-79. (in Chinese)

[19] 邹诚. 低轨卫星通信系统频谱兼容技术研究[D]. 上海: 中国科学院微小卫星创新研究院, 2023.

ZOU C. Spectrum compatibility study for low earth orbit satellite communication system[D]. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)

[20] HILLS A, PEHA J M, MUNK J. Feasibility of using beam steering to mitigate ku-band LEO-to-GEO interference[J]. IEEE Access, 2022, 10: 74023-74032.

[21] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. NGSO satellites beam hopping strategy based on load balancing and interference avoidance for coexistence with GSO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 27(1): 278-282.

[22] ITU. USASAT-NGSO-8A[EB/OL]. (2025-07-08)[2024-04-15]. <https://www.itu.int/itu-r/space/apps/public/spaceexplorer/networks-explorer/space-stations/dashboard/non-plans/USASAT-NGSO-8A/124545285>.

[23] ITU-R. Satellite antenna radiation patterns for non-geostationary orbit satellite antennas operating in the fixed-satellite service below 30 GHz: ITU-R S.1528-0[S/OL]. (2001-06-28)[2024-07-02]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.1528-0-200106-1!!PDF-E.pdf.

[24] ITU-R. Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites: ITU-R S.580-6[S/OL]. (2004-01-06)[2024-07-02].

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.580-6-200401-1!!PDF-E.pdf.