

基于信道建模的多层星地融合数据分配策略

宋宇杰¹, 曹越¹, 陈诺¹, 孙智立²

(1. 武汉大学国家网络安全学院, 湖北 武汉 430070; 2. 萨里大学通信系统研究所, 吉尔福德 GU2 7XH)

摘要: 为了解决空天地一体化网络中面临的星地链路切换效率低、数据分配不均、数据传输中断率高等问题, 针对多层卫星架构的星地融合数据传输场景, 提出了一种基于信道建模的多层星地融合数据分配策略。该策略考虑星地距离、自由空间路径损失、信道增益、剩余服务时间等因素, 基于香农信道容量理论, 构建信道模型感知的低地球轨道卫星服务能力量化模型, 从而生成数据分配策略。考虑数据传输中断风险, 依托数据交互历史信息, 通过可靠性确认机制动态调整数据分配策略, 以提升数据传输效率, 实现中断避免的星地链路无缝切换。仿真结果表明, 所提策略在投递率、平均投递时延与中断率方面均优于其他基准算法。

关键词: 空天地一体化网络; 数据分配策略; 信道建模; 无缝切换

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024127

Channel model-based multiple layers satellite-ground integrated data allocation strategy

SONG Yujie¹, CAO Yue¹, CHEN Nuo¹, SUN Zhili²

1. School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070, China

2. Institute of Communication Systems, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, U.K.

Abstract: To address the problem of inefficient satellite-ground link handover, unbalanced data allocation, and high probability of data transmission interruptions in space-air-ground integrated networks, a channel model-based multiple layers satellite-ground integrated data allocation strategy (CMDAS) was proposed for the satellite-ground integrated data transmission scenario with a multi-layer architecture. Considered various factors, e.g., the satellite-ground distance, free space path loss, channel gain, and remaining service time, a service capacity quantification model of low earth orbit satellites based on the Shannon's capacity theory was constructed, thus generating data allocation strategies. Considered the risk of data transmission interruptions with historical interaction information and dynamically adjusted data allocation strategies based on a reliability acknowledgement mechanism, the efficiency of data transmission was improved and satellite-ground link seamless handover with interruption avoidance was realized. The simulation results show that the performances of the proposed strategy outperform other baseline algorithms in terms of delivery ratio, average delivery latency, and interruption ratio.

Keywords: space-air-ground integrated network, data allocation strategy, channel model, seamless handover

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-04-03

通信作者: 曹越, yue.cao@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2022YFE0139300); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (No.2022B1515120067)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFE0139300), Guangdong Provincial Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2022B1515120067)

0 引言

随着无线通信技术的创新驱动与多样化通信应用场景需求的增加,卫星网络、异构网络融合、5G增强覆盖等受到广泛关注^[1-2]。为此,空天地一体化网络(SAGIN, space-air-ground integrated network)已成为研究未来先进网络的重要方向,为实现全方位、全天候无缝信息通信提供高效的解决方案^[3]。其中,低地球轨道(LEO, low earth orbit)卫星具备通信时延低、信道质量高等优势,可为地面用户提供高效的实时服务;中地球轨道(MEO, medium earth orbit)卫星通信范围覆盖面积广、支持管理网络拓扑,可为星间协同提供数据支撑^[4-5]。

广域通信覆盖、容灾与应急救援等应用需求随着SAGIN的发展应运而生^[6-7],上述新型应用需求依赖于星地链路无缝切换、信道质量评估、动态拓扑管理等技术^[8]。尽管现有地面异构网络的技术趋于成熟,但由于网络结构复杂、数据规模海量与设备计算能力受限,其无法满足超大规模、超远距离、时延敏感型应用的数据需求。得益于LEO卫星的应用,地面用户生成的数据可通过LEO卫星协同转发,以提升数据传输效率。然而,由于LEO卫星的高速移动性,星地通信面临星地拓扑结构频变、星地链路切换效率低与数据传输中断等问题。因此,如何保证星地通信的可靠、高效协同数据传输,已成为攻克上述问题的重要挑战。

当前,现有研究主要聚焦星地链路无缝切换与通信信道建模,以提升星地通信的可靠性。其中,星地链路无缝切换相关研究大多基于集中式评估方法、图论、优化目标构建,通过改变通信链路方式,以降低数据传输中断的概率^[9-11];通信信道建模相关研究主要通过感知信道状态、评估信道质量,以筛选优质信道,提升数据传输效率^[12-15]。

然而,现有星地链路无缝切换技术受限于星载低计算能力、链路无预测切换,且难以建立并动态维护全局状态信息,导致维护成本高、切换准确率低与切换效率低。同时,现有通信信道建模技术仅考虑物理层模型构建,并未考虑网络层数据信息,缺乏建立数据分配策略与通信信道模型的关系。因此,如何构建跨层通信信道建模与数据分配策略映射关系,动态调整数据分配策略,实现星地链路无缝切换,是SAGIN研究领域亟待解决的关键问题。

基于此,针对如何保证星地通信的可靠、高效协同数据传输问题,本文提出了基于信道建模的多层星地融合数据分配策略(CMDAS, channel model-based multiple layers satellite-ground integrated data allocation strategy),以实现星地链路无缝切换,降低数据传输中断率与投递时延,提升数据投递率。本文的主要贡献如下。

1) 针对SAGIN场景,考虑构建物理层信道模型与网络层数据分配策略,探索了信道状态与数据分配的映射关系,从动态数据分配角度方面提升数据传输效率。

2) 设计了星载数据分配策略的可靠性确认机制,根据网络拓扑与历史中断信息,动态调整数据分配策略,降低数据传输中断概率,避免资源浪费。

3) 与基准算法相比,验证了CMDAS在投递率、平均投递时延与中断率方面的有效性。其中,投递率达到99.86%,平均投递时延优化了至少35.49%,中断率降低至0.02%。

1 相关工作

星地链路切换与信道建模是推动SAGIN发展的重要研究领域,构建灵活的星地链路切换技术能够为用户提供更加稳定的数据传输服务,降低数据传输中断风险,避免通信资源浪费;构建可靠的信道模型能够优化星地链路的数据传输效率。

1.1 星地链路切换

传统的星地链路切换方案通过构建地面站与卫星的网络拓扑结构,利用图论经典算法求解最优解,实现地面站与卫星的链路切换,提升数据传输可靠性。Wu等^[9]根据卫星的移动性,构建星地切换图,考虑仰角、可用信道数量等因素,设置链路权重,计算最短路径,形成切换策略。Feng等^[10]提出了一种基于加权二部图的星地链路切换策略,通过改进库恩-蒙克雷斯(Kuhn-Munkres)算法,优化最大权值匹配方法,依托多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)技术,实现星地链路切换。Zhou等^[16]提出了一种基于拥塞感知的分布式切换策略,考虑链路属性、通道数量与切换因子等,优化吞吐量、传播时延与切换频率。朱洪清等^[17]提出了一种基于用户群组的低轨卫星网络多星切换策略,考虑用户切换成功率、卫星吞

吐率与负载均衡，构建多目标优化方程。Zhang 等^[18]提出了一种基于启发式算法的访问切换策略，通过考虑经验质量、吞吐量与网络负载，构建链路切换策略。

然而，基于图论的方法通常需要花费大量时间预处理数据并需要周期性的拓扑结构维护，其他方法主要通过不断迭代以最小化真实数据与优化目标函数间的差值，尽管如此，现有方法仍无法满足 SAGIN 中高效动态切换与低计算开销的需求。

1.2 星地信道建模

传统的星地信道建模方法从物理层角度分析地面站与卫星之间信道的数据传输速率，考虑信号衰落、干扰、移动性等因素，构建信道质量优化方程进行信道建模^[19-23]。胡家荣等^[19]考虑自由空间路径损耗与降雨衰减等因素，基于 S-V (Saleh-Valenzuela) 信道模型，构建星地链路信道模型。戴翠琴^[20]考虑阴影赖斯衰落、多径效应、大气传播损耗等因素，构建基于两状态星地信道模型的新型空间信息联合优化传输方案。Kanellopoulos 等^[21]研究了基于 Maseng-Bakken 模型的降雨衰减时间序列对信道模型的影响，构建了降雨衰减适配的信道感知模型。Li 等^[22]考虑多普勒频移效应与时延补偿等因素，构建频分多址与信道特征适配的宽频数据传输模型。Ivanov 等^[23]基于异构多波束整形架构，考虑多普勒频移与信道稳定时间，构建切换最小化与单波束范围内的用户通信时间优化方程。

然而，上述研究仅注重针对物理层通信信道模型的构建，忽略了无缝切换与数据分配策略间的潜在相关性；其次，上述研究仅基于当前时刻的信道状态感知构建信道模型，未考虑基于历史的交互信息预测数据传输中断风险。此外，现有研究忽略了合理的动态数据分配策略，难以有效避免数据传输中断，无法提供可靠的星地链路无缝切换服务。

1.3 研究动机

星地链路切换相关研究缺乏高效的切换策略，难以满足高实时性应用需求；星地信道建模相关研究并未充分利用历史交互记录优化信道模型，造成通信资源浪费。因此，考虑融合物理层信道评估技术与网络层数据分配技术，依托多层星地架构^[24]，构建基于信道建模的跨层可靠动态数据分配策略，提升星地链路切换效率与可靠性。

2 系统模型

2.1 系统架构

针对由地面站、LEO 卫星、MEO 卫星所构成的多层级星地融合无线网络，构建基于信道建模的多层级星地融合数据分配策略的场景构架，如图 1 所示。首先，地面站随机生成海量数据，通过动态感知星地信道状态，评估 LEO 卫星服务能力，生成数据预分配策略。其次，LEO 卫星根据 MEO 卫星提供的拓扑结构信息，对地面站生成的数据分配策略进行可靠性检查，并生成可靠数据分配策略。最后，根据可靠数据分配策略，地面站将海量数据传输至 LEO 卫星，以实现星地数据传输的无缝切换。

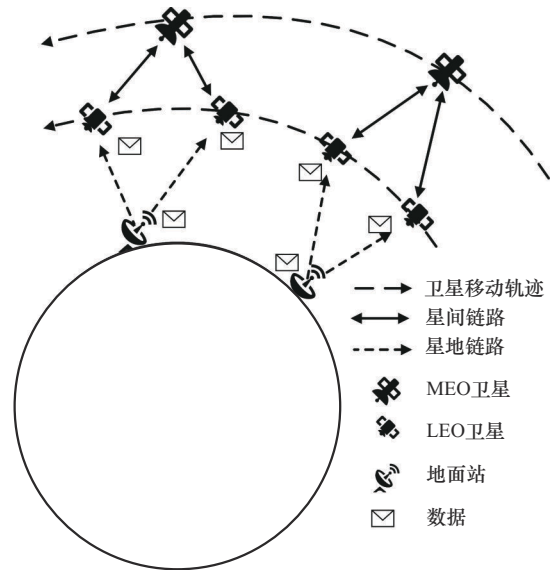


图 1 基于信道建模的多层级星地融合数据分配策略的场景构架

假设 n_{gs} 个地面站随机分布于地球表面，表示为 $GS = \{g_1, g_2, \dots, g_{n_{gs}}\}$ 。 n_{LEO} 颗 LEO 卫星与 n_{MEO} 颗 MEO 卫星组成卫星网络，并支持聚合、处理、投递等数据服务，2 个集合分别表示为 $S_{LEO} = \{s_1^{LEO}, \dots, s_{n_{LEO}}^{LEO}\}$ 与 $S_{MEO} = \{s_1^{MEO}, \dots, s_{n_{MEO}}^{MEO}\}$ 。 LEO 卫星可以运行在不同高程的轨道上，例如，500~2 000 km^[1]；MEO 卫星在高程为 10 355 km 的圆形轨道上运行^[25]。 LEO 卫星支持 MIMO 技术，并提供 60 个可控射束，通过 Ka/Ku 频段与地面站建立连接^[15]；同样，MEO 卫星通过 MIMO 技术与多颗 LEO 卫星建立连接。为了避免传输干扰，每个可控射束支持一条星地通信信道。在此基础上，星地通信信道受信

道增益、自由空间路径损失、降雨衰减、信道带宽与星地距离等因素的影响。系统参数如表1所示。

表1 系统参数	
符号	含义
B	信道带宽
H	卫星高程
σ	可控射束的最大数量
C	香农信道容量
$d_{s,g}$	LEO卫星与地面站之间的距离
$G_{s,g}$	LEO卫星与地面站之间的信道增益
$l(d_{s,g})$	LEO卫星与地面站之间的自由空间路径损失
$C_{s,g}^e$	LEO卫星与地面站之间的信道容量
$T_{s,g}^{re}$	LEO卫星对地面站的剩余服务时间
$TC_{s,g}$	LEO卫星对地面站的服务能力

2.2 通信信道模型

针对星地融合网络场景需求,综合考虑多维信道评估参数,包括香农信道容量、星地距离、自由空间路径损失、信道增益等。信道增益与星地距离示例如图2所示。参考Jung等^[12]研究的空地距离模型,星地距离表示LEO卫星与地面站之间的直线距离,计算式为

$$d_{s,g} = \sqrt{R^2 + (R + H)^2 - 2R(R + H)\cos\psi} \quad (1)$$

其中, R 表示地球半径,其数值为6 378 km; H 表示LEO卫星的高程; ψ 表示LEO卫星、地心与地面站形成的夹角,如图2中 $\angle SoG$ 所示。

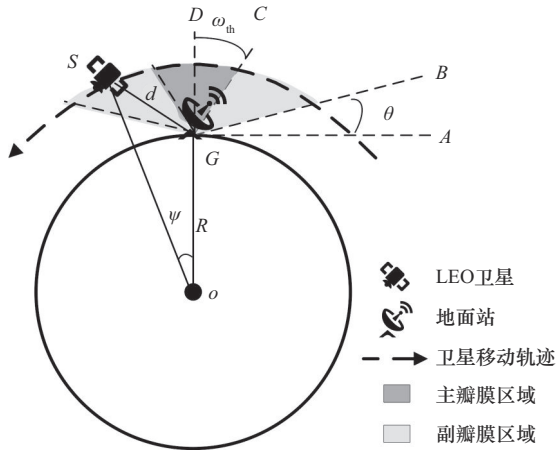


图2 信道增益与星地距离示例

地面站按照扇形区域划分为主副瓣膜区域,其信道增益为^[12]

$$G_{s,g} = \begin{cases} G_{s,g}^{ml}, & |\omega_{s,g}| \leq \omega_{th} \\ G_{s,g}^{sl}, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, ω_{th} 表示主瓣膜区域的分界阈值; $\omega_{s,g}$ 表示LEO卫星与地面站形成的天顶角,即图2中 $\angle SGD$; $G_{s,g}^{ml}$ 表示主瓣膜区域的信道增益; $G_{s,g}^{sl}$ 表示副瓣膜区域的信道增益。

由于LEO卫星与地面站距离较远,信号在LEO卫星与地面站之间的信道传输存在损失(自由空间路径损失),计算式为

$$l(d_{s,g}) = \left(\frac{c}{4\pi f_c} \right)^2 d_{s,g}^{-\alpha} \quad (3)$$

其中, c 表示光速; f_c 表示载波频率; α 表示路径损失指数; $d_{s,g}$ 表示LEO卫星至地面站的距离。

基于香农信道容量公式,LEO卫星与地面站之间通信信道的最大传输速率为

$$C = B \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4)$$

其中, B 表示信道带宽,单位为Hz; $\frac{S}{N}$ 表示接收端的信噪比。参考Jung等^[12]研究的信噪比模型,则信噪比表示为

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s G_{rain} G_{s,g} G_g l(d_{s,g})}{N_0 B} \quad (5)$$

其中, G_{rain} 、 $G_{s,g}$ 与 G_g 分别表示降雨衰减、信道增益与地面站天线增益; N_0 为噪声功率谱密度^[13]。

在此基础上,结合式(4)和式(5),LEO卫星与地面站之间的信道容量为

$$C_{s,g}^e = B \ln \left(1 + \frac{P_s G_{rain} G_{s,g} G_g l(d_{s,g})}{N_0 B} \right) \quad (6)$$

2.3 数据分配策略

基于星地融合网络场景下的信道容量,地面站考虑LEO卫星的剩余服务时间,评估其服务能力,生成合理的数据分配策略,以免发生数据传输中断。LEO卫星的剩余服务时间 $T_{s,g}^{re}$ 表示该卫星能够为某地面站提供的最长服务时间,即

$$T_{s,g}^{re} = T_{s,g}^{DDL} - \sum_{i=1}^l \frac{S_{m_i}}{v_{s,g}} \quad (7)$$

其中, S_{m_i} 表示第 i 个数据的大小(单位为MB); $v_{s,g}$ 表示信道传输速度; $T_{s,g}^{DDL}$ 表示LEO卫星为地面站服务的预估最终时间,即通信链路的最长服务时间,其计算式为

$$T_{s,g}^{DDL} = 2 \frac{r}{v_s} \frac{|\text{Vec}_s \cdot \text{Vec}_{s,g}|}{|\text{Vec}_s| \cdot |\text{Vec}_{s,g}|} \quad (8)$$

其中, r 表示地面站的最大通信范围; v_s 表示 LEO 卫星的移动速度; Vec_s 表示 LEO 卫星移动方向上的单位向量, 即卫星移动方向向量; $\text{Vec}_{s,g}$ 表示 LEO 卫星与地面站形成的向量, 即星地方向向量。LEO 卫星服务时间计算示例如图 3 所示, 其中, 圆圈表示地面站的通信边界。

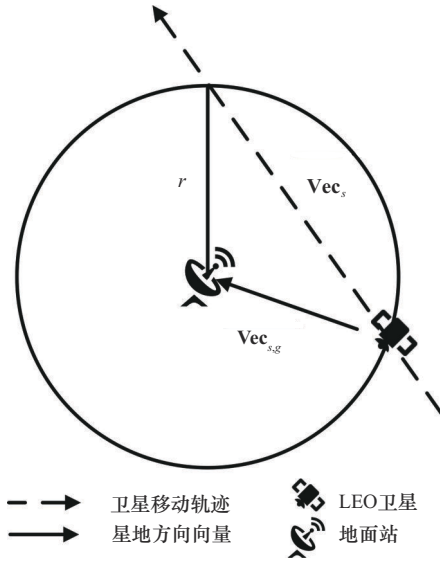


图3 LEO卫星服务时间计算示例

根据服务时间与信道容量大小, LEO 卫星的服务能力 $\text{TC}_{s,g}$ 描述为 LEO 卫星能够接收地面站传输的数据总量, 计算式为

$$\text{TC}_{s,g} = T_{s,g}^{\text{re}} C_{s,g}^{\text{c}} \quad (9)$$

其中, $T_{s,g}^{\text{re}}$ 表示剩余服务时间; $C_{s,g}^{\text{c}}$ 表示信道容量。

基于此, 根据 LEO 卫星的服务能力, 计算其数据分配比例, 计算式为

$$p(s_j) = \frac{\text{TC}_{s_j,g}}{\sum_{i=1}^k \text{TC}_{s_i,g}} \quad (10)$$

其中, k 表示与地面站建立链接的 LEO 卫星数量; $\text{TC}_{s_j,g}$ 表示第 j 颗 LEO 卫星的服务能力。

此外, 地面站记录上一次计算的数据分配策略 (假设当前生成的数据分配策略为 $p^i(X)$, 上一次的策略为 $p^{i-1}(X)$), 形成与 LEO 卫星交互的记录。该记录将用于识别需要进行可靠性检查的 LEO 卫星。因此, 每个地面站构建一个中断集合 $\text{IS} = \{\text{IS}_j | j = 1, 2, \dots\}$, 以存储可能会发生数据传输中断的 LEO 卫星, 并通知 IS 中的其他卫星。这里, LEO 卫星 s_j 是否可能出现中断的识别规则为

$$\text{IS}_{s_j} = \begin{cases} 1, & p(s_j) \in [\overline{p(X)} \pm \tau] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\overline{p(X)}$ 表示上一轮已经发生数据传输中断的数据比例, 即某 LEO 卫星在上一轮发生数据传输中断, 由地面站计算的该卫星的数据分配比例 (式(10)); τ 表示数据分配比例相似因子, 其值设置为 0.1%。当本轮地面站为 LEO 卫星 s_j 生成的数据分配比例满足 $p(s_j) \in [\overline{p(X)} - \tau, \overline{p(X)} + \tau]$ 时, 则 s_j 可能发生数据传输中断, 需检查策略的可靠性。

在此基础上, 还存在 2 种需要检查数据分配策略可靠性的情况: ①当地面站仅与一颗 LEO 卫星建立链接时, 按照上述分配策略, 地面站将所有的数据传输至该 LEO 卫星, 这增加了数据传输中断风险; ②当 LEO 卫星与 MEO 卫星并未建立链接时, LEO 卫星无法获取网络拓扑信息。因此, 需检查数据分配策略的可靠性, 检查规则为

$$\text{DV}_{s,g}^{\text{sec}} = \begin{cases} T_{s,g}^{\text{re}} v_{s,g}, & \text{DV}_{\text{all}} p(s_j) > T_{s,g}^{\text{re}} v_{s,g} \\ \text{DV}_{\text{all}} p(s_j), & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\text{DV}_{s,g}^{\text{sec}}$ 表示 LEO 卫星确认的可靠数据大小; $v_{s,g}$ 表示信道传输速度; DV_{all} 表示地面站分配的总数据大小; $p(s_j)$ 表示数据分配比例。

此外, 为提升数据传输的效率, 并减少数据分配算法的调用次数, 基于 MEO 卫星提供的拓扑数据与地面站期望分配数据策略, LEO 卫星协同计算、确认、重新分配超出 LEO 卫星负载的数据大小 (非可靠数据大小 $\text{DV}_{\text{unsafe}}$, 即数据传输中断发生后还未传输的数据大小), 其计算式为

$$\text{DV}_{\text{unsafe}} = \sum_{j=1}^k |T_{s_j,g}^{\text{re}} v_{s_j,g} - \text{DV}_{\text{all}} p(s_j)| \quad (13)$$

其中, k 表示不满足可靠性检查且与地面站建立链接的 LEO 卫星的数量; $T_{s_j,g}^{\text{re}}$ 表示 LEO 卫星 s_j 的剩余服务时间; $v_{s_j,g}$ 表示 s_j 的信道传输速度; $\text{DV}_{\text{all}} p(s_j)$ 表示地面站分配给 s_j 的数据大小。

令剩余可分配总数据大小为 $\text{DV}_{\text{remain}}$, 其计算式为

$$\text{DV}_{\text{remain}} = \sum_{j=1}^l \text{DV}_{s_j}^{\text{remain}} = \sum_{j=1}^l (T_{s_j,g}^{\text{re}} v_{s_j,g} - \text{DV}_{s_j,g}^{\text{sec}}) \quad (14)$$

其中, l 表示通过可靠性检查且与地面站建立链接的 LEO 卫星数量; $\text{DV}_{s_j}^{\text{remain}}$ 表示 LEO 卫星 s_j 剩余可

接收的数据大小; $T_{s,g}^{rc} v_{s,g}$ 表示 s_j 可接收的总数据大小; $DV_{s_j,g}^{sec}$ 表示针对 s_j 的可靠性检查计算的可靠数据大小。这里, 令 LEO 卫星 s_j 重分配的数据大小为 $DV_{s_j,g}^{allocated}$, 其计算式为

$$DV_{s_j,g}^{allocated} = \frac{DV_{s_j,g}^{remain}}{DV_{remain}} DV_{unsafe} \quad (15)$$

根据 LEO 卫星反馈的可靠数据大小, 地面站调整数据分配策略, 调整后的分配概率为

$$p^*(s_j) = \begin{cases} \frac{DV_{s_j,g}^{sec}}{DV_{all}}, & p(s_j) \text{非可靠} \\ p(s_j) + \frac{DV_{s_j,g}^{allocated}}{DV_{all}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

基于此, 生成 LEO 卫星确认的可靠数据分配策略 $P^*(X) = \{p^*(s_j) | j = 1, 2, \dots\}$ 。

3 算法设计

为实现 CMDAS, 本文设计了对应的算法。图 4 描述了 CMDAS 算法技术路线和流程。首先, 地面站根据 LEO 卫星的状态数据计算其服务时间 (算法 1); 其次, 构建信道模型, 计算卫星服务能力, 生成期望数据分配策略与中断集合 (算法 2); 再次, LEO 卫星检查并更新数据分配策略, 确保其可靠性 (算法 3); 随后, 基于输出队列可用容量, 分配数据至数据输出队列, 提升数据传输效率 (算法 4); 最后, 实时维护拓扑结构 (算法 5)。其中, 算法 1 和算法 5 为算法 2 和算法 3 提供了数据支撑; 算法 2 探索了信道状态与数据分配

的映射关系 (对应贡献 1); 算法 3 设计了星载数据分配策略的可靠性确认机制 (对应贡献 2); 根据算法 4 数据传输结果, 地面站更新中断发生时对应的数据分配策略。

3.1 LEO 卫星实时监控

地面站实时感知其视距范围内的 LEO 卫星, 负责 LEO 卫星状态数据更新、星地链路建立与断开、LEO 卫星的最长服务时间计算等。算法 1 为地面站生成的数据分配策略提供重要数据支撑。首先, 地面站扫描视距内的 LEO 卫星, 形成卫星集合 S_{LEO} , 并动态维护该集合。其次, 地面站动态感知 S_{LEO} 中 LEO 卫星的状态, 包括其位置、高程、方向、移动速度等信息。再次, 根据卫星移动方向, 地面站计算卫星移动方向向量 Vec_s ; 根据地面站与该 LEO 卫星之间的位置, 计算星地方向向量 $Vec_{s,g}$ 。最后, 根据式(8), 地面站计算该 LEO 卫星的最长服务时间 $T_{s,g}^{DDL}$ 。

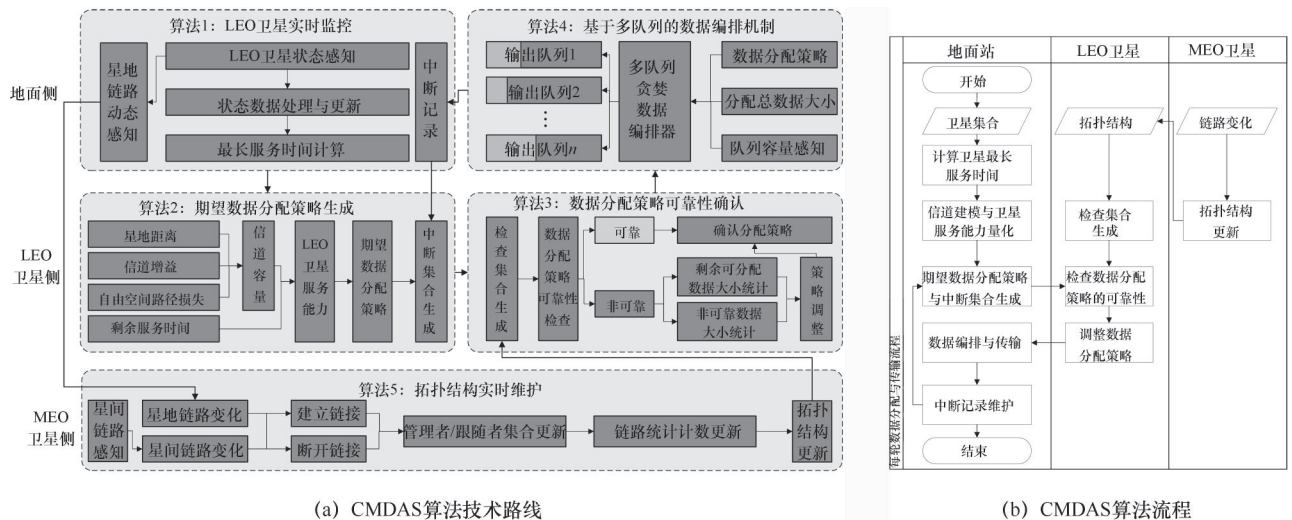
算法 1 LEO 卫星实时监控

输入 视距内的卫星集合 S_{LEO}

- 1) 地面站感知 S_{LEO} 中 LEO 卫星的状态, 包括位置、高程、方向、移动速度
- 2) 根据卫星的移动方向, 计算卫星移动方向向量 Vec_s
- 3) 根据地面站与 LEO 卫星之间的位置信息, 计算星地方向向量 $Vec_{s,g}$
- 4) 根据式(8), 计算并更新 LEO 卫星的最长服务时间 $T_{s,g}^{DDL}$

3.2 可靠数据分配策略生成算法

为了尽可能避免星地传输过程中出现数据传



(a) CMDAS 算法技术路线

(b) CMDAS 算法流程

图 4 CMDAS 算法技术路线和流程

传输中断现象,地面站构建可靠的数据分配策略。该策略由2个阶段组成,即期望数据分配策略生成阶段与数据分配策略可靠性确认阶段。在期望数据分配策略生成阶段,由于信道容量(空间维度)决定了数据传输效率,LEO卫星的剩余服务时间(时间维度)决定了卫星可接收数据总大小。因此,这2项指标可用于综合评估LEO卫星的服务能力,并按比例生成期望数据分配策略。根据中断识别规则,生成中断集合(如算法2所示)。在数据分配策略可靠性确认阶段,LEO卫星对期望数据分配策略进行可靠性检查,将确认的可靠数据大小反馈至地面站。与此同时,LEO卫星统计超出卫星最大负载的数据大小,并联合与该地面站建立链接的其他LEO卫星,重新分配非可靠数据大小(超出LEO卫星负载的数据大小),以提升数据传输效率(如算法3所示)。

算法2描述了基于时空维度的期望数据分配策略生成。首先,地面站感知其视距范围内的LEO卫星。其次,根据式(1)~式(3)、式(6)和式(7),地面站分别计算星地距离 $d_{s,g}$ 、信道增益 $G_{s,g}$ 、自由空间路径损失 $l(d_{s,g})$ 、信道容量 $C_{s,g}^c$ 、剩余服务时间 $T_{s,g}^{rc}$ 。再次,根据式(10),地面站按比例生成期望数据分配策略 $P(X) = \{p(s_j) | j = 1, 2, \dots\}$ 。最后,根据式(11)生成中断集合 $IS = \{IS_s | j = 1, 2, \dots\}$ 。

算法3描述了多星协同的数据分配策略可靠性确认。首先,LEO卫星根据网络拓扑结构(由算法5获得)构建检查集合CA。其次,根据式(12),检查CA中地面站的数据分配策略是否可靠,如果数据分配策略可靠,则通知对应地面站,确认其数据分配策略;反之,计算超出LEO卫星负载的数据大小,并获取与该地面站建立链接的LEO卫星集合NS。再次,遍历NS,通知对应LEO卫星检查该地面站生成的数据分配策略,并根据式(13)与式(14)统计检查结果。最后,根据式(15),重新分配LEO卫星的可靠数据大小,并根据式(16)生成调整后的数据分配策略 $P^*(X)$ 。

算法2 期望数据分配策略生成

输入 视距内的卫星集合 S_{LEO}

输出 期望数据分配策略 $P(X)$, 中断集合IS

- 1) 根据式(1), 计算 S_{LEO} 中LEO卫星与地面站的距离 $d_{s,g}$
- 2) 基于LEO卫星与地面站的位置信息, 根据

式(2), 获得信道增益 $G_{s,g}$

3) 根据式(1)与式(3), 计算星地之间的自由空间链路损失 $l(d_{s,g})$

4) 获得LEO卫星的剩余服务时间 $T_{s,g}^{rc}$

5) 根据式(6), 计算信道容量 $C_{s,g}^c$

6) 根据式(9), 计算卫星的服务能力 $TC_{s,g}$

7) 根据式(10), 生成期望数据分配策略 $P(X) = \{p(s_j) | j = 1, 2, \dots\}$

8) 遍历 $P(X)$, 如果 $p(s_j) \in [\overline{p(X)} - \tau, \overline{p(X)} + \tau]$, 则将LEO卫星 s_j 添加至中断集合IS

9) 输出 $P(X)$ 与中断集合IS

算法3 数据分配策略可靠性确认

输入 期望数据分配策略 $P(X)$, 中断集合IS, 地面站 g , 拓扑结构 G

输出 可靠数据分配策略 $P^*(X)$

1) 将满足下列情况的地面站 g 生成的数据分配策略添加至检查集合CA: 在 G 中, 地面站 g 与LEO卫星的链路数量为1; LEO卫星与MEO卫星并未建立链接

2) 循环遍历CA, 根据式(12), 检查数据分配策略的可靠性

3) 如果数据分配策略可靠, 则通知地面站, 确认其数据分配策略; 否则, 该LEO卫星计算其超出负载的数据大小, 并获得与地面站 g 建立链接的LEO卫星集合NS

4) 遍历NS, 检查NS中的LEO卫星的可靠性

5) 根据式(13)与式(14), 统计与 g 建立链接的LEO卫星的非可靠数据大小 DV_{unsafe} 与剩余可分配数据大小 DV_{remain}

6) 直至NS遍历结束

7) 根据式(15), 重新分配至LEO卫星 s_j 的可靠数据大小 $DV_{s_j,g}^{\text{allocated}}$, 直至CA遍历结束

8) 根据式(16), 生成调整后的数据分配策略 $P^*(X)$, 并输出 $P^*(X)$

3.3 基于多队列的数据编排机制

地面站支持与多颗LEO卫星同时通信, 星地通信链路与输出队列一一映射。基于LEO卫星确认的数据分配策略, 考虑队列容量与最小已分配数据大小, 地面站编排数据至多条输出队列中, 并行传输数据, 以提升数据传输效率。

算法4描述了基于多队列的数据编排机制。首

先,地面站感知数据输出队列,并构建输出队列集合 Q 。其次,基于LEO卫星确认的数据分配策略 $P^*(X)$ 与分配的总数据大小 DV_{all} ,根据式 $DV_{unalloc} = P^*(X)DV_{all}$,地面站计算输出队列的剩余分配空间 $DV_{unalloc}$ (任意输出队列对应式 $DV_{unalloc}^{s_j} = p^*(s_j)DV_{all}$)。最后,根据已分配数据容量 $DV_{alloc}^{s_j}$ 的大小,将数据 m_i 分配至 $DV_{alloc}^{s_j}$ 最小的输出队列 q_{s_j} ,并根据式 $DV_{unalloc}^{s_j} - S_{m_i}$ 与式(7),分别更新 q_{s_j} 对应的剩余分配空间与剩余服务时间,直至所有数据分配完毕。

算法4 基于多队列的数据编排机制

输入 数据分配策略 $P^*(X)$,分配的总数据大小 DV_{all} ,数据集合 $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots\}$

1) 地面站感知输出队列,并构成集合 Q

2) 根据数据分配策略 $P^*(X)$ 与分配的总数据大小 DV_{all} ,计算输出队列的剩余分配空间 $DV_{unalloc} = P^*(X)DV_{all}$

3) 嵌套遍历 M 与 Q

4) 如果输出队列 q_{s_j} 的已分配数据容量($DV_{alloc}^{s_j}$)最小,则为其分配数据 m_i

5) 根据式 $DV_{unalloc}^{s_j} - S_{m_i}$,更新 q_{s_j} 的剩余分配空间,并根据式(7),更新LEO卫星 s_j 的剩余服务时间

6) 直至 Q 与 M 遍历结束

3.4 拓扑结构实时维护

由于卫星的高速移动性,星地链路切换频繁,导致拓扑结构频变。为提升LEO卫星对地面站生成的数据分配策略检查的有效性与可靠性,利用管理者集合 $ma_{na_1}, na_1 = \{LEO, g\}$ 与跟随者集合 $fol_{na_2}, na_2 = \{LEO, MEO\}$ 存储局域拓扑关系(其中, na_1 与 na_2 仅为2个集合的临时变量, ma_g 表示地面站的管理者集合, fol_{LEO} 表示LEO卫星的跟随者集合),采取LEO卫星报告、MEO卫星动态更新的方式,通过调整存储于MEO卫星中的地面站统计数量,实现高效动态更新星地拓扑结构 $G = \{1: [s_1, s_2, \dots], 2: [s_3, \dots], \dots\}$ 。

算法5描述了拓扑结构的实时维护过程。首先,获得变化链接两端的节点及其类型,包括地面站 g 、LEO卫星 s^{LEO} 、MEO卫星 s^{MEO} 。其次,

根据链路变化属性(是否建立链接) $isEst$ 的值,将拓扑结构的维护过程划分为以下4种情况。最终,输出拓扑结构 G 。

1) 情况1(节点为 g 与 s^{LEO} , $isEst$ 为真),表示 g 与 s^{LEO} 建立链接。 g 将 s^{LEO} 添加至 ma_g , s^{LEO} 将 g 添加至 fol_{LEO} ,并通知 s^{LEO} 的 ma_{LEO} 中的MEO卫星。MEO卫星统计 g 与其管辖范围内的LEO卫星链接的数量。

2) 情况2(节点为 g 与 s^{LEO} , $isEst$ 为假),表示 g 与 s^{LEO} 断开链接。 g 将 s^{LEO} 从 ma_g 中移除, s^{LEO} 将 g 从 fol_{LEO} 中移除,并通知 s^{LEO} 的 ma_{LEO} 中的MEO卫星。MEO卫星统计 g 与其管辖范围内的LEO卫星链接的数量。

3) 情况3(节点为 s^{MEO} 与 s^{LEO} , $isEst$ 为真),表示 s^{MEO} 与 s^{LEO} 建立链接。 s^{LEO} 将 s^{MEO} 添加至 ma_{LEO} , s^{MEO} 将 s^{LEO} 添加至 fol_{MEO} , s^{MEO} 统计 s^{LEO} 的管辖范围内的地面站的数量。

4) 情况4(节点为 s^{MEO} 与 s^{LEO} , $isEst$ 为假),表示 s^{MEO} 与 s^{LEO} 断开链接。 s^{LEO} 将 s^{MEO} 从 ma_{LEO} 中移除, s^{MEO} 将 s^{LEO} 从 fol_{MEO} 中移除, s^{MEO} 统计 s^{LEO} 的管辖范围内的地面站的数量。

算法5 拓扑结构实时维护

输入 LEO卫星报告的链路信息

输出 拓扑结构 G

1) 根据LEO卫星报告的链路信息,获取变化链接两端的节点及其类型,同时获取链路变化属性 $isEst$ 的值

2) 更新地面站、LEO卫星、MEO卫星的管理者集合与跟随者集合

3) MEO卫星统计地面站与LEO卫星的数量与其形成的链接数量

4) 生成并输出拓扑结构 G

3.5 算法复杂度与实时性分析

根据算法1~算法5中遍历集合的规模(元素的数量)与嵌套遍历层数,CMDAS的时间复杂度为 $O(2|S_{LEO}| + |CA||NS| + |M||Q| + C) = O(n^2)$,其中, $|\cdot|$ 表示集合中元素的数量, C 表示算法5中原子操作的数量。其次,根据上述算法的设计,星地网络的拓扑结构能够在卫星与地面站建立链路时传输,并不影响数据分配策略调整的效率,参考4.3.5节仿真实验的平均投递时延指标,CMDAS具备较高的实时性。

4 性能评估

4.1 仿真设置

仿真实验在机会网络环境仿真器 The ONE^[26] 中实现, 主要仿真配置参数如表 2 所示, 仿真场景设置为等比例地球模型, 采用墨卡托投影, 仿真时间设置为 18 000 s, 即 5 h。地面站、LEO 卫星、MEO 卫星分别分布于地球表面、近地轨道 (500~1 000 km)、中距轨道 (10 355 km)。MEO 卫星数量固定为 20, 地面站与 LEO 卫星的数量分别在 [25,150] 与 [100,300] 的范围内变化。为适配星座场景, 卫星移动速度根据万有引力公式计算得出, 即 $F = \frac{GM_c m_s}{R+H} = \frac{m_s v^2}{R+H}$, 其中, G 、 M_c 与 m_s 分别表示万有引力常量、地球质量与卫星质量。其次, 地面站、LEO 卫星、MEO 卫星搭载多阵列天线, 其信道间配置为正交信道, 以避免信道间干扰, 信道数量配置为 60^[27-28]。根据 Jung 等^[12]、Deng 等^[13] 和 Kamal 等^[29] 的参数配置情况, 地面站与卫星的信道参数配置为文献中对应参数。最后, CMDAS 依托多层星地架构, 同时支持单层 LEO 卫星情况 (算法 3), 因此, 其适配任何星地链路切换场景。

表 2 仿真配置参数

仿真参数	数值
仿真场景大小	40 074 156 m×20 037 078 m
LEO 卫星数量/个	100~300
MEO 卫星数量/个	20
地面站数量/个	25~150
最大仰角	10°, 12°, 14°
传输功耗/W	400
主瓣膜信道增益/dBi	38.5
副瓣膜信道增益/dBi	28.5
主副瓣膜阈值	20°
降雨衰减	1
噪声功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
载波频率/GHz	20
卫星功率增益指数/dBi	43.3
卫星接收天线增益/dBi	39.7
LEO 卫星高程/km	500~1 000
MEO 卫星高程/km	10 355
带宽/MHz	100
数据量(数量)	36 000~180 000
数据大小/MB	50~200

4.2 性能指标

投递率 (DR, delivery ratio) 表示已投递至目的地的数据量 (数量) 与数据总量的比值, 衡量数据传输的可靠性。平均投递时延 (ADL, average delivery latency) 表示数据投递至其目的地所花费的平均时间, 衡量数据传输的效率。中断率 (IR, interruption ratio) 表示中断数据量与数据总量的比值, 衡量数据传输的稳定性。

4.3 实验结果与分析

4.3.1 地面站与 LEO 卫星数量的影响

本节通过调整地面站与 LEO 卫星的数量, 探究其数量变化对 DR、ADL 与 IR 的影响。地面站与 LEO 卫星的比例为 $\zeta_{i,j}$, 其中, i 与 j 分别表示地面站与 LEO 卫星的数量, 其数值从 $\zeta_{25,100}$ 变化至 $\zeta_{150,300}$ 。数据量设置为 180 000, 地面站最大仰角设置为 10°, LEO 卫星高程设置为 700 km。

图 5(a)~图 5(c) 分别描述了 DR、ADL 与 IR 在不同 $\zeta_{i,j}$ 情况下的变化趋势。随着 LEO 卫星数量与地面站数量的增加, 投递率呈现上升趋势, 最高达 99.99%, 平均投递时延呈现下降趋势, 最低至 2.5 s; 随着地面站数量的增加, 中断率先降低后增加, 同时, 随着卫星数量的增加, 中断率的变化趋势最终呈现下降趋势, 最高中断率仅有 0.05%, 最低中断率仅为 0.02%。其原因是随着地面站数量增加, 数据分布分散, 这使得数据有更大的概率传输至 LEO 卫星; 其次, 地面站与更多的 LEO 卫星建立链接, 并同时传输数据, 降低了 DR; 此外, 随着 LEO 卫星数量的增加, 具备高服务能力的 LEO 卫星与地面站建立链接并接收数据, 使得 IR 降低。

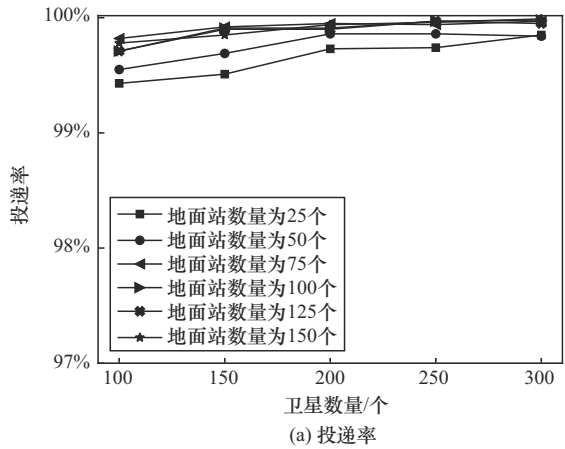
4.3.2 不同高程的影响

本节通过调整 LEO 卫星的高程, 探究不同高程对 DR、ADL 与 IR 的影响。根据上述实验结果, 地面站与 LEO 卫星的节点比例设置为 $\zeta_{50,200}$, 数据量与高程的变化范围分别设置为 36 000~180 000 与 500 km、700 km、1 000 km, 地面站最大仰角为 10°。

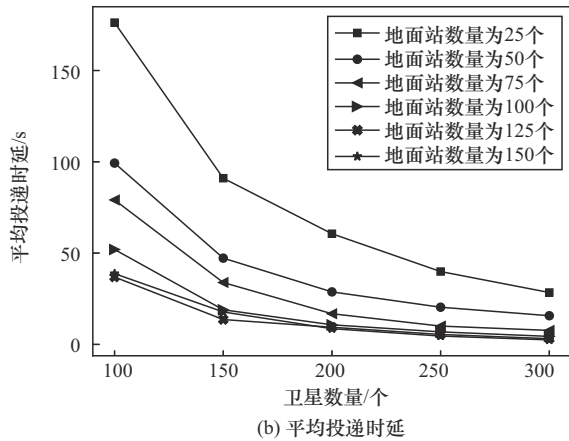
图 6(a)~图 6(c) 分别描述了 DR、ADL 与 IR 在不同高程情况下的变化趋势。其中, 随着高程的增加, DR 增加, 最高达 99.86%; ADL 与 IR 减少, 最低值分别为 14.2 s 与 0。DR、ADL 与 IR 在不同数据量的情况下数值相对稳定, 其原因是具备较高高程的 LEO 卫星具备更大的通信范围, 能够与更多地面站建立链接。随着 LEO 卫星高程的增加,

地面站与更多的 LEO 卫星建立链接, 数据有很大可能性传输至 LEO 卫星。

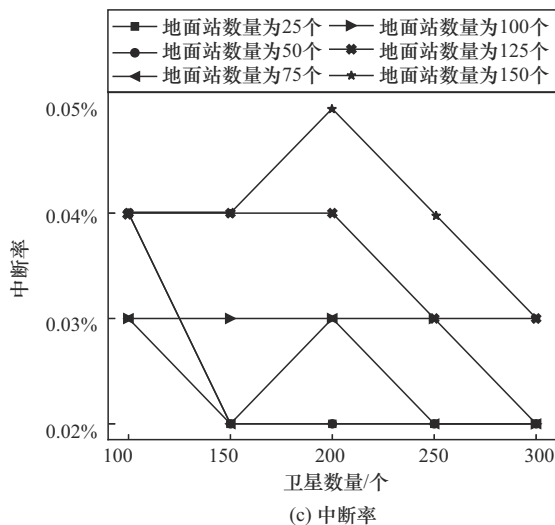
700 km, 数据量与最大仰角的取值范围分别设置为 36 000~180 000 与 10°、12°、14°。



(a) 投递率



(b) 平均投递时延

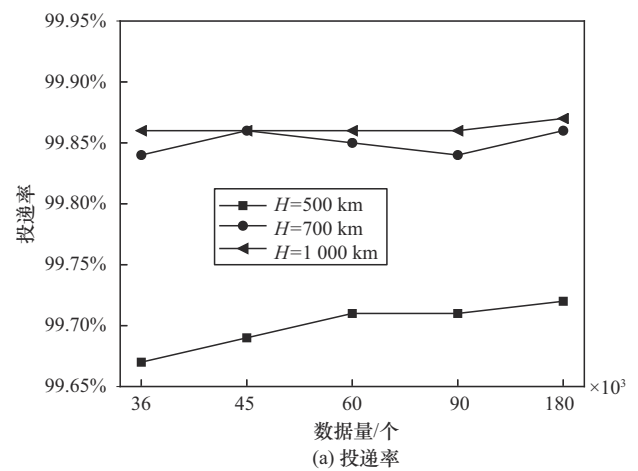


(c) 中断率

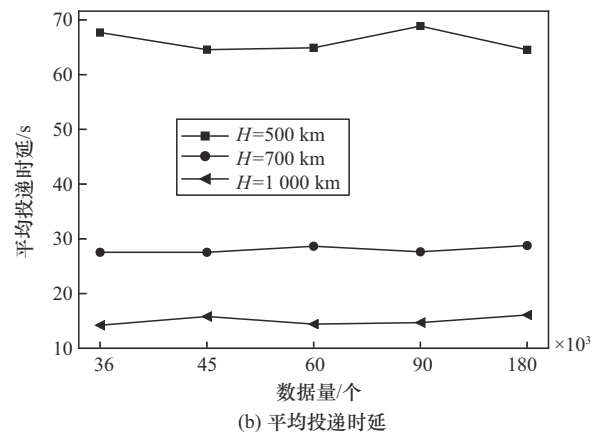
图5 DR、ADL与IR在不同 ζ_{ij} 情况下的变化趋势

4.3.3 不同最大仰角的影响

本节通过调整地面站的最大仰角, 探究不同仰角对 DR、ADL 与 IR 的影响。地面站与 LEO 卫星的节点比例设置为 $\zeta_{50,200}$, LEO 卫星高程设置为



(a) 投递率



(b) 平均投递时延

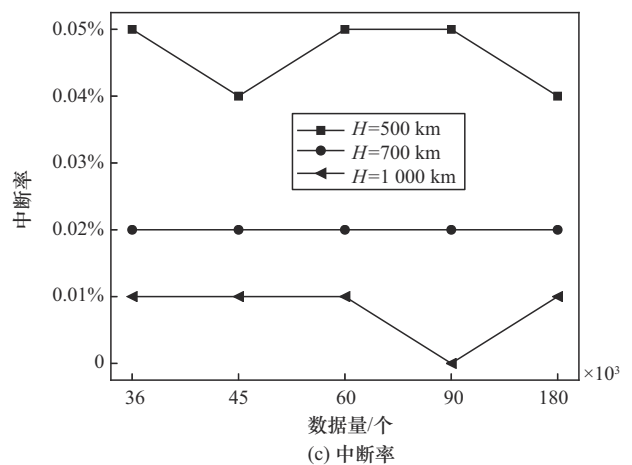


图6 DR、ADL与IR在不同高程情况下的变化趋势

图 7(a)~图 7(c)描绘了 DR、ADL 与 IR 在不同最大仰角情况下的变化趋势。随着地面站最大仰角的增加, DR 逐渐降低, ADL 与 IR 随之增加。当最大仰角为 10° 时, DR 的平均值为 99.85%, ADL 的平均值仅为 28.02 s, IR 稳定于 0.02%。其原因是地面

站的最大仰角越大，其感知（通信）范围越小，导致与 LEO 卫星建立链接的数量减少，进而使得数据传输效率降低，部分数据堆积于输出队列中，数据传输中断频次增加。

地面站最大仰角设置为 10° ，数据量（数量）与数据大小（存储大小）的取值范围分别设置为 36 000~180 000 与 50 MB、100 MB、150 MB、200 MB。

图 8(a)~图 8(c)描述了 DR、ADL 与 IR 在不同数据大小情况下的变化趋势。

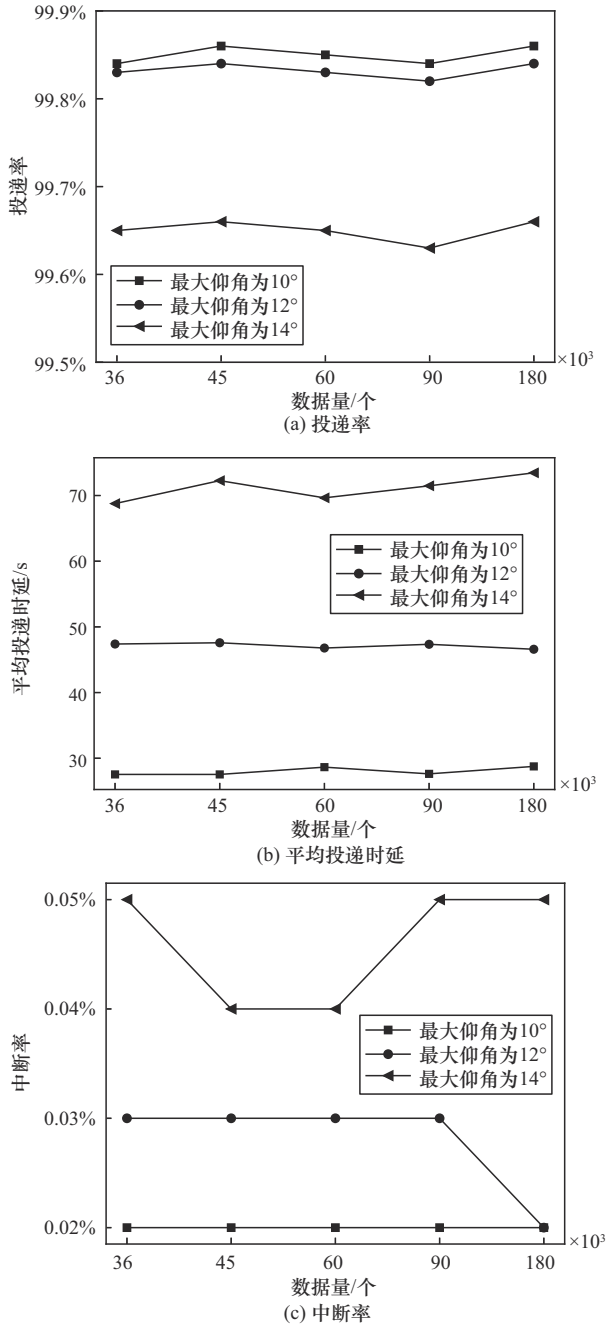


图 7 DR、ADL 与 IR 在不同最大仰角情况下的变化趋势

4.3.4 不同数据大小的影响

本节通过调整单个数据大小，探究数据量对 DR、ADL 与 IR 的影响。地面站与 LEO 卫星的节点比例设置为 $\zeta_{50,200}$ ，LEO 卫星高程设置为 700 km，

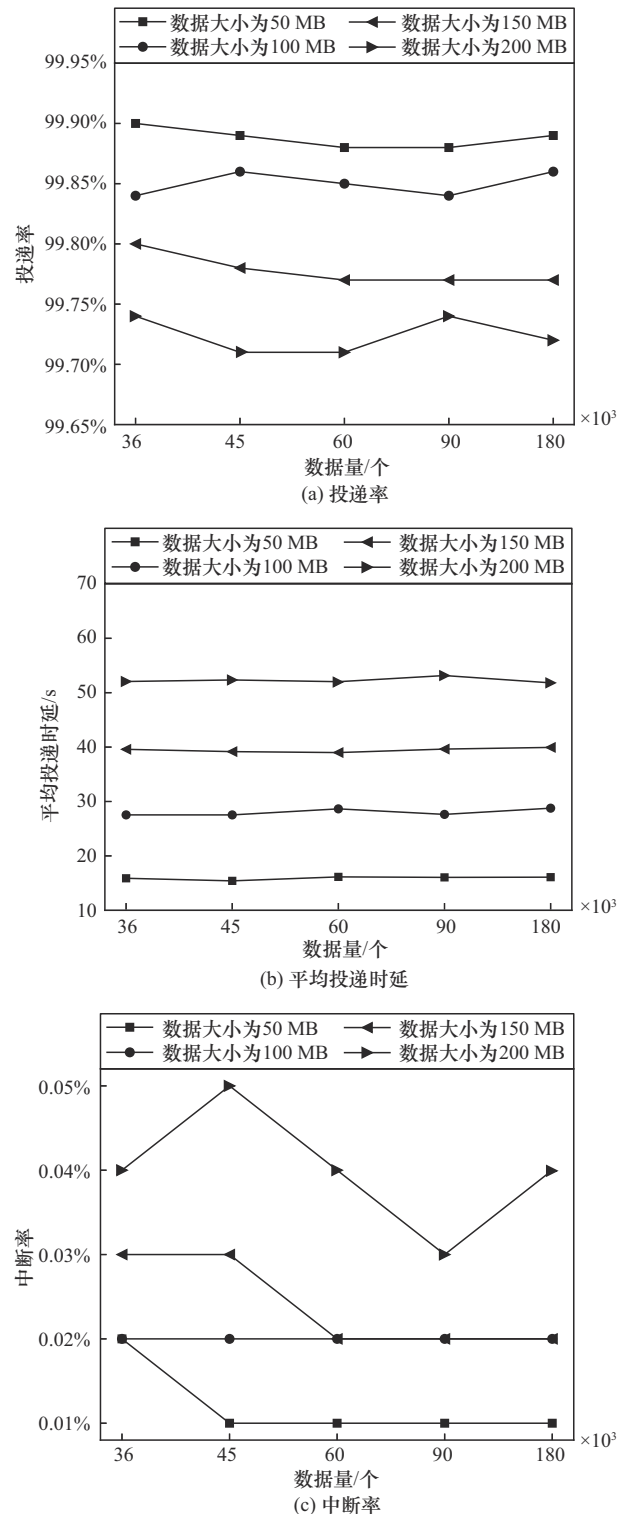


图 8 DR、ADL 与 IR 在不同数据大小情况下的变化趋势

从图8可以看到, DR随着数据大小的增加而减小, ADL和IR与数据大小呈正相关。当数据大小为50 MB时, DR最高达99.9%, ADL与IR的最低值分别为15.4 s与0.01%; 当数据大小为200 MB时, DR跌至99.71%, ADL与IR分别高于50 s与0.03%。出现上述现象的原因是随着数据大小的增加, 单个数据的传输时间增加, 其他数据的队列等待时间增加, 间接增加了ADL; 同时, 由于LEO卫星的高速移动性, 长时间的数据传输增加了数据传输中断的风险, 导致IR的数值增加; 最终, 由于数据中断频繁, 地面站重传数据, 部分数据依旧在输出队列中等待传输, 导致IR降低。

4.3.5 不同数据分配策略的影响

为验证CMDAS的算法性能, 考虑4种基准算法, 即最长服务时间优先(MST, maximum service time)^[9]、随机访问(RA, random access)^[29]、最短距离优先(MD, minimum distance)^[30]和基于网络流的链路切换策略(HSNF, handover strategy based on network flow)^[11]。其中, MST将数据分配给具有最长服务时间的LEO卫星; RA将数据随机分配给建立链接的LEO卫星; MD将数据分配给星地距离最小的LEO卫星; HSNF将数据分配给流负载最低的LEO卫星。基于上述基准算法, 本节探究不同数据分配策略对DR、ADL与IR的影响。地面站与LEO卫星的节点比例设置为 $\zeta_{50,200}$, LEO卫星高程设置为700 km, 地面站的最大仰角设置为 10° , 数据量设置为180 000, 数据大小设置为100 MB。

图9(a)~图9(c)描述了CMDAS、MST、MD、RA、HSNF这5种不同的数据分配策略对DR、ADL与IR的影响。从图9可以看出, CMDAS的性能明显优于其他基准算法, CMDAS的DR比MST、MD、RA与HSNF的DR分别高0.52%、2.14%、0.02%与2.25%; 在ADL方面, 相比MST、MD、RA与HSNF, CMDAS分别优化了69.57%、86.08%、35.49%与80.70%; CMDAS的IR仅为0.02%, 而MST、MD、RA与HSNF的IR分别为3.43%、6.40%、3.78%与1.10%。出现上述现象的原因如下: 根据时空域参数, CMDAS能够准确地评估LEO卫星的服务能力, 并按服务能力形成数据分配策略, 动态调整数据分配策略; MST仅考虑服务时间, 并未考虑星地之间的通信信道状态与星地距离, 无法实现动态数据分配; MD仅考

虑星地之间的距离, 并未考虑LEO卫星的剩余服务时间, 忽略了LEO卫星的负载能力; RA随机选择建立链接的LEO卫星作为数据接收方, 难以提供稳定可靠的服务; HSNF考虑了卫星吞吐量与地面站满意度, 但缺乏高效的输出队列管理方法。

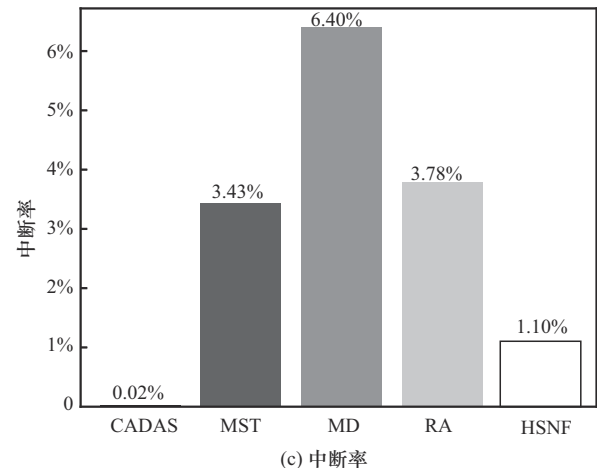
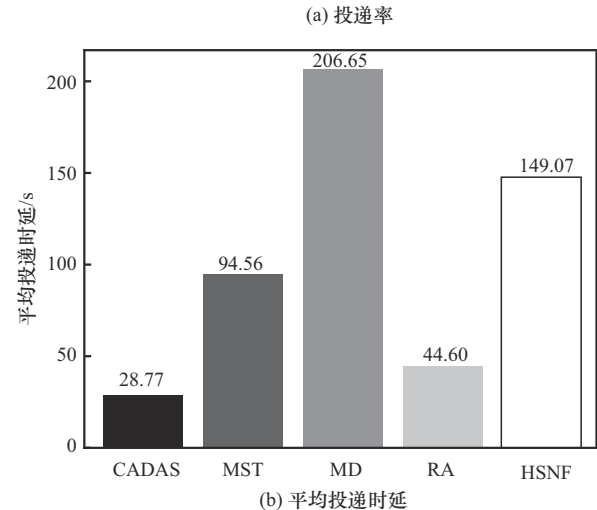
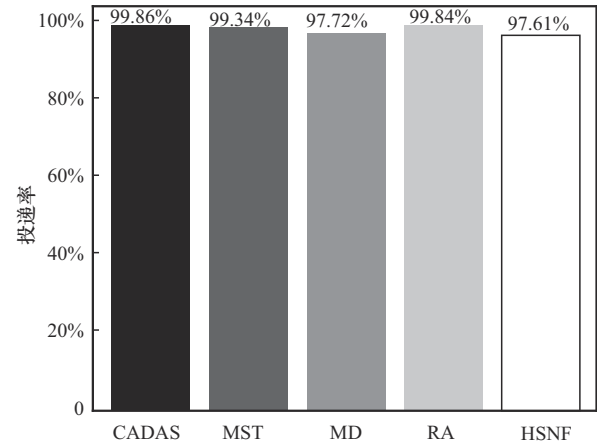


图9 不同的数据分配策略对DR、ADL与IR的影响

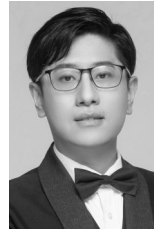
5 结束语

在 SAGIN 场景下, 本文研究了基于信道建模的 LEO 卫星服务能力量化与基于可靠检查机制的动态数据分配策略。考虑时空域因素 (星地距离、自由空间路径损失、信道增益、剩余服务时间等), 本文构建了信道感知的 LEO 卫星服务能力量化模型, 按比例生成数据分配策略, 依托数据交互历史信息, 根据可靠性检查规则, 动态调整并形成可靠的数据分配策略。仿真结果表明, CMDAS 具有较高的可靠性与数据传输效率, 即高数据投递率、低平均投递时延与低中断率。在未来工作中, 构建高精度星地信道模型, 研究链路状态感知与预测的星间链路切换是支撑星间海量数据传输的关键, 以保障空天地一体化网络的可持续性发展。

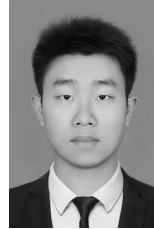
参考文献:

- [1] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 62-69.
- [2] QIU J F, GRACE D, DING G R, et al. Air-ground heterogeneous networks for 5G and beyond via integrating high and low altitude platforms[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6): 140-148.
- [3] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CONTI M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2624-2639.
- [4] ABDU T S, KISSELEFF S, LAGUNAS E, et al. Flexible resource optimization for GEO multibeam satellite communication system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 7888-7902.
- [5] CHEN C, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 507-521.
- [6] NIEPHAUS C, KRETSCHMER M, GHINEA G. QoS provisioning in converged satellite and terrestrial networks: a survey of the state-of-the-art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2415-2441.
- [7] JIAO J, WU S H, LU R X, et al. Massive access in space-based Internet of things: challenges, opportunities, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(5): 118-125.
- [8] CENTENARO M, COSTA C E, GRANELLI F, et al. A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1693-1720.
- [9] WU Z F, JIN F L, LUO J X, et al. A graph-based satellite handover framework for LEO satellite communication networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(8): 1547-1550.
- [10] FENG L, LIU Y F, WU L, et al. A satellite handover strategy based on MIMO technology in LEO satellite networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(7): 1505-1509.
- [11] ZHANG S B, LIU A J, HAN C, et al. A network-flows-based satellite handover strategy for LEO satellite networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(12): 2669-2673.
- [12] JUNG D H, RYU J G, BYUN W J, et al. Performance analysis of satellite communication system under the shadowed-Rician fading: a stochastic geometry approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(4): 2707-2721.
- [13] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Ultra-dense LEO satellite constellation design for global coverage in terrestrial-satellite networks[C]// *Proceedings of the GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [14] GUO C, GONG C, XU H T, et al. A dynamic handover software-defined transmission control scheme in space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(8): 6110-6124.
- [15] MUHAMMAD M, GIAMBENE G, COLA T D. QoS support in SGD-based high throughput satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 8477-8491.
- [16] ZHOU Y K, LIU J, ZHANG R, et al. A congestion-aware handover scheme for LEO satellite networks[C]// *Proceedings of the 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 896-901.
- [17] 朱洪涛, 郭庆. 基于用户群组的低轨卫星网络多星切换策略[J]. *电信科学*, 2022, 38(4): 39-48.
ZHU H T, GUO Q. User group based multi-satellite handover strategy for LEO satellite networks[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(4): 39-48.
- [18] ZHANG S B, LIU A J, HAN C, et al. A satellite handover strategy based on heuristic algorithm for LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 105(7): 876-884.
- [19] 胡家荣, 李伊陶, 熊兴中. 星地链路中基于毫米波大规模 MIMO 的混合预编码算法研究[J]. *无线电工程*, 2024, 54(5): 1063-1073.
HU J R, LI Y T, XIONG X Z. Hybrid precoding algorithm based on millimeter wave massive MIMO in satellite-terrestrial links[J]. *Radio Engineering*, 2024, 54(5): 1063-1073.
- [20] 戴翠琴. 基于协作的空间信息传输机制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
DAI C Q. Research on cooperation-based space information transmission mechanisms[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [21] KANELLOPOULOS S A, KOUROGIORGAS C I, PANAGOPOULOS A D, et al. Channel model for satellite communication links above 10GHz based on weibull distribution[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(4): 568-571.
- [22] LI K X, YOU L, WANG J H, et al. Downlink transmit design for massive MIMO LEO satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1014-1028.
- [23] IVANOV A, BYCHKOV R, TCATCORIN E. Spatial resource management in LEO satellite[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15623-15632.
- [24] 左珮良, 侯少龙, 郭超, 等. 基于强化学习的多层卫星网络边缘安全决策方法[J]. *通信学报*, 2022, 43(6): 189-199.
ZUO P L, HOU S L, GUO C, et al. Security decision method for the edge of multi-layer satellite network based on reinforcement learning[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(6): 189-199.
- [25] 邓旭, 朱立东. 多用户场景下卫星网络匹配博弈资源分配策略[J]. *无线电通信技术*, 2019, 45(6): 615-621.
DENG X, ZHU L D. Resource allocation strategy of satellite network matching game in multi-user scenario[J]. *Radio Communications Technology*, 2019, 45(6): 615-621.

- [26] KERANEN A, OTT J, KARKKAINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Rome: ICST Press, 2009: 1-10.
- [27] XU H H, LI D S, LIU M L, et al. QoE-driven intelligent handover for user-centric mobile satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10127-10139.
- [28] ABDI A, LAU W C, ALOUINI M S, et al. A new simple model for land mobile satellite channels: first- and second-order statistics[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(3): 519-528.
- [29] KAMAL S, MAHMOUD S. A study of users' buffer variations in random access satellite channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1979, 27(6): 857-868.
- [30] HE J F, JIANG Y, BIAN D M, et al. Routing strategy research based on ISL states and topology snapshot in LEO satellite constellation[C]//Proceedings of the 2008 11th IEEE International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2008: 13-16.



曹越 (1984-), 男, 湖北武汉人, 博士, 武汉大学教授, 主要研究方向为计算机网络安全、智能交通等。



陈诺 (2000-), 男, 湖北武汉人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为星地融合组网。

[作者简介]



宋宇杰 (1997-), 男, 四川绵阳人, 武汉大学博士生, 主要研究方向为车路协同组网传输、空天地一体化网络信任管理等。



孙智立 (1961-), 男, 博士, 萨里大学教授, 主要研究方向为卫星网络与互联网协议等。