

基于高速互联的星载异构智能计算架构与方法

陶毅松¹, 张瑾¹, 崔欢喜², 裴玉奎^{2,3,4}

- (1. 清华大学电子工程系, 北京 100084;
2. 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;
3. 上海清申科技发展有限公司, 上海 201306;
4. 先进计算与智能工程国家级重点实验室, 江苏 无锡 214083)

摘要: 内生智能的6G星地直连通信的超高速、巨量接入等需求对天基云基础设施的计算、存储等能力提出了极高的要求。然而, 有限的星载资源与宇宙高辐射, 使得天基云的可靠性面临极大的挑战。为此, 首先分析星载受限环境下星载智能计算的可靠性问题; 然后提出一种基于高速互连的星载异构智能计算架构, 并基于该架构设计一种多模高可靠星载计算方法; 最后通过理论分析, 验证了所提出的计算架构和计算方案的可靠性。

关键词: 6G网络; 星载智能计算; 硬件架构; 高可靠

中图分类号: TP399

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2025006

Architecture and Method for On-Board Heterogeneous Intelligent Computing Based on High-Speed Interconnection

TAO Yisong¹, ZHANG Jin¹, CUI Huanxi², PEI Yukui^{2,3,4}

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Shanghai Tsingshen Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201306, China
4. Laboratory for Advanced Computing and Intelligence Engineering, Wuxi 214083, China

Abstract: The ultra-high speed and massive access requirements of native intelligence 6G have placed extremely high demands on the computing and storage capabilities of space-based cloud infrastructure. However, due to constrained onboard resources and high cosmic radiation, the reliability of space-based cloud systems faces significant challenges. To address this issues, this paper first analyzed the reliability of onboard intelligent computing within a resource-constrained onboard environment. Next, a high-speed, interconnected heterogeneous onboard intelligent computing architecture was proposed, and a multi-mode high-reliability onboard computing method was designed based on this architecture. Finally, the reliability of the proposed computing architecture and scheme was validated through theoretical analysis.

Keywords: 6G network, on-board intelligent computing, hardware architecture, high reliability

0 引言

随着6G移动通信的发展, 卫星网络作为空天地海一体化网络的重要组成部分受到了产业界和学术界的广泛

关注^[1]。卫星网络承载的业务呈现多元化趋势, 由传统的数据转发向数据在轨计算等新兴业务转变, 这对卫星网络的通信能力、计算能力、存储能力以及可靠性都提出了更高的要求^[2-3]。因此, 为满足不断增长的差异化高

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2025-02-15

通信作者: 裴玉奎, peiyk@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62341130); 先进计算与智能工程国家级重点实验室基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62341130), The Fund of Laboratory for Advanced Computing and Intelligence Engineering

可靠计算需求，需开展星载异构智能计算架构与计算方法的研究。

典型的6G星地网络如图1所示，其中天基网络包含高中低轨卫星星座，地基网络为传统的地面网络。用户设备可通过星地直连接入卫星网络，也可以通过地面网络经信关站与天基网络相连。星载智能计算系统位于天基节点上，根据卫星的处理能力承载不同的6G网元。通常，高中轨卫星承载核心网元，低轨卫星则主要部署接入网元，卫星之间通过星间链路连接，共同构建了天基网络基础设施。星载异构智能计算系统需要在星载环境下完成互连、计算、传输等任务，对卫星带宽、存储、算力都提出了较高要求。以在轨图像处理为例，图像像素为1亿，处理手段采用以深度学习为代表的人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术，处理时间在5s以内需要算力超过100 TOPS(每秒万亿次运算)。星载计算系统需要完成数据连接分发以及实时处理，在面向并行多任务处理的场景中，源端数据量降低2个数量级且同时处理32个任务的条件下，通过计算可以得出结论：在1s内完成处理需要不低于 $100 \times 5 \times 32 \div 100 = 160$ TOPS的算力^[8]。接下来将从星载计算系统可靠性和星载计算系统的计算架构两个方面综述星载计算系统的现状。

星载高辐照环境对星载计算系统可靠性提出了严峻

挑战，硬件错误检测、纠错机制和冗余策略增加功耗，单粒子效应限制了计算性能。现有方案包括抗辐射特化设计和商用组件结合抗辐射策略。抗辐射系统采用专用处理器(如RAD750、TSC695、AT697E)^[4]，通过提升抗辐射性能确保可靠性，但计算性能有限。商用现货(Commercial Off-The-Shelf, COTS)器件(如PowerPC750FX)结合容错策略^[5]，在可靠性和性能间平衡，代表系统如Maxwell SCS750A和SpaceCube。Maxwell SCS750A性能高达1800 MIPS，功耗低至25W；SpaceCube针对高密度计算需求，在低功耗、小型化和低成本前提下显著提升在轨算力^[6]。此外，EAFTC系统通过环境自适应容错技术优化COTS器件的容错性能和能效^[7]。综上，星载计算系统会在对空间高辐照等恶劣环境的抵抗性以及本身的计算性能之间进行折中，然而现有星载计算系统在架构及计算方案设计上难以满足逐渐增长的算力与可靠性需求，具体体现在：首先，抗辐射特化设计系统的计算性能与先进地面计算系统相比差距显著，频率和处理能力都较低，难以满足未来高算力应用(如：高分辨率遥感、实时数据处理等)需求；其次，直接采用COTS器件的系统虽然性能有所提升，但其可靠性仍需进一步提高，在复杂空间环境下的长期稳定性存在风险；最后，部分COTS器件功耗偏高，很难直接应用于功耗、

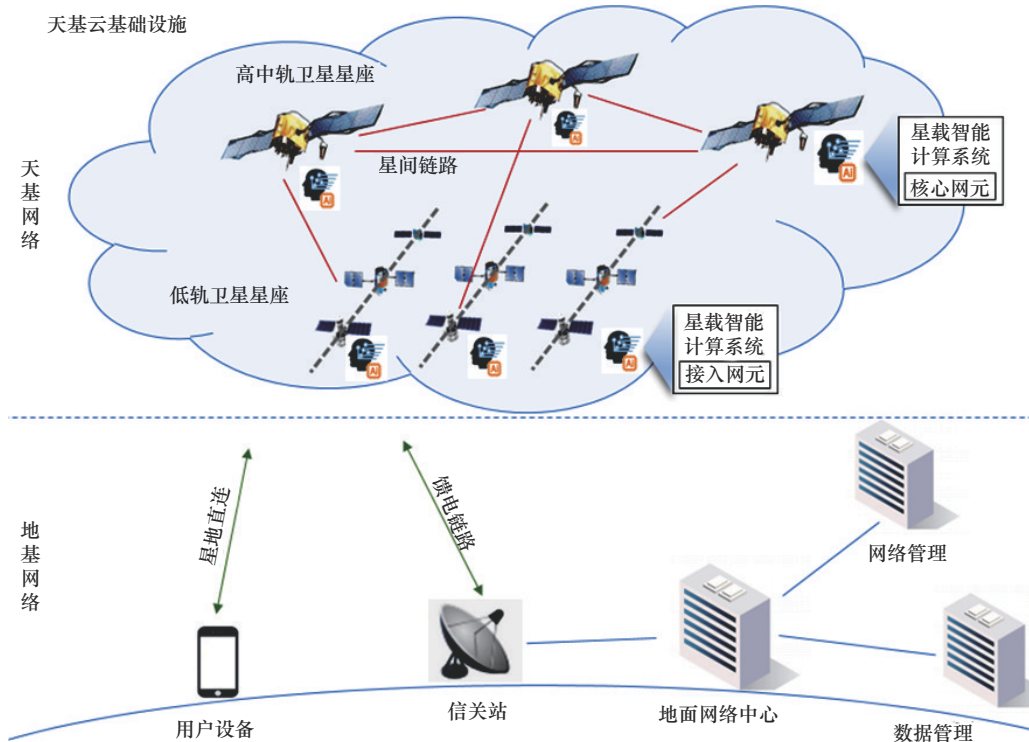


图1 典型6G星地网络

散热等高度受限的卫星环境。本文将从星载计算架构和星载计算可靠性问题处理方法两方面分别进行介绍。

当前星载计算系统的计算架构多仿照传统地面架构，采用集中式互连结构，最常见的是 FatTree 架构。然而，FatTree 架构在星载场景下数据交互通路有限，无法满足可靠性需求，且随着节点数的增加，交换机和连线复杂度升高，扩展性受限。因此，Dragonfly 架构通过直连模式缩短网络路径，具备低直径、高带宽和可扩展性^[9]，但扩容需重新布线，增加管理复杂度，不适合星载场景。Torus 架构以对称结构结合“组内散播-规约”和“组间全规约”方式，提升传输效率并降低通信时延^[10]，其特点是网络直径小、路径多、结构简单且可扩展性强，在大规模并行计算和数据密集型应用中表现优异，但尚未在卫星网络中应用。与地面计算不同，卫星节点因资源受限及恶劣环境，长期仅提供转发功能，其计算潜力未被充分挖掘。随着卫星网络与星载计算载荷的快速发展，卫星节点需应对海量服务请求，同时提供一定计算能力。星上分布式计算及任务卸载方案因此受到关注，其中计算架构与方法成为发挥星载算力的关键^[11]。

星载设备在高辐照环境下的可靠性挑战主要表现为 3 类在轨失效：在线可恢复失效（如单粒子翻转^[12]，可通过校验和纠错修复）、掉电可恢复失效（如门锁和多位翻转，可通过掉电恢复^[13]）以及永久失效（如总剂量效应和单粒子烧毁）。针对这些失效，系统级可靠性主要依赖纠错和多模冗余策略^[14]。纠错针对在线可恢复失效，采用存储器纠错编码、SRAM 型 FPGA 动态刷新等方法，屏蔽失效对系统运行的影响，延长系统失效时间。多模冗余同时支持 3 类失效处理，形式包括冷备、热备及冷热备混合，附加功能涉及任务分解、计算结果校验等。热备模式虽能保障连续性，但需高功耗和精确时间同步；冷备模式则存在启动延迟，而热备模式在具体实现上相较于冷备模式需付出大于同时开机单元数目倍数的功耗。

综上，现有方法存在可靠性不足的问题，具体体现在：抗辐射特化系统中严格的设计方案能够保证抗辐射性能，但会导致架构的灵活性和可扩展性低且计算性能有限，同时部分方案无法消除在节点失效等突发情况下发生的故障；传统的地面集中互连架构因其中心性而易受攻击，部分架构中缺乏并行化导致整体处理性能较低，计算性能较低导致无法满足业务需求^[15]；现有的包含多模冗余在内的失效处理方案尚未与星载计算架构进行结合，其在星载计算系统内的可靠性有待进一步分析。为了解决上述问题，本文提出了一种基于高速互连的星载

可靠智能计算架构，并基于该架构设计了一种多模星载可靠智能计算方法，主要贡献如下。

首先，本文分析了星载计算系统可靠性与星载计算架构内计算模组间通路的关系，建模了星载计算架构的节点与通路，通过对可行通路数量的优化提出了一种基于高速互连的星载智能计算架构，其中高速互连架构使得节点间通路数量倍增，提升了星载智能计算的可靠性。

然后，基于上述架构，本文针对星载设备在高辐照环境下的在轨失效问题，提出了一种多模高可靠星载计算方法。基于对异常情况的识别，将任务动态卸载到正常计算模组，结合异常节点恢复，提高了星载计算业务流程的可靠性。

最后，本文对所提星载计算架构的通路数量及星载计算方法的可靠性进行了分析及数值仿真。所提架构在机箱数量 $M = 2$ ，每个机箱包含 K 个交换与控制模组的条件下将组内计算模组间通路数量提升至原先的 $\frac{K^2 - K}{2}$ 倍；所提方法在节点数为 N 、独立失效概率为 p 的条件下，能将失效概率由 p 降低至 p^N 。

1 基于高速互连的星载可靠智能计算架构

本节主要针对星载计算的硬件架构进行分析设计，类比高速互连网络，设计了星载计算系统内模组互连结构，从而实现智能计算系统内不同模组之间的数据交换。本节首先给出模组互连结构设计，然后针对所提结构的性能提升进行分析。

设星载计算硬件架构模型为

$$\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_M\} \quad (1)$$

其中， \mathcal{B} 为机箱集合， M 为机箱总数。

每个机箱 B_m 包含 K 个交换与控制模组和 N 个计算模组，定义机箱 B_m 内的交换与控制模组集合和计算模组集合分别为 \mathcal{S}_m 和 \mathcal{C}_m

$$\mathcal{S}_m = \{S_{m,1}, S_{m,2}, \dots, S_{m,K}\} \quad (2)$$

$$\mathcal{C}_m = \{C_{m,1}, C_{m,2}, \dots, C_{m,N}\} \quad (3)$$

计算模组通过交换与控制模组进行信息交互，实现机箱内的算力扩展与冗余备份。同时，多个机箱间构建交换与控制模组的交叉互连数据通道，实现机箱间的算力扩展与冗余备份。定义计算模组 C_{m_s, k_s} 和 C_{m_t, k_t} 间通路集合为

$$\mathcal{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_I\} \quad (4)$$

其中， p_i 为第 i 条通路，定义为

$$p_i = \{C_{m_s, k_s}, C_{m_{s+1}, k_{s+1}}, \dots, C_{m_t, k_t} | C_{s, k_j} \in \mathcal{C}_m\} \quad (5)$$

p_i 通路长度定义为

$$l(p_i) = |p_i| \quad (6)$$

本文的目标在于最大化计算模组间可行的通路数目，从而最大化信息交换的可靠性与整体性能，上述问题可建模为具有约束条件的最优化问题

$$\max \sum I \quad (7)$$

$$\text{s.t. } l(p_i) \leq L \quad (8)$$

其中，式(7)表示最大化计算模组 C_{m_s, k_s} 和 C_{m_t, k_t} 之间的通路数，以增加计算模组间连接的可靠性；式(8)保证通路长度不会超过 L ，本文中取 $L = 4$ 。

具体考虑计算模组间的通路，若两个计算模组位于不同的机箱，此时通路构成分为两种情况：第一种情况包含 4 个节点，即两个计算模组各自所在机箱的交换与控制模组各一个，从而共有 K^2 条通路；第二种情况包含 5 个节点，即两个计算模组、所在机箱的两个交换与控制模组及任意一个其他机箱的交换与控制模组。若两个交换与控制模组位于相同的机箱，此时通路构成分为两种情况，第一种包含 3 个节点，即两个计算模组及所在机箱的一个交换与控制模组，通路数目为 K ；第二种包含 5 个节点，即两个计算模组、所在机箱的两个交换与控制模组及任意一个其他机箱的交换与控制模组，通路数目为 $K^2 \times (M - 1) \times (K - 1)$ 。从而同机箱内计算模组间共有 $K^2 \times (M - 1) \times (K - 1) + K$ 条通路。数据网络常用的 Fat-Tree 结构中，在交换节点数目同样为 $K \times M$ 个的条件下，计算模组间恰有 $K \times M$ 条通路。本文将以组内/组间交换与控制模组间的通路数量相对于 Fat-Tree 结构的提升倍数作为可靠性提升的衡量指标。令 T_{Int} 和 T_{Inr} 分别表述组间和组内的节点间通路提升倍数。因此，可以得到

$$T_{\text{Int}} = \frac{\text{组间模组间通路数量}}{\text{FatTree结构中模组间通路数量}} = \frac{K^2 + K^3 \times (M - 2)}{K \times M} = \frac{K + K^2 \times (M - 2)}{M} \quad (9)$$

$$T_{\text{Inr}} = \frac{\text{组内模组间通路数量}}{\text{FatTree结构中模组间通路数量}} = \frac{K^2 \times (M - 1) \times (K - 1) + K}{K \times M} = \frac{K \times (M - 1) \times (K - 1) + 1}{M} \quad (10)$$

本文所提出的互连结构将组内计算模组的通路数目提高至原先的 $\frac{K \times (M - 1) \times (K - 1) + 1}{M}$ 倍，将组间计算模组间的通路数目提高至原先的 $\frac{K + K^2 \times (M - 2)}{M}$ 倍，

从而能够有效提高载荷整体的可靠性。基于上述建模，图 2 给出了机箱数 $M = 2$ 的互连结构示意图，每个机箱包含 $K = 2$ 个交换与控制模组和 $N = 4$ 个计算模组。因此，由式 (10) 可以得知在该结构中同一机箱内计算模组之间存在 6 条通路，是地面数据中心网络中常用的 Fat-Tree^[16] 结构路径数量的 1.5 倍，不同机箱内计算模组之间保留了 4 条通路，保证了星载计算模组整体的可靠性。

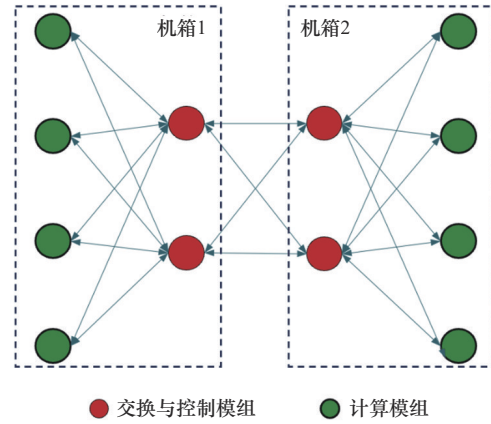


图 2 机箱数 $M = 2$ 的互连结构示意图

2 多模星载可靠智能计算方法

本文所提的星载计算架构中，计算模组间通路数量相较传统架构倍增，从而能更可靠地进行动态任务调配以互为冗余备份，星载计算系统整体呈现多模特性。基于此架构，本节将具体针对星载计算模组的在轨失效问题，依据计算模组的异常状态检测结果将星载计算处理流程分为正常及异常两种情况。结合所提架构多模特性对动态任务卸载的支持，提出一种多模星载可靠智能计算方法。接下来，本节从处理流程上详细介绍所提出的计算方法。

在 N 个计算模组执行任务时，首先对所有模组状态进行检测，记其中状态异常的模组数量为 P 。若不存在异常模组，即 $P = 0$ ，星载计算系统整体处于正常状态，正常执行任务卸载策略并完成计算任务即可，整体流程如图 3 左侧所示；若存在异常模组，即 $P > 0$ ，星载计算系统转入异常处理流程，如图 3 右侧所示。

正常情况下，首先执行任务卸载策略计算，随后将外部输入的计算任务（应用程序与数据）在所有正常工作的计算模组的范围内按照计算结果进行分配，然后由接收到计算任务的计算模组输出计算结果。在每次完成任务或者有新任务到来时，都依据对模组状态的检测结

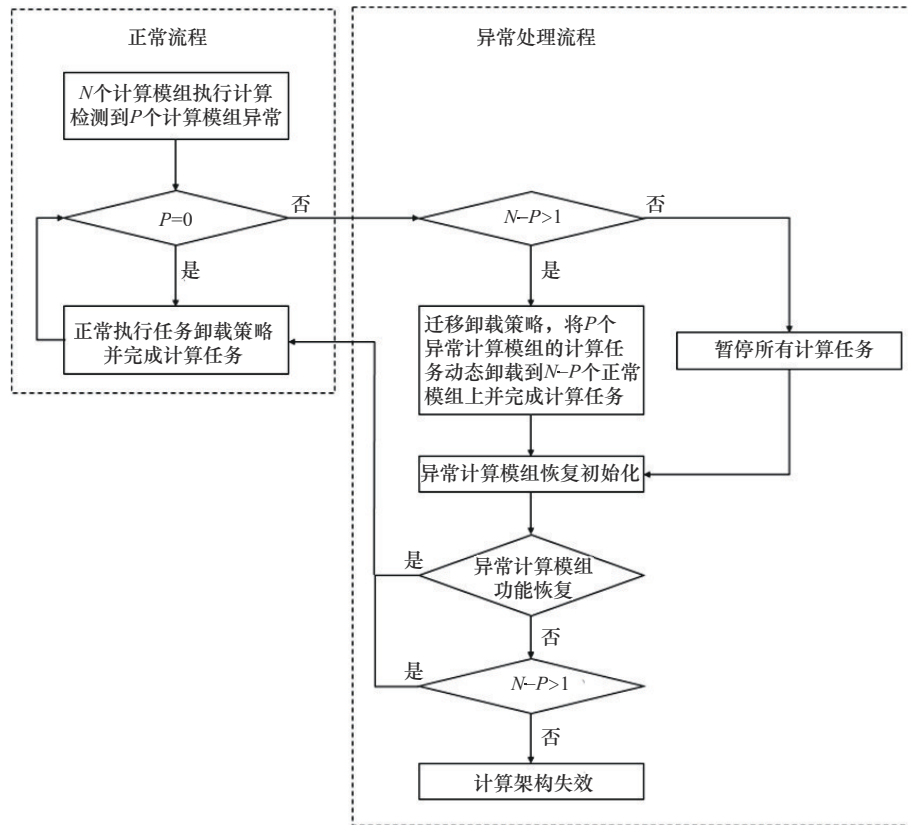


图 3 多模高可靠星载计算处理流程

果进行判断是否处于正常情况，从而保证了正常情况下的任务处理的可靠性。

异常情况则触发图 3 右侧所示流程，包括判断是否存在正常工作的计算模组、存在可用计算模组的任务处理及异常恢复流程、不存在可用计算模组时的异常恢复判断以及最终的架构失效判决。其中的核心步骤可归纳如下。

首先，判断是否保留了至少一个工作状态正常的计算模组，若所有模组均异常则直接暂停所有计算任务转入异常计算模组恢复流程；若保留正常计算模组则对现有计算任务进行调整，将 P 个异常计算模组的计算任务动态配置到 $N - P$ 个正常计算模组上并完成计算任务，随后进入异常恢复流程。

其次，尝试将失效的计算模组复位，在失效的计算模组恢复正常后，回到正常情况的处理流程；若功能未恢复正常，且系统此时保留至少 1 个工作状态正常的计算模组，则关闭失效计算模组，剩余的计算模组降级运行正常情况的处理流程。

最后，若所有计算模组都失效且无法恢复，计算架构才最终失效。

计算模组的多模特性能够有效支持上述方法中的动态任务卸载、节点恢复及处理流程降级等具体手段，从而能够最大程度地支持星载计算任务的正常处理，保证了星载计算的可靠性。

3 性能分析

本节主要针对提出的高速互连星载智能计算架构及多模可靠计算方法的具体性能表现进行分析。针对高速互连星载智能计算架构，本文对比了所提架构与传统 Fat-Tree 架构之间通路数量针对多模高可靠计算方案，本文分析了其出现节点失效导致架构失效的概率。本节进行如下假设，由于卫星受体积、重量、功耗等的严格限制，机箱数 M 和交换与控制模组数 K 均不宜过大，因此，性能分析中假设 $2 \leq M \leq 6$ ， $2 \leq K \leq 10$ 。本文分别分析了通路提升倍数与 M 、 K 的关系。

根据式(9)和式(10)可得，本文所提出的互连结构将组内计算模组的通路数目提高至原先的 $\frac{K^2 - K + 1}{2}$ 倍，将组间计算模组间的通路数目提高至原先的 $\frac{K}{2}$ 倍，如图 4 所示，组内计算模组间通路提升倍数随交换节点数的增

多呈平方增长趋势，组间计算模组间通路提升倍数随交换节点数呈线性增长，在 $K = 6$ 个时，分别提升至原先的 15 倍和 3 倍。由此，本架构相对 FatTree 架构能极大提升组内计算模组间的通路数量，从而可以高可靠地进行组内节点间的任务动态卸载；同时，单机箱交换节点数 $K \geq 2$ 个时，组间节点之间的通路数量提升倍数不低于 1，从而保证了组间节点的交互可靠性。

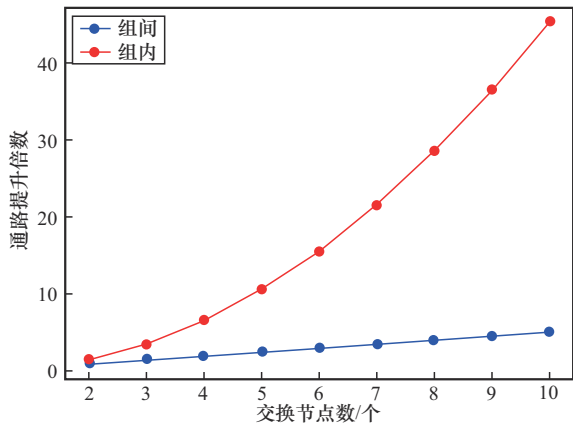


图 4 通路提升倍数和交换与控制模组数量的关系

此外，组内计算模组间的通路提升倍数与机箱数的关系如图 5 所示，通路提升倍数随机箱数的增加而增加，理论上最终趋近于 $K^2 - K$ 。类似可以给出组间计算模组间的通路提升倍数随机箱数的增加最终趋近于 K^2 。然而实际场景考虑布线问题，机箱数量有限，难以达到理论极限。

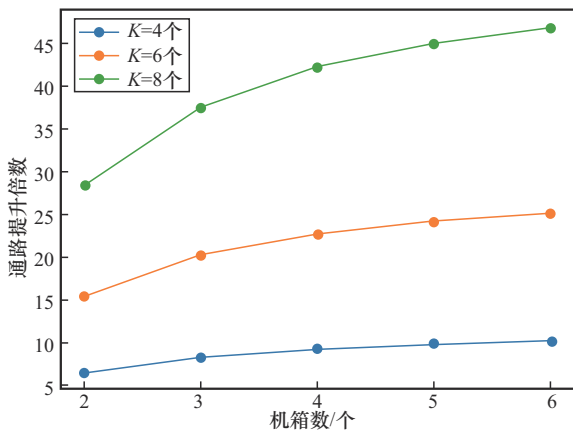


图 5 通路提升倍数与机箱数的关系

在本文提出的多模星载计算方法中，仅当所有计算模组均失效，且无法恢复时才会导致架构失效，这是由于控制节点可以选择 N 个计算模组中的正常节点来完成

任务。在此，可以进一步量化分析，假设单个节点的失效事件相互独立且概率为 p ，被分配任务的概率在普通系统中为 $\frac{1}{N}$ ，如果未采用多模计算方法，单次任务失败的可能性为选中的计算模组恰好失效，即 $\frac{p}{N}$ ，这种情况共有 N 类，总失效概率为 p ；采用多模高可靠计算方法时，需要全体节点均失效，即 p^N 。很显然，在 $N > 1$ 时，失效概率呈指数下降。

4 结束语

面对 6G 星地直连通信的超高速、极低时延、巨量接入等需求，部署于星上的内生智能的 6G 网元对天基云基础设施的计算、存储、交换等能力提出了极高的要求。与此同时，天基云的可靠性由于受限的星载资源与宇宙高辐射等恶劣环境面临极大的挑战。为此，本文首先分析了星载计算资源受限及高辐照环境下天基智能计算的可靠性问题，将可靠性问题关联到星载计算系统中计算模组间的连接通路数量。基于对星载计算系统中交换节点及计算模组的图结构建模及可行通路数量分析，本文提出了一种基于高速互连的星载异构智能计算架构；基于此架构中计算模组相互冗余备份机制，本文设计了一种多模高可靠星载计算方法，从而降低处理星载计算任务时节点失效带来的影响。最后，本文定量分析了所提计算架构的可靠性。

本文主要针对星载计算架构的可靠性问题进行探讨，而对功耗、散热等问题的分析相对较少；本文提出的方法在实际星载智能计算系统中的验证仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] GU S S, ZHANG Q Y, XIANG W. Coded storage-and-computation: a new paradigm to enhancing intelligent services in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 44-51.
- [2] DENG P K, ZHANG T X, SHI N X, et al. Computing satellite networks-the novel development of computing-empowered space-air-ground integrated networks[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 71-81.
- [3] BUITRAGO-LEIVA J N, EL KHAYATI RAMOUZ M, CAMPS A, et al. Statistical analysis of LEO and GEO satellite anomalies and space radiation[J]. Aerospace, 2024, 11(11): 924.
- [4] TANG L, MA Z, LI S, et al. The present situation and developing trends of space-based intelligent computing technology[J]. Micro-

- electronics&Computer, 2022, 39(4): 1-8.
- [5] BERGER R W. AD750 space wire-enabled flight computer for lunar reconnaissance orbiter[C]//Proceedings of 1st International Space Wire Conference. [S.l.: s.n.], 2007.
- [6] WU H C, LU J H, ZHANG L, et al. Research of on-orbit reconfigurable fault-tolerant technology for spacecraft avionics system [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 26(4): 22-31.
- [7] RAMOS J, BRENNER D W, GALICA G E, et al. Environmentally adaptive fault tolerant computing (EAFTC)[C]//Proceedings of the 2005 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2005: 1-10.
- [8] JOCHER G, QIU J, CHAURASIA A. Ultralytics YOLO (Version 8.0.0) [EB]. 2023.
- [9] KIM J, DALLY W J, SCOTT S, et al. Technology-driven, highly-scalable dragonfly topology[C]//Proceedings of the 2008 International Symposium on Computer Architecture. Piscataway: IEEE Press, 2008: 77-88.
- [10] LI H, MARESCA M. Polymorphic-torus network[J]. IEEE Transactions on Computers, 1989, 38(9): 1345-1351.
- [11] PANG B, GU S S, ZHANG Q Y, et al. CCOS: a coded computation offloading strategy for satellite-terrestrial integrated networks [C]//Proceedings of the 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 242-247.
- [12] DODD P E, MASSENGILL L W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 583-602.
- [13] 罗胜中, 袁俊刚. 卫星在轨主要故障模式、原因分析及措施建议 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38(4): 480-486.
- LUO S Z, YUAN J G. Analysis of main fault modes and their causes with supposed countermeasures for satellites in orbit[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(4): 480-486.
- [14] ALLERTON D J, JIA H M. Redundant multi-mode filter for a navigation system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 371-391.
- [15] PCHELINTSEV A N, SOLOVYOV A M, SEMENOV M E, et al. A design concept of an intelligent on-board computer network[J].

Computation, 2023, 11(3): 55.

- [16] FAWZI S, DIN N M. A Mininet emulation study for SDN fat tree data center sleep mode routing algorithms[J]. Edelweiss Applied Science and Technology, 2024, 8(6): 8956-8967.

[作者简介]



陶毅松 (1998-), 男, 清华大学电子工程系博士生, 主要研究方向为天基算力网络、编码分布式计算等。



张瑾 (2000-), 男, 清华大学电子工程系博士生, 主要研究方向为天基算力网络、任务调度与资源分配等。



崔欢喜 (1995-), 男, 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心助理研究员, 主要研究方向为空天地一体化网络架构、移动天线、算力网络架构、数字孪生、速率分割多址、优化理论、预编码、波束成形和约束元学习等。



裴玉奎 (1979-), 男, 上海清申科技发展有限公司副总经理、清华大学副研究员, 主要研究方向为空间信息网络等。