Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Theory and Key Technologies in Satellite Internet Networking—Article

空间环境效应对大规模卫星星座的影响——从节点、链路到网络性能

盛敏，周笛*，姬思敬，白卫岗，朱彦，刘俊宇，李建东

State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 10 January 2025
Revised 23 June 2025
Accepted 21 July 2025
Available online 30 July 2025

关键词
大规模卫星星座
网络拓扑结构
空间环境效应
系统吞吐量容量

摘要

大规模卫星星座（satellite mega-constellations, SMCs）在运行过程中面临复杂多样的空间环境效应挑战。尽管已有研究从物理器件角度对部分空间环境效应的作用机制进行了分析，但其对星座网络性能的具体影响仍缺乏系统性刻画。为此，本文系统研究了太阳辐射、电离辐射及空间碎片等典型空间环境效应的时空分布特征及其在星座节点与链路中引发的失效机制，并进一步分析了太阳辐射与单粒子效应对星座系统性能，尤其是网络吞吐量容量的影响规律。结果表明，在空间环境作用下，SMC 系统的吞吐量容量退化程度随轨道高度与倾角等星座参数的不同呈显著变化。本研究有效填补了空间环境效应与网络层建模之间的研究空白，首次在网络层面对空间环境所产生的影响进行了量化分析。最后，本文展望了未来在星座拓扑控制、体系结构优化与路由策略设计等方向的研究潜力，为应对空间环境引发的网络性能损伤问题提供了理论支撑。

© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

随着全球高通量通信、低时延服务以及实时遥感与监测需求的快速增长，大规模卫星星座（satellite mega-constellations, SMCs）已逐渐成为新一代全球信息基础设施的关键组成部分。通过提供连续的全球覆盖能力，SMCs 在海洋、太空与网络等多场景下实现了通信盲区的有效填补，成为空天一体化系统发展的关键支撑[1–6]。目前，全球已有约30组低轨（low Earth orbit, LEO）卫星星座系统投入运行或部署中，每组星座通常包含数百至数千颗卫星，轨道高度分布在300~2000 km之间，并通过激光或微波链路实现星间互联，从而构建出具备实时数据采集、传输与处理能力的星上网络架构。然而，复杂多变的空间环境对系统的稳定运行构成了严峻挑战。

空间环境包括一系列复杂因素，如图1所示，太阳辐射、空间碎片、高能粒子诱发的单粒子效应（single-event effects, SEEs）、原子氧腐蚀等空间环境因子持续作用于星座系统，可能引发元器件异常、链路中断、性能损伤等问题，这种现象被统称为空间环境效应[7–8]。据美国国家地球物理数据中心统计，1977—1986年间共记录到40颗美国卫星发生1589次异常事件，其中，约70%与空间环境有关；中国空间技术研究院也报道，2000—2017年间我国发射的120颗航天器共经历了2593次在轨异常事件，其中约50%可归因于空间环境因素，表明其已成为引发永久性、间歇性及不稳定故障的主要来源。

在长期暴露于空间环境的过程中，星载通信设备可能

* Corresponding author.
E-mail address: zhoudi@xidian.edu.cn (D. Zhou).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 54(11): 93–102
引用本文：Min Sheng, Di Zhou, Sijing Ji, Weigang Bai, Yan Zhu, Junyu Liu, Jiandong Li. Effects of Space Environment on Satellite Mega-Constellations: From Nodes and Links to Network Performance. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.07.024

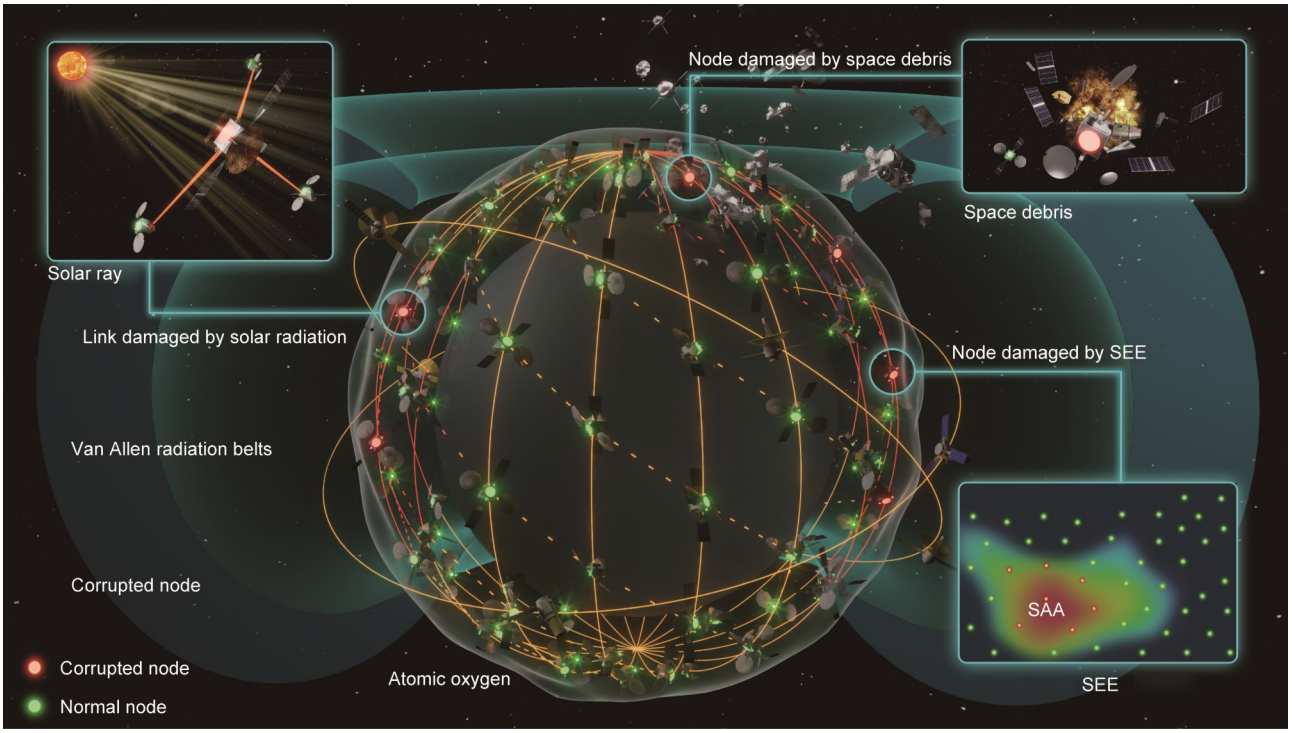

图1. 各类空间环境效应的可视化示意图。SAA：南大西洋异常区（South Atlantic Anomaly）。

遭遇暂态或永久失效，如收发模块功能紊乱、存储或控制单元中的单粒子翻转（single event upsets, SEUs）、星间链路（inter-satellite links, ISLs）性能下降等问题，均会对星座系统运行产生深远影响[9–11]。尤其随着星座规模不断扩大，环境效应所带来的影响愈发显著。例如，在2022年10月之前，SpaceX的星链系统曾出现约10%的卫星失效率，并多次发生大规模通信中断事件，严重影响其服务性能与用户体验。此类现象不仅导致单颗卫星的寿命缩短，更可能引发网络层级的性能劣化，如吞吐量下降、丢包率升高与全球覆盖能力削弱等。

当前对于空间环境效应的研究多聚焦于物理层级，其在网络层面上的系统建模与性能评估尚不成熟。尤其缺乏能够刻画空间环境时空分布特征，并用于评估星座网络性能变化的理论模型。为填补这一空白，本文从轨道高度、轨道倾角与星座规模等核心参数出发，系统分析了空间环境效应对SMCs性能的多层影响机制，并提出提升系统长期可靠性的策略建议。

本文的主要贡献如下：

（1）系统研究了典型空间环境效应对星座节点与链路的影响机制，分析其时空分布特征，为网络级建模提供了基础支撑；

（2）针对太阳辐射与单粒子效应，探讨其在不同星座参数下对系统吞吐量容量的影响规律；

（3）提出多项面向未来的系统优化策略，包括拓扑结构调整、路由机制设计与体系结构演化等，以缓解环境效应对网络性能的损伤。

本文结构安排如下：第2节回顾已有关于空间环境效应建模及对卫星系统损伤机制的相关研究；第3节介绍主要环境效应原理，并分析其在不同星座参数下引发的节点与链路失效率变化；第4节研究其对网络吞吐量容量的影响；第5节提出一系列应对措施；第6节对全文进行了总结。

2. 相关工作

空间环境效应主要源于多种复杂的外部环境条件，包括电离层等离子体、辐射带、高速粒子流以及剧烈的温度变化等因素。如表1所示，不同空间环境条件会诱发多种类型的环境效应。例如，太阳辐射会引起热致膨胀，并产生背景光噪声，进而干扰星间激光通信链路的稳定性；电离辐射可在电子系统中诱发单粒子翻转，引发功能异常，降低卫星可用性；而微流星体与空间碎片之间的碰撞则构成极端破坏性风险，甚至可能直接摧毁在轨卫星系统。针对空间环境效应的研究主要集中在两个方向：一是从物理层面解析环境因子的作用机理；二是针对单星系统中各类故障过程的数学建模与定量分析。本节将围绕上述两个研

究维度，对已有的空间环境效应分析方法与故障建模技术进行系统回顾。

2.1. 空间环境效应的物理模型

现有空间环境效应的建模研究主要集中于单星系统，重点关注辐射效应、充放电现象以及高能粒子与高速微小碎片等外部因素与星载器件的相互作用机制。目前，典型的建模体系包括美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）戈达德航天中心的空间天气实验室模型以及中国科学院国家空间科学中心的空间环境效应实验室所提出的建模框架[12]。在此基础上，本文进一步分析了几类对卫星系统影响显著的代表性空间环境效应。

（1）单粒子翻转是最为关键的瞬态故障形式之一，主要由质子或重离子等高能粒子击中微电子电路中的敏感区域所引发，可能导致存储单元或逻辑单元发生比特翻转，进而引发数据破坏或程序中断。SEU的发生过程通常建模为泊松过程，用以描述粒子作用的随机性。该类模型已集成至多个仿真平台中，如OMERE（美国TRAD公司）与空间环境信息系统（Space Environment Information System, SPENVIS；比利时皇家空间气象研究所）[13]，支持在不同轨道高度与屏蔽条件下，对特定环境中的翻转率进行预测。

（2）空间碎片效应是引发系统失效的另一主要来源。即使是亚厘米级的微小碎片，在轨道速度下也可能对卫星表面结构（如太阳翼、天线等）造成不可逆损伤。该类风险通常基于轨道碎片的空间密度与速度分布进行统计建模。例如，欧洲航天局（European Space Agency, ESA）开发的MASTER系列模型[14]可用于不同轨道区域下的碎片通量估计与碰撞概率建模，是评估长期服役任务中卫星存活概率的重要工具。

（3）太阳背景光干扰对于采用光学通信的星座系统尤为敏感。当卫星运行于晨昏交界区域附近时，其姿态与太阳方位关系更易导致直射阳光进入接收光学系统，从而引起信噪比下降以及通信质量退化[15–16]。该类干扰效应常通过太阳矢量与星间链路矢量之间的夹角几何关系进行定量评估。尽管该类干扰效应属于瞬态效应，但在大规模星座中可能引发短时链路中断及整体通信性能下降。

（4）总电离剂量效应的累积作用会对电子器件的长期可靠性构成潜在威胁。在长期暴露于范艾伦辐射带、太阳高能粒子和宇宙射线等背景下，半导体材料中不断积累的能量沉积将导致器件参数漂移（如阈值电压变化、漏电流增大等），逐步引发性能损伤。总电离剂量效应通常集成于多个空间辐射环境模拟工具中，如AE8、AP9与CRÈME96等NASA模型[17]，其影响程度与轨道高度、屏蔽厚度及任务周期密切相关，在定位导航或对地观测等长期任务星座中尤为关键。

2.2. 卫星器件故障过程的数学建模方法

在空间环境作用下，单颗卫星器件的故障过程通常采用不同类型的数学模型进行描述。考虑到故障行为具有高度随机性，现有研究多将其建模为不同类型的随机过程，以便在故障情形下对系统或网络性能进行分析。例如，俄罗斯科学院地磁电离层与无线电波研究所曾基于异常空间天气条件下的卫星轨道运行情况，提出了空间环境引发的节点与链路损伤分类模型[18–19]，并在此基础上建立了对单星系统损伤程度的量化分析框架[20–21]。在节点与链路中，对卫星平台及载荷组件进行损伤建模时，Weibull分布是一类常见的失效概率模拟工具，可有效刻画器件随在轨寿命延长而失效率逐渐上升的过程[22–23]。其概率密度函数（probability density function, PDF）表示为

$$f(t;\varphi,\psi)=\begin{cases}\dfrac{\psi}{\varphi}\left(\dfrac{t}{\varphi}\right)^{\psi-1}\mathrm{e}^{-(t/\varphi)^{\psi}} & t\geq 0\\ 0 & t<0\end{cases} \tag{1}$$

式中，f为Weibull分布的概率密度函数；t表示器件的运行时间；$\phi>0$为尺度参数，通常与系统的特征寿命相关；$\psi>0$为形状参数，决定失效率随时间增长的变化趋势。ϕ与ψ的具体取值通常依据器件类型与故障模式进行设定[24–25]。当多个器件在空间环境作用下发生独立失效时，

表1 空间环境类型、典型效应及其对卫星系统的影响

Space environments	Effects	Impacts on satellites
Solar and thermal environment	Background noise	Interruptions to communication
		Thermal deformation
Radiation belt particles	Single event effects	Deterioration of device performance
Meteoroids and space debris	Puncture of surface	Destruction of orbital resources
Atomic oxygen	Erosion and oxidation	Performance degradation and contamination of optical equipment
Ionospheric plasma	Parasitic currents	Attenuation of signals

卫星整体的可靠性将大幅下降[26]。此类情形可采用泊松分布建模，其在给定时间段内失效事件的发生次数服从离散型随机过程，任意两次连续故障之间的时间间隔服从指数分布。这一建模方法适用于短时多器件独立故障发生的场景。

然而，现有模型多从物理层面刻画单星或器件的失效行为，较少考虑多器件之间的耦合关系与影响范围，也缺乏对空间环境时空分布特征的系统性建模[27]。随着星座规模的持续扩大，单星级模型在系统层和网络层上的适用性逐渐受限，难以准确反映空间环境效应对整体系统性能的影响。因此，本文从空间环境现象出发，系统分析了空间环境效应在节点、链路及星座网络层级上的作用路径，旨在为后续建立“环境-网络性能”映射关系的建模工作提供理论基础。

3. 空间环境效应对SMC节点与链路的影响

在复杂多变的空间环境中，各类高能带电粒子辐射会对在轨卫星造成严重威胁。其中，单粒子效应是一类尤为典型的损伤机制，主要由单颗高能粒子撞击微电子器件的敏感区域所引发。常见的SEE类型包括SEU、单粒子锁存、单粒子烧毁以及单粒子栅击穿，其中SEU的发生频率最高。此外，太阳辐射还会直接干扰卫星的敏感光学传感器，产生背景光噪声，导致接收信号质量下降，进而影响星间链路通信的稳定性与可靠性。相关干扰可能造成链路中断，严重制约星座系统整体的通信保障能力。与此同时，空间碎片的累积风险也在不断上升，成为影响系统长期性能的重要因素。例如，2024年3月，执行中国“千帆星座”首批18星任务的长征六号甲火箭，其末级意外碎裂并产生逾300块碎片，在轨安全形势因此进一步恶化。

综上，空间环境的影响具有显著的时空差异性，并受轨道高度、倾角等星座参数调控。为了全面认识环境效应在不同星座配置下的表现特征，本文聚焦于节点与链路的损伤行为展开系统分析，为后续网络性能建模奠定基础。

3.1. 电离辐射对节点故障的影响

地球磁层能够将来自太阳风的高能带电粒子引导并俘获于辐射带中，在该区域内粒子持续积聚，形成高能辐射环境。当地磁场发生变化时，尤其在低轨高度下运行的卫星，易受到强烈电离辐射的干扰，进而诱发SEE。其中，SEU是最常见的SEE类型，主要由质子与重离子触发。SEU的发生频次可通过FOM法[28]进行估算，表达式为

$$R=\left(C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{h}}\right)\times\delta_{\mathrm{hL}}/L_{0.25}^{2} \tag{2}$$

式中，R表示预估的SEU发生次数；C_{p}与C_{h}分别为质子与重离子引发翻转的轨道翻转率系数；δ_{hL}表示重离子诱导的饱和截面值；$L_{0.25}^{2}$为对应于该饱和截面25%处的线性能量转移值。如图2（a）所示，红色区域表示南大西洋异常区（South Atlantic Anomaly, SAA），该区域因地磁异常导致电离辐射水平显著升高，是SEE高发区域。卫星经过此区域时，其器件面临更高的损坏与失效风险。然而，SEE的影响并不局限于SAA，其影响区域会向两侧扩展，本文称之为SEE区域（SEEs region），其以紫色标记表示。图2（a）所示为SAA与SEE区域的空间分布示意图，用于说明不同空间位置下的辐射环境差异。

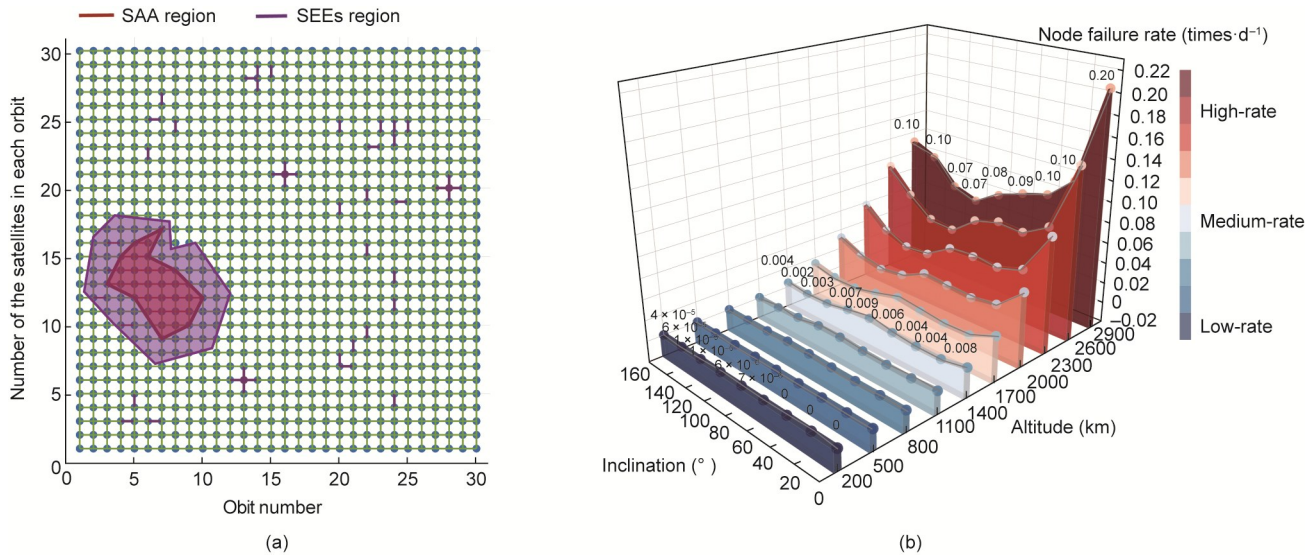

图2. 南大西洋异常区与单粒子效应引发的节点失效率分布图。（a）SAA与SEE区域的空间分布示意图，红色区域表示SAA，紫色区域表示扩展后的SEE区域；（b）不同轨道高度与轨道倾角下的节点失效率分布图，色标表示由SEU引发的节点失效率。

统计研究表明，约95%的SEU发生在SEE区域内部[29]。在该区域内，SEU的发生呈现明显的空间聚集性，且翻转事件在单个位元层面上服从泊松分布（Poisson distribution）。这一统计规律已通过大量长期观测数据得到验证，其概率模型可表示为

$$P(k)=\frac{\lambda^k \mathrm{e}^{-\lambda}}{k!},\quad k=1,2,3,\ldots \tag{3}$$

式中，P为泊松分布的概率密度函数；k为单位时间内SEU的发生次数；λ为单位时间内SEU的平均发生次数，即该器件在给定环境与屏蔽条件下的平均翻转率。$k=0$表示该时间段内器件未发生翻转事件，即设备处于“无SEU”状态；因此设备发生至少一次SEU的概率可表示为

$$P_R=1-\mathrm{e}^{-\lambda} \tag{4}$$

式中，P_R为SEU的发生概率。

尽管上述泊松分布表达式在估算SEU概率方面具有一定适用性，但其本质为统计平均模型，忽略了空间环境效应的时空分布特征与累积作用。该类模型通常假设翻转事件在空间上独立均匀分布，难以反映轨道参数对节点故障率的调制作用。因此，为更准确刻画SEU的轨道分布规律，本文基于SPENVIS平台[30]对不同轨道参数下的SEU发生率进行仿真分析。仿真结果如图2（b）所示，色标表示由SEU引发的节点失效率：红色代表高失效率区域，蓝色代表低失效率区域。结果表明，随着轨道高度的上升，SEU发生率显著增加；在更高轨道下，不同轨道倾角对应的节点失效率差异也更为明显，且在倾角约为15°和150°附近出现两个明显的SEU概率峰值。该现象的形成机制主要与范艾伦辐射带的空间分布结构相关。随着轨道高度上升，卫星运行路径更易穿越被高能粒子环绕的辐射带区域，受到质子与电子通量的综合轰击，导致SEU风险显著上升。而倾角为15°和150°附近的轨道，更容易穿越地磁场结构中高通量聚集区域，进一步增强了局部粒子沉积，造成节点敏感器件的高翻转概率。因此，对于运行在高轨道或特殊倾角轨道上的卫星星座系统，应在设计阶段加强对SEU敏感性与可靠性的评估，并采取针对性防护与容错机制，以提升系统长期稳定性。

3.2. 空间碎片对节点故障的影响

随着人类太空活动的持续频繁开展，地球轨道上的空间碎片数量呈快速增长态势，碎片密度显著提升，严重威胁在轨航天器的运行安全。空间碎片与航天器之间的平均碰撞速度约为10 km·s^{-1}，在如此高相对速度下，即使是微米至厘米级别的微小碎片，其所携带的动能也足以在撞击瞬间产生强烈冲击波，造成远超其体积的结构破坏。特别是对卫星节点部件（如电源系统、姿控单元、光学载荷等）而言，空间碎片的直接撞击可能引发不可逆的功能失效，成为引起卫星中断、通信丢失甚至报废的关键诱因。因此，虽然微小空间碎片碰撞不易被观测，但其对卫星系统长期可靠性的影响不容忽视。

截至2024年4月，全球已编目的在轨航天目标统计如表2所示。其中，美国在轨目标数量为12 601个，占全球总量的约46%；其次为俄罗斯（7097个）与中国（5004个），这一数据凸显了三国在轨道环境演化中的重要影响力。从目标特性来看，仅约44%为功能性载荷，其余56%均为退役火箭体与空间碎片，这反映出当前轨道资源管理效率与空间碎片治理水平仍有较大提升空间。如图3（a）所示，基于MASTER-2009 [31]模型的仿真结果显示，大部分空间碎片密集分布在低轨道区域，主要集中在450~1200 km高度范围内。此外，高倾角轨道（如极地轨道、太阳同步轨道）的碎片密度也显著更高，且覆盖粒径范围广，成为潜在的碎片聚集高风险区。图3（a）中的色标用于表示空间碎片的密度分布情况：红色区域对应高碎片密度区域，而紫色区域则代表相对稀疏区域。上述现象表明，轨道高度与轨道倾角是影响空间碎片密度分布的关键因素，对在轨节点的抗毁性设计具有重要参考意义。

基于空间碎片的密度分布特性，本文采用已有建模方法[32]对单颗卫星的预期碰撞次数N进行估算。计算中综合考虑了轨道持续时间Δt、空间碎片的空间分布密度S_d以及卫星的等效碰撞截面积A，相对平均碰撞速度设定为

表2 不同国家在轨目标数量

Country/region	Payload (units)	Decommissioned rocket bodies and debris (units)	Total number (units)
United States	7 590	8 011	12 601
Russia	1 568	5 529	7 097
China	674	4 330	5 004
United Kingdom	701	1	702
France	88	533	621
Japan	208	111	319
European Union	96	28	124
Other countries	1 180	83	1 263
Total	12 105	15 626	27 721

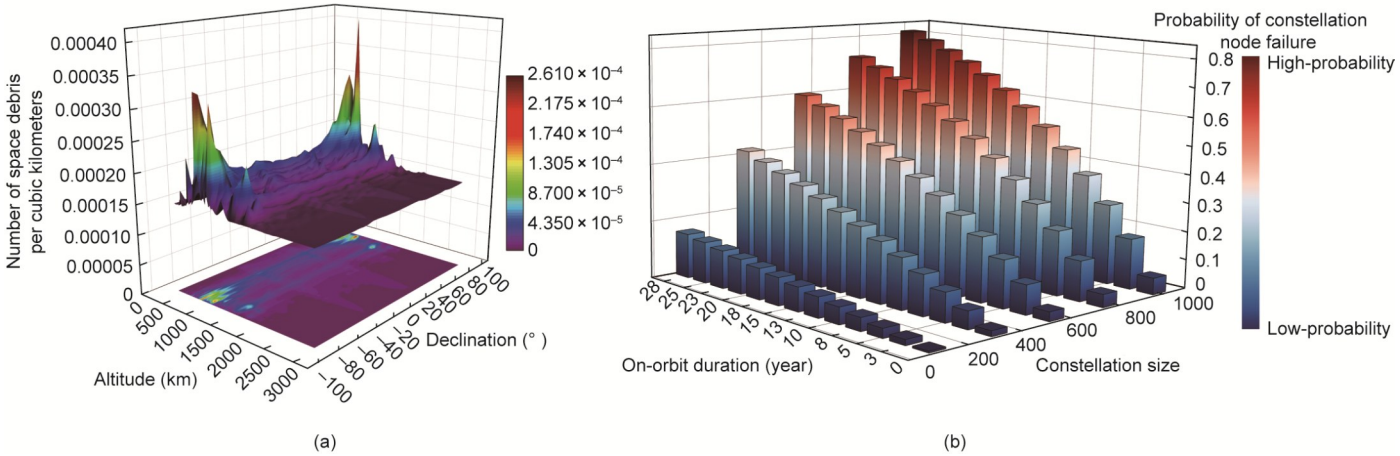

图3. 空间碎片空间密度分布及其对星座节点失效率的影响。（a）不同轨道高度与轨道倾角下的空间碎片密度分布，色标表示单位体积（km³）内的空间碎片数量；（b）星座规模与任务寿命对节点失效率的影响，色标表示星座节点的失效概率。

$v = 10\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$。对应的碰撞次数的计算公式如下：

$$N = A \cdot S_{\mathrm{d}} \cdot v \cdot \Delta t \tag{5}$$

因此，对于给定规模为N_{Sat}的卫星星座，其在任务周期内的总预期碰撞次数N_{SMCs}可表示为

$$N_{\mathrm{SMCs}} = N_{\mathrm{Sat}} \cdot N \tag{6}$$

考虑到空间碎片碰撞事件之间在统计意义上相互独立，且其在单位时间内的发生率可被视为常数，故可将其建模为泊松过程。据此，星座中任意节点在任务周期内发生至少一次碰撞（即发生失效）的概率可表示为

$$P_{\geq 1} = 1 - \exp\left(-N_{\mathrm{SMCs}}\right) \tag{7}$$

式中，$P_{\geq 1}$表示星座节点失效概率。

如公式（5）~（7）所示，结合空间碎片密度、任务寿命与星座规模等参数，可计算得到星座节点在任务期间遭受碎片碰撞而失效的概率。图3（b）展示了在不同星座规模与任务寿命设定下，空间碎片对节点失效概率的影响分布。图中色标表示节点失效概率：红色区域代表较高的失效概率，蓝色区域代表失效概率较低。仿真结果表明，随着星座规模的扩大，系统中节点总数增加，累计遭遇空间碎片的风险显著上升；因此，星座规模越大，对其整体抗毁性要求越高。另外，任务寿命越长，节点在轨运行时间越久，受到空间碎片撞击的累积概率随之增加，成为制约长期可靠性的关键因素。值得注意的是，随着商业航天发射频率不断提升，轨道空间中的碎片总量仍在持续增加，轨道环境呈现出动态演化特征。若忽视碎片背景随时间增长的变化趋势，将低估长期任务的失效风险。因此，在进行星座系统设计与寿命规划时，应充分考虑碎片环境的动态演化过程，以确保未来SMCs的在轨运行安全与可持续发展。

3.3. 太阳辐射对卫星链路损伤的影响

在两颗卫星建立激光星间链路之前，发射端必须首先将激光波束精确对准接收端所在的视场（field of view, FOV）。在工程实践中，FOV通常小于1°，对星间姿态稳定性与指向精度提出了极高要求。在通信过程中，发射方与接收方需持续保持链路对准，一旦发生偏移，即可能导致通信中断。当太阳入射方向与星间链路方向之间的夹角θ小于卫星接收端所设定的太阳规避角时，强烈的太阳背景光将进入激光接收器视场，导致链路发生瞬时中断。因此，太阳辐射对激光链路的干扰成为影响星座通信稳定性的关键因素之一。鉴于现有模型在刻画太阳辐射时空分布特性方面存在精度不足，本文采用Satellite Tool Kit（STK）软件构建几何分析模型。首先，基于J2000天球坐标系，提取卫星在运行周期内各时刻的位置矢量$\boldsymbol{r}_{\mathrm{p}}$、太阳赤经RA与太阳赤纬Dec，从而得到对应时刻的太阳矢量$\boldsymbol{r}_{\mathrm{sun}}$。具体可表示为[33]

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{sun}} = \begin{bmatrix} \cos \mathrm{RA} \cos \mathrm{Dec} \\ \cos \mathrm{RA} \sin \mathrm{Dec} \\ \sin \mathrm{RA} \end{bmatrix} \tag{8}$$

发射端与接收端卫星之间的链路方向向量可通过两者的空间位置差值计算得到：

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{P_r - P_e}} = \boldsymbol{r}_{\mathrm{P_e}} - \boldsymbol{r}_{\mathrm{P_r}} \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{r}_{\mathrm{P_r}}$表示接收端卫星在J2000坐标系下的位置矢量；$\boldsymbol{r}_{\mathrm{P_e}}$表示发射端卫星的位置矢量。由此计算得到相对位置矢量。考虑到太阳位于远离地球的天文尺度位置，可将阳光视为平行光源。在该假设下，θ可进一步表示为

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{r}_{\mathrm{P_r - P_e}} \cdot \boldsymbol{r}_{\mathrm{sun}}}{\left\| \boldsymbol{r}_{\mathrm{P_r - P_e}} \right\|} \right) \tag{10}$$

基于上述模型，本文选取由60 × 60颗卫星组成、轨道倾角为45°的星座作为分析对象，利用STK平台开展了

太阳辐射效应的时空特征仿真研究。仿真参数包括：相位因子为0，星间链路视场角为0.7°，运行周期为6308 s。如图4（a）所示，图中“Proportion of damage”（链路损伤比例）表示某一时刻下星座中受太阳干扰导致中断的激光链路数量占星座总链路数的比例。从时间演化角度观察，链路中断呈现明显的周期性波动特征，表现为多个峰值与谷值交替出现，最大链路损伤比例达到0.64%。该特征与卫星周期性运行导致的相对位置变化相关，在后续轨道周期中将呈现持续重复趋势。

图4（b）展示了基于STK仿真的太阳辐射影响下，星座链路失效的空间分布特征。图中红色点代表由于受到太阳辐射影响而被判定为失效的卫星节点，绿色点表示仍保持正常工作的卫星节点。虚线红色链路表示由于组成节点失效而导致通信中断的星间链路，而实心红色带状区域则表示地球晨昏线，即地球受光照面与暗面之间的分界区域。从空间分布的角度来看，链路中断事件主要集中发生在晨昏线附近。当两个通信卫星分别位于晨昏线两侧时，接收卫星更容易暴露在太阳光照射下，太阳光进入其接收FOV的概率显著升高，导致光学链路中断。例如，在第3476秒时，系统中发生了46条链路中断事件，验证了太阳辐射影响的高度集中性。此外，接收视场角FOV的大小对链路失效率具有显著影响。如表3所示，随着FOV的增加，太阳光进入接收视场的概率升高，导致链路失效率也相应上升。当FOV为0.3°时，平均链路失效率为0.17%；而当FOV扩展至0.9°时，平均失效率上升至0.52%，且最大损坏链路数达70条。这表明，较大的视场角虽然提高了通信捕获能力，但却降低了系统对太阳辐射干扰的抵抗能力。

此外，太阳辐射对不同类型的卫星通信链路，即轨道内链路（intra-orbit links）与轨道间链路（inter-orbit links），产生了显著不同的影响。轨道内链路是连接同一轨道面内相邻卫星的链路，而轨道间链路则连接邻近轨道面上的卫星，且其建立规则受轨道结构约束[34–35]。如图5所示，本研究基于公式（8）~（10），利用STK仿真了不同轨道倾角下受到太阳辐射影响的轨道内与轨道间链路，并记录每一倾角下链路中断的最大数量。结果表明，轨道内链路的最大中断数随轨道倾角的增大而增加。这是因为随着轨道倾角的升高，卫星更可能穿越晨昏线区域，而晨昏线在高倾角轨道中与卫星轨道的交叉区域更广，导致更多卫星在同时段内进入该区域。由于更多卫星处于太阳光进入视场的风险位置，链路受损的概率显著提升。然而，在所有轨道倾角条件下，轨道间链路的最大中断数量始终高于轨道内链路。这主要归因于晨昏线的空间几何特性与星座结构的拓扑关系。一方面，晨昏线每次只交叉一个轨道面，意味着同时受影响的轨道内链路最多为两个；另一方面，轨道间链路连接的是多个相邻轨道面上的卫星，且每对轨道面之间通常存在多个互联链路。因此，在密集星座布局下，晨昏线可同时穿越多个轨道间链路，导致大规模中断事件发生。综合来看，轨道间链路在结构上更容易受到太阳辐射影响，其抗毁性较轨道内链路更为脆弱。这一发现对于星座设计及链路冗余策略的制定具有重要参考价值。

表3 FOV对链路失效率的影响

FOV (°)	Average proportion of damage (%)	Minimum proportion of damage (%)	Maximum proportion of damage (%)
0.3	0.17	0.03	0.33
0.5	0.29	0.11	0.47
0.7	0.40	0.25	0.64
0.9	0.52	0.31	0.83

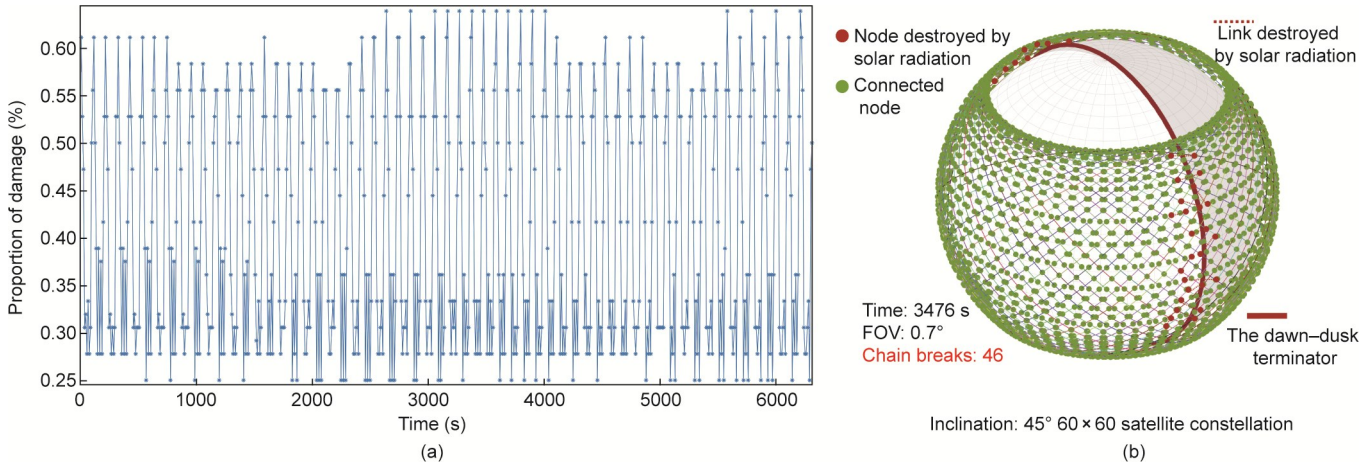

图4. 太阳辐射作用下不同时空环境中星座链路的损伤比例分布。（a）星座链路在时间维度上受太阳辐射影响程度，表现为链路损伤比例随时间的变化趋势；（b）星座链路在空间维度下受太阳辐射影响的分布特征，展示某一时刻下不同区域链路的受损比例。

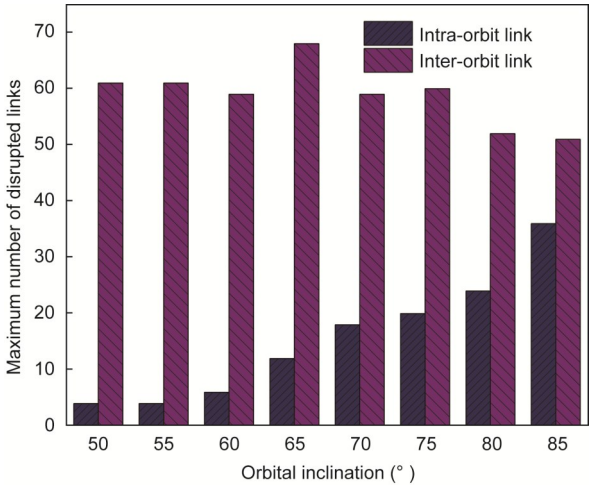

图5. 不同轨道倾角下链路中断的最大数量。

尽管太阳辐射、单粒子翻转以及空间碎片的分布具有随机性，增加了对空间环境效应预测的复杂性，但这些空间环境因素在时空分布上仍表现出一定的规律性，为构建预测模型提供了有价值的参考。通过聚焦空间环境的时空特征，我们可以显著提升卫星星座的稳定性与可靠性。在此基础上，可以利用联合概率分布等方法对不同类型的空间环境效应进行耦合，从而更精确地刻画损伤在空间中的分布特征。

4. 典型空间环境效应对卫星网络容量退化的影响

在前文节点级和链路级损伤建模的基础上，本文进一步将分析拓展至空间环境效应对网络层级的影响。具体而言，文中评估了空间辐射或空间碎片等因素引发的局部故障，如何影响SMCs的吞吐量容量。

LEO SMCs的设计不仅涉及卫星数量、轨道高度和轨道倾角等关键参数的选取，还需构建合理高效的网络架构，以在面临空间环境效应时仍能保持星座系统的最优性能。通过网络性能分析，可提前对不同星座配置进行仿真与优化，从而预测潜在的性能退化问题，避免资源浪费，并提升系统部署的稳定性。在第2节建模分析的基础上，本文进一步评估了太阳辐射和SEU对系统网络性能的影响，尤其关注网络容量的退化。在本研究中，星座网络的吞吐量容量以比特每秒（bit per second, bps）为单位进行衡量。为量化该吞吐量容量，本研究采用了全连接通信模型，假设一个由M颗卫星组成的LEO大规模星座中，每颗卫星以速率λ_0（代表数据传输速率）向其他所有卫星发送通信流。为了尽可能精确地估算网络容量，本研究保持星间链路上的通信流量分布尽可能均匀。因此，采用最短路径路由策略，即从源卫星到目标卫星的路径需包含最少跳数。在该路由策略下，任意两颗卫星之间的通信流量将平均分配到所有可行的最短路径上。更具体而言，如果每条星间链路的负载不超过其带宽上限，则每对卫星之间可实现的数据流速率为λ_0。设c为在所有可能路由策略下所能实现的最大数据流速率。根据文献[36]，网络容量C被定义为在全连接通信模型下，考虑所有可行路由策略时网络所能实现的最大总吞吐量，其数学表达式如下：

$$C = M(M-1)c \tag{11}$$

为计算网络容量，我们将最大可实现流率c构建为一个线性规划问题，用以确定整个卫星网络中的最大λ_0，其表达式如文献[1]所示：

$$\begin{aligned} &c = \max \lambda_0 \\ &\text{s.t. } f_{\mathrm{L}}^{e}(\lambda_0) \le B_{\mathrm{L}}, \forall e \in \mathscr{E} \end{aligned} \tag{12}$$

式中，B_{L}为星间链路的带宽；$f_{\mathrm{L}}^{e}(\lambda_0)$为通过星间链路$e$（$e \in \mathscr{E}$）的通信流量；$\mathscr{E}$为整个卫星网络中所有星间链路的集合。此外，$f_{\mathrm{L}}^{e}(\lambda_0)$可表示为$f_{\mathrm{L}}^{e}(\lambda_0) = \mathrm{Eb}_e \lambda_0$，其中，$\mathrm{Eb}_e$表示链路$e$的使用次数。通过求解上述问题，我们可以得到最大可实现流率。

$$\begin{aligned} &\max_{e \in \mathscr{E}} \ f_{\mathrm{L}}^{e}(\lambda_0) \le B_{\mathrm{L}} \\ &\lambda_0 \le \frac{B_{\mathrm{L}}}{\max\limits_{e \in \mathscr{E}} \mathrm{Eb}_e} \end{aligned} \tag{13}$$

$$c = \frac{B_{\mathrm{L}}}{\max\limits_{e \in \mathscr{E}} \mathrm{Eb}_e} \tag{14}$$

因此，网络的最大可实现流率如式（14）所示得出。例如，我们采用了一个全连接通信模型，其中每颗卫星以最大速率c向所有其他卫星发送数据包。某条星间链路e上所需传输的数据流量表示为$f_{\mathrm{L}}^{e}(c) = \mathrm{Eb}_e c$。为了使所有数据包在单位时间内都能到达目的地，所有星间链路上的流量必须小于其带宽B_{L}。因此，我们可以推导出最大可实现流率的约束条件。

$$\begin{aligned} &\max \ f_{\mathrm{L}}^{e}(c) = B_{\mathrm{L}} \\ &\max \ \mathrm{Eb}_e c = B_{\mathrm{L}} \\ &c = \max \frac{B_{\mathrm{L}}}{\mathrm{Eb}_e} \end{aligned} \tag{15}$$

如图6（a）所示，对于一个由60个轨道面、每轨60颗卫星构成的网络配置，随着相位因子的增加，网络的受影响容量下界和平均值均有所上升，并趋于稳定。当相位因子为0时，网络受到的影响最为显著，受影响容量的下界为未受影响情况的64.2%，平均容量为未受影响情况的73.9%。这是因为当相位因子为0时，大量的轨道间链路与太阳保持固定的角度关系，导致它们同时受到太阳干扰，从而引发更多链路中断，导致网络容量大幅下降。

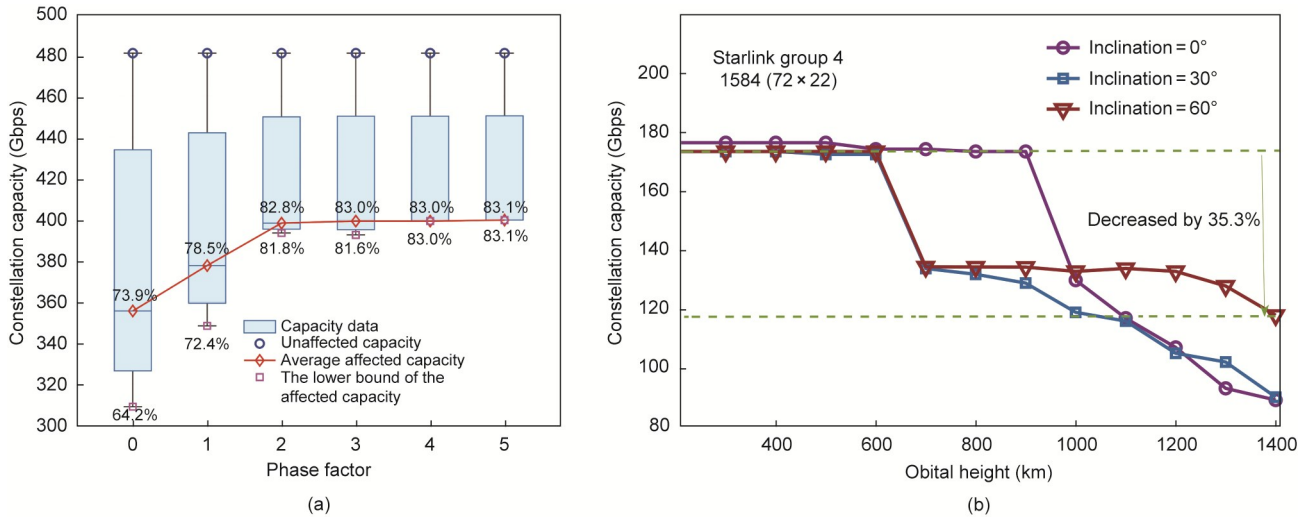

图6. 太阳辐射和SEU影响下，不同卫星参数下的网络容量。（a）太阳辐射影响下，不同相位因子下的网络性能；（b）SEU影响下，不同轨道高度下的网络性能。

而随着相位因子的增大，ISL与太阳之间的角度关系趋于多样化，同时受到干扰的链路数量减少，网络性能得以改善。图6（b）展示了一个包含72个轨道面、每轨22颗卫星的大规模星座网络，在图中所示节点失效概率条件下的网络容量模拟结果。这些节点失效概率随轨道高度的上升而增加，导致更多的链路中断，进而造成网络容量的下降。例如，当轨道高度升高至1400 km且轨道倾角为60°时，网络容量下降了约35.3%。这主要是因为在最短路径路由策略下，局部链路失效会影响流量的路由。当少量链路失效时，原本分配到这些链路的流量需要通过邻近链路绕行，从而在故障区域附近造成流量拥塞，即便仅有少数链路中断，网络容量也会明显下降。此外，本研究还观察到网络容量随轨道高度变化存在一个“阈值点”。在达到该阈值点之前，即使轨道高度增加，网络容量仍相对稳定。这是因为在阈值点之前，单粒子翻转对卫星节点的影响仍较轻微，中断的链路数量较少，对整体容量影响有限。因此，为了尽可能避免太阳辐射与单粒子翻转效应的影响，并最大限度保障巨型星座的网络容量，本研究建议将星座部署在低于该轨道高度阈值的位置，以增强星间链路的稳定性。

5. 未来减缓空间环境效应对网络性能影响的方法

由于大规模星座运行于外层空间环境，其所面临的空间环境效应叠加复杂，包括电磁、热、太阳过境及高能粒子等影响，并且空间环境效应随着轨道分布和高度的变化而不断变化。这些效应会在星座的节点与链路中造成多样化、随机性强且具有区域性的损伤与失效。基于第3节和第4节关于空间环境效应导致的损伤模式的研究结果，本文观察到这些效应具有显著的时空特征。随着星座规模的扩大以及多轨道混合组网趋势的发展，其造成损伤的严重程度也成倍增加，从而显著改变了星座网络拓扑结构，严重削弱了其服务能力。为了减缓空间环境效应对SMC网络性能的影响，本文从通信与组网的角度提出了一些未来可行的研究方向。

5.1. 容错设计与冗余机制

开展容错设计与冗余机制的研究，是提升卫星网络对空间环境效应鲁棒性的重要方向。这一策略包括探索抗辐射元器件的使用，以保证硬件在高辐射环境中的可靠性。未来研究还可以聚焦于构建鲁棒的网络冗余策略，例如，部署多颗卫星以实现无缝的故障切换功能。此外，研究动态切换机制以实现通信路径的实时优化（特别是在面对卫星干扰或失效时），将显著提升网络的可靠性和连续运行能力。

5.2. 自适应通信协议设计

开发自适应通信协议是提升卫星网络在多变空间条件下性能的又一具有潜力的方向。这包括探索动态频谱分配技术，通过切换到干扰较小的频段来缓解电磁干扰的影响；研究可根据信道条件动态调整的先进调制与编码方案，提高数据传输的可靠性；同时，引入鲁棒的错误检测与纠错算法（如先进的低密度奇偶校验码），也有助于在不利环境事件中保障数据完整性。

5.3. 路由与拓扑控制

未来可探索多路径路由策略，结合流量分裂与链路偏

置机制，以提升卫星网络在空间环境效应下的抗毁性。这种策略可实现数据在多条路径上的动态分配，从而实现负载均衡，并降低因单路径中断导致的通信失败风险。研究还可进一步利用链路扰动技术，对网络拓扑进行有意调整，如改变链路权重或引入可控扰动，从而适应诸如干扰或损伤等环境挑战。通过这种动态拓扑调节，有望在恶劣条件下保持网络的连通性与性能，实现鲁棒高效的通信。

5.4. 智能化网络管理

探索智能化网络管理系统是提升卫星网络在空间环境效应下性能的关键方向之一。该策略包括研究利用人工智能技术的先进监测系统，用以跟踪和预测太阳风暴等环境变化，从而采取主动预防措施以降低潜在中断风险。同时，开发智能诊断与恢复算法，实现快速故障检测与修复，从而将系统停机时间最小化。如果卫星网络集成了此类能力，将在动态和严峻的空间环境中获得更强的适应性与鲁棒性。

5.5. 星座参数配置优化

未来研究还可聚焦于深入理解空间环境效应如何影响星座性能，并利用此知识优化星座的设计参数。这包括识别环境因子（如空间碎片密度与辐射强度）与通信效率、覆盖性能之间的规律和关联。通过建模这些相互作用，研究者可设计多种星座配置方案，包括轨道间距、卫星分布与轨道高度选择等，从而在最大限度提高网络性能的同时降低受环境干扰的脆弱性。这些研究有助于构建更加鲁棒且高效的卫星星座，使其能在复杂空间条件下稳定运行。

5.6. 数据压缩与分布式处理

在未来卫星网络中，通过先进的数据压缩技术与分布式处理方式优化数据传输效率也是重要的研究方向。该策略包括探索新颖的数据压缩方法，以减少带宽占用，特别是在通信资源有限的情况下；同时，可将边缘计算能力集成至卫星平台中，实现数据的本地处理，而不再完全依赖地面站。这些方法有助于显著提升卫星通信系统的整体性能与可靠性，通过减少数据传输量与缓解网络拥塞，提高系统运行效率。

6. 结论

本研究分析了空间环境对大规模星座系统性能的不利影响。本研究观察到，在不同星座参数下，典型空间环境效应对系统节点和链路的影响存在显著差异，同时表现出明显的周期性和区域性时空特征。在此基础上，本研究进一步探讨了这些效应在不同轨道高度和轨道倾角下对SMC网络容量的影响，强调了在星座设计中应充分考虑这些特征，以有效减缓空间环境带来的负面影响。基于该理念，本研究提出了6个未来潜在的研究方向，以缓解空间环境效应对SMC网络性能的影响。这些方向包括：根据空间环境效应的特征进行星座参数设计，以预防潜在的失效；即使发生失效，也可以通过链路扰动调节网络拓扑，同时借助流量分流技术确保端到端的可靠传输。总体而言，本研究旨在将研究重点从物理层建模拓展到网络层建模，并推动从理想化无损场景向实际有损场景的过渡。这样的转变可为未来在复杂空间环境影响下的大规模星座网络设计提供更具现实意义的理论基础。

CRediT authorship contribution statement

Min Sheng: Writing-review & editing, Writing-original draft, Supervision, Conceptualization. **Di Zhou:** Writing-review & editing, Writing-original draft, Methodology, Conceptualization. **Sijing Ji:** Writing-review & editing, Writing-original draft, Methodology, Investigation. **Weigang Bai:** Writing-review & editing, Visualization, Software. **Yan Zhu:** Writing-review & editing, Investigation. **Junyu Liu:** Writing-review & editing, Data curation, Conceptualization. **Jiandong Li:** Writing-review & editing, Supervision.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

本研究得到国家自然科学基金（62495022、62495020、62422114、62461160329、62121001 和 62371360）以及中国科学技术协会青年人才托举工程（CAST；2022QNRC001）的资助。

References

[1] Ye N, Hou C, Ouyang Q, Kang B, Shin H, Mumtaz S. Techno-economic assessment of LEO mega-constellation with multi-satellite collaboration. IEEE Commun Mag 2024;62(11):36–42.

[2] Maiolini Capez G, Cáceres MA, Armellin R, Bridges CP, Fraire JA, Fr ey S, et al. On the use of mega constellation services in space: integrating LEO pla tforms into 6G non-terrestrial networks. IEEE J Sel Areas Commun 2024; 42(12):3490–504.

[3] Zhou D, Sheng M, Li J, Han Z. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges. IEEE Commun Surv Tutor 2023;25(2):975–1019.

[4] Chaudhry AU, Yanikomeroglu H. When to crossover from earth to space for lower latency data communications? IEEE Trans Aerosp Electron Syst 2022; 58(5):3962–78.

[5] Ahmmed T, Alidadi A, Zhang Z, Chaudhry AU, Yanikomeroglu H. The digital divide in Canada and the role of LEO satellites in bridging the gap. IEEE Commun Mag 2022;60(6):24–30.

[6] Abdelsadek MY, Chaudhry AU, Darwish T, Erdogan E, Karabulut-Kurt G, Madoery PG, et al. Future space networks: toward the next giant leap for humankind. IEEE Trans Commun 2023;71(2):949–1007.

[7] Mazur JE, Fennell JF, Roeder JL, O'Brien PT, Guild TB, Likar JJ. The timescale of surface-charging events. IEEE Trans Plasma Sci 2012;40(2):237–45.

[8] Bedingfield KL, Leach RD. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center; 1996.

[9] Koons HC, Mazur JE, Selesnick RS, Blake JB. The impact of the space environment on space systems. In: Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference; 1998 Nov 2–6; Hanscom AFB, MA, USA. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1999.

[10] Ji XY, Li YZ, Liu GQ, Wang J, Xiang SH, Yang XN, et al. A brief review of ground and flight failures of Chinese spacecraft. Prog Aerosp Sci 2019;107:19–29.

[11] Lu Y, Shao Q, Yue H, Yang F. A review of the space environment effects on spacecraft in different orbits. IEEE Access 2019;7:93473–88.

[12] Green JC, Likar J, Shprits Y. Impact of space weather on the satellite industry. Space Weather 2017;15(6):804–18.

[13] Rahim RBA, Sabri SF, Hasbullah NF. Radiation characteristics and SEU rates in NEqO environment using SPENVIS. In: Proceedings of the 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering; 2016 Jul 25–27; Kuala Lumpur, Malaysia. New York City: IEEE; 2016. p. 454–8.

[14] Braun V, Horstmann A, Lemmens S, Wiedemann C, Böttcher L. Recent developments in space debris environment modelling, verification and validation with MASTER. In: Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris; 2021 Apr 20–23; Darmstadt, Germany. Paris: ESA Space Debris Office; 2021. p. 18.

[15] United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere. US standard atmosphere, 1976. Report. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration; 1976.

[16] Jacchia LG. Static diffusion models of the upper atmosphere with empirical temperature profiles. SAO special report. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration; 1964.

[17] Chen Y, Larsen BA, Henderson MG. Calculating ionizing doses in geosynchronous orbit from *in-situ* particle measurements and models. In: Proceedings of the 2020 IEEE Aerospace Conference; 2020 Mar 7 – 14; Flagship Big Sky, MT, USA. New York City: IEEE; 2020. p. 1–8.

[18] Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. IEEE Proc 1982; 70(4):360–78.

[19] Basu S, Groves KM, Basu S, Sultan PJ. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans. J Atmos Sol Terr Phys 2002;64(16):1745–54.

[20] Stubbe P, Hagfors T. The Earth's ionosphere: a wall-less plasma laboratory. Surv Geophys 1997;18(1):57–127.

[21] Anderson PC, Rich FJ, Borisov S. Mapping the South Atlantic Anomaly continuously over 27 years. J Atmos Sol Terr Phys 2018;177:237–46.

[22] Wang J, Zhou C. Statistical modeling and analysis of satellite failure based on 2-Weibull segmented model. IEEE Access 2021;9:128747–54.

[23] Wang J, Yin H. Failure rate prediction model of substation equipment based on Weibull distribution and time series analysis. IEEE Access 2019;7:85298–309.

[24] Güreş SD, Ulusoy I, Durmaz B. Satellite failure estimation vs. reliability prediction analysis. In: Proceedings of the 2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium; 2019 Jan 18–21; Orlando, FL, USA. New York City: IEEE; 2019. p. 1–5.

[25] Zhou H, Yang Y, Huang HZ, Liu Y, Peng W. Reliability analysis of a satellite system considering common cause failures. In: Proceedings of the 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering; 2012 Jun 15–18; Chengdu, China. New York City: IEEE; 2012. p. 55–8.

[26] Wang X, Xie L, Zhou J. System reliability model considering common cause failures. J Mech Engo 2005;41(1):24–8. Chinese.

[27] Wang ZM, Ding LL, Yao ZB, Guo HX, Zhou H, Lv M. The reliability and availability analysis of SEU mitigation techniques in SRAM-based FPGAs. In: Proceedings of the 2009 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems; 2009 Sep 14–18; Brugge, Belgium. New York City: IEEE; 2009. p. 497–503.

[28] Binder D. Analytic SEU rate calculation compared to space data. IEEE Trans Nucl Sci 1988;35(6):1570–2.

[29] Morgan K, Caffrey M, Graham P, Johnson E, Pratt B, Wirthlin M. SEU-induced persistent error propagation in FPGAs. IEEE Trans Nucl Sci 2006;52(6):2438–45.

[30] European Space Agency (ESA). Space Environment Information System (SPENVIS) [Internet]. Paris: European Space Agency; 2025 Jun 26 [cited 2025 Jul 8]. Available from: http://www.spenvis.oma.be.

[31] Flegel S, Gelhaus J, Wiedemann C, Vorsmann P, Oswald M, Stabroth S, et al. The MASTER-2009 space debris environment model. In: Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris; 2009 Mar 30–Apr 2; Darmstadt, Germany. Paris: European Space Agency; 2009.

[32] Olivieri L, Francesconi A. Large constellations vulnerability assessment. Population 2017;3:4.

[33] Wei Y, Zhu R, Zhang Y, Zhang Q, Sun Z. Spatio-temporal routing based on sun outage prediction in deterministic satellite optical networks. In: Proceedings of the 2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings; 2023 Nov 4–7; Wuhan, China. New York City: IEEE; 2023. p. 1–3.

[34] Chaudhry AU, Yanikomeroglu H. Laser intersatellite links in a Starlink constellation: a classification and analysis. IEEE Veh Technol Mag 2021;16(2): 48–56.

[35] Chaudhry AU, Yanikomeroglu H. Free space optics for next-generation satellite networks. IEEE Consum Electron Mag 2021;10(6):21–31.

[36] Liu R, Sheng M, Lui KS, Wang X, Zhou D, Wang Y. Capacity o f two-layered satellite networks. Wirel Netw 2017;23(8):2651–69.