# 天地联合测控鲁棒性路由算法

夏茹敏<sup>1</sup>,史可懿<sup>1</sup>,何健<sup>2</sup>,李红艳<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学通信工程学院,陕西西安710071;2. 上海航天电子技术研究所,上海201109)

摘 要:针对未来海量飞行器的测控需求与中继卫星有限资源之间的矛盾,在天地联合组网测控架构的基础 上,设计了基于时变图的时延保障鲁棒性路由算法,以满足测控任务低时延、高可靠的通信要求。首先,构建时间 扩展图(TEG),精准表征天地联合网络的时变拓扑、链路时延与业务需求;然后,将时延保障鲁棒性路由问题建模 为最短时延备份路径问题,采用贪心思想和增广路径回退机制,设计基于TEG的最短时延备份路径算法,高效获 取两条低时延且互为链路备份的端到端路径,为测控业务传输提供鲁棒性保障;最后,分析了时间复杂度并给出算 法应用示例。相比于传统备份路由方法,所提算法能够构建时延性能较好的备份路径(仅增加0.01 s),100%保障 单链路失效情况下测控业务传输不中断。

关键词: 天地联合网络; 测控; 可靠性; 鲁棒路由; 时间扩展图
中图分类号: TN 927<sup>+</sup>.2
文献标志码: A
DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.04.014

# Robust Routing Algorithm for Space-Ground Integrated Telemetry, Tracking, and Command

XIA Rumin<sup>1</sup>, SHI Keyi<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, LI Hongyan<sup>1</sup>

(1.School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;2.Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the contradiction between the telemetry, tracking, and command (TT&C) requirements of a large number of aircraft and the limited resources of relay satellites in the future, a temporal graph based delay-guaranteed robust routing algorithm is designed to meet the communication requirements of low-delay and high-reliability for TT&C missions, on the basis of the space-ground integrated TT&C architecture. First, the time-expanded graph (TEG) is constructed to accurately represent the time-varying topology and link delay of the space-ground integrated network and the communication requirements of missions. Then, the delay-guaranteed robust routing problem is formulated as a minimum delay backup path problem. With the greedy idea and augmenting path fallback mechanism, a TEG-based minimum delay backup path routing algorithm is proposed to effectively obtain two link-disjoint end-to-end paths with low delay, providing robustness guarantee for the transmission of TT&C services. Finally, the time complexity is analyzed, and an algorithm application is presented. Compared with the traditional backup routing method, the proposed algorithm can construct a backup path with better delay performance (increasing by 0.01 seconds only), and 100% guarantees the uninterrupted transmission of TT&C services in the case of single link failure.

**Key words:** space-ground integrated network; telemetry, tracking, and command (TT&C); reliability; robust routing; time-expanded graph

收稿日期:2021-03-16;修回日期:2021-05-13

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0501004)

作者简介:夏茹敏(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为空间网络弹性路由和OPNET仿真。

通信作者:史可懿(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为卫星网络组播路由和时间确定性组网。

0 引言

随着应急通信、应急救援、导航定位、遥感遥 测、国防安全、智慧城市等领域的迅速发展,航天测 控(Telemetry, Tracking, and Command, TT&C) 网扮演起越来越重要的角色,为运载火箭、航天器 跟踪测轨、遥测信息的下传接收与处理、遥控指令 上行数据注入等任务提供服务和保障<sup>[1]</sup>。航天测控 网由多个地面站、测控中心和通信系统组成<sup>[2]</sup>。随 着发射飞行器数量的激增以及功能的多样化<sup>[3]</sup>,为 满足海量飞行器的高效测控需求,航天测控逐渐从 以地面站为主的地基测控网演进为天地联合的天 基测控网<sup>[4]</sup>。传统地基测控网过分依赖地面测控站, 为实现近地卫星全天候不间断的测控,需要进行全 球布站。20世纪80年代建成的跟踪与数据中继卫 星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)<sup>[5]</sup>,以地球同步中继卫星为依托,形成测控 中心一地面站一中继卫星—用户星的前向链路,与 用户星—中继卫星—地面站—测控中心的反向链 路,完成卫星遥控指令的注入与卫星遥测数据的接 收<sup>[6]</sup>。但是,TDRSS系统仍然存在局限性<sup>[7]</sup>:一方 面,TDRSS系统整体服务的用户数量仍然有限<sup>[8]</sup>; 另一方面,TDRSS仍然采用对测控任务进行预先 规划的测控形式,对于突发测控任务显得无力。中 低轨卫星星座代替地球同步轨道通信卫星为近地 卫星提供中继测控服务的机制,虽然有为更多用户 提供测控服务的能力,但其覆盖性与TDRSS系统 相差甚远。基于此,亟需研究一种新型的航天测控 方法,既能满足低轨卫星全覆盖的需求,又能为未 来海量多功能卫星提供实时、精准、灵活的测控服 务,即天地联合组网测控技术,如图1所示。



图 1 天地联合组网测控架构 Fig.1 TT&C architecture of space-ground integrated network

Fig.1 11&C architecture of space-ground integrated networ

天地联合测控网络包含"两网一链":"两网"分 别位于空间和地面,天网是由低轨卫星星座与高轨 卫星及近地飞行器提供100%的轨道覆盖率与丰富 的测控资源;地网是由地面站、地面控制中心和地 面通信互联网组成的地基信息网络,负责卫星测 量、观测数据与控制指令的接受、处理与传输;"一 链"指天网中卫星节点之间的通信链路,即星间链 路(Inter Satellite Links, ISL),是星间组网进行路由 传输的基础。星间链路的加入,将为卫星测控带来 极大的便利,抛弃测控站"静态调度""大测控,小中 心"的旧模式是必然趋势<sup>[9]</sup>。随着航天任务频次的 增加及测量弧段等要求的提高,地基测控系统的发展已不能完全满足未来运载火箭及卫星测控任务的需求<sup>[10]</sup>。我国的航天测控网的主要发展途径逐步由陆、海基测控网向天基为主、天地结合的一体化综合测控网发展<sup>[11]</sup>。

天地联合组网测控虽然具备全球覆盖、资源丰 富和灵活度高等优势,但也面临一系列挑战。测控 高可靠要求与卫星组网路由不稳定相矛盾,中低轨 卫星、临近空间飞行器及地面测控站相对运动,难 以存在稳定的端到端路径。此外,空间环境复杂, 空间辐射、日凌等因素会导致星间链路性能降低, 甚至中断。航天测控对测控信息的传输可靠性具 有很高要求,需要路由具备较强的鲁棒性以抵制网 络时变特征与链路不稳定特性所带来传输路径不 可靠性。传统的鲁棒性指标用于衡量系统在结构、 大小等参数的摄动下,仍能够维持某些性能的特 性。而路由鲁棒性可定义为路径中节点/链路失效 时,维持端到端数据传输性能(如连通性、时延、吞 吐量等)的能力。如何在时变网络环境中构建高鲁 棒性路由是有待解决的问题。

网络拓扑和多维资源的精准表征是路由设计的基础,本文将采用时变图模型刻画天地联合测控 网络的时变特征。为了不断提升表征精准性和高效性,时变图不断演进,经历了快照图、时间扩展图 (Time-Expanded Graph, TEG)、时间聚合图、存储 时间聚合图的发展历程<sup>[12]</sup>,如图2所示。



快照图是一段时间内多张静态图的集合,在时间维度上将连续变化的网络拓扑进行离散化处理,由一段时间内的多个快照图共同表征该段时间内的网络特征<sup>[13]</sup>。快照图在一定程度上记录了时变网络拓扑随时间变化的状态,但却割裂了每个快照子图之间的关联关系。时间扩展图适用于拓扑变化不频繁的时变网络,需要较大的存储空间,产生较大的计算代价<sup>[14]</sup>。时间聚合图去掉了时间扩展图的存储边,在网络拓扑图的每个链路上用时间序列表示该链路的连接变化情况,将多个时隙的网络子拓扑进行压缩聚合,但是由于没有节点复制,缺少对节点存储资源的表征<sup>[15]</sup>。存储时间聚合图在2015年被提出,该模型在时间聚合图的基础上,对节点模型进行改进,将节点存储资源随时间变化的过程抽象为节点存储资源转移的时间序列,结合时间扩展图与时

间聚合图的优点,既精确地表征了时变网络多维资源关系,又节省了模型的存储空间,缺点在于链路时间序列与节点时间序列计算复杂<sup>[16]</sup>。

在地面网络路由鲁棒性的研究中,通常是通过 备份路径机制实现,即为业务传输同时构建两条链 路/节点分离的端到端路径,一条为主路径,另一条 为备份路径<sup>[17]</sup>。这种机制能够有效保障在网络单 链路故障情况下,业务传输不中断。对于卫星网 络,ZHAO<sup>[18]</sup>提出了一种基于面向连接结构的增强 路由算法,能够在源卫星和目标卫星间在线寻找最 佳路径。ZHANG等<sup>[19]</sup>在2014年于依赖网络模型 中提出了一种基于重要抽样的计算路径失效概率 的算法,并得到网络中一对节点之间最具可靠性的 路径。LONG等<sup>[20]</sup>在2014年对多层卫星网络的鲁 棒 QoS路由技术进行了研究,在链路拥塞和节点故 障处理机制上进行改进,提出了一种新的卫星分组 路由协议,使得路由策略更加健壮。

本文面向未来海量多功能卫星提供实时、精 准、灵活、可靠测控的需求,设计了天地联合测控鲁 棒性路由方法,在时变、干扰环境中保障测控业务 端到端可靠传输。首先,分析现有地基与天基测控 系统的优势与不足,提出基于混合星座组网的新型 测控架构;然后,借助时间扩展图模型,精准表征天 地联合网络拓扑连接和链路时延时变性,进而将时 延保障鲁棒路由问题建模为最短时延备份路径问 题,采用贪心思想和增广路径回退机制,提出基于 时间扩展图的最短时延备份路径算法,能够同时计 算出两条满足时延需求且链路分离的端到端时变 路径,确保在单链路故障情况下测控业务的成功传 输;最后,通过算例和复杂度分析验证了算法效能。

1 系统模型

### 1.1 天地联合组网测控架构

天地联合组网测控网络由空间段和地面段两部分构成。空间段包括用户飞行器(如遥感卫星、载人航天飞船、资源卫星等测控对象)、低轨星座网络(如Iridium、OneWeb、Telesat等配备星间链与星上处理能力的低轨卫星星座);地面段包括若干地面站、地面控制中心、地面网络以及用户飞行器所对应的地面用户。空间与地面网络联合对用户飞行器进行测量与控制,完成控制指令的上注与测量

信息的下传,根据指令对用户飞行器的飞行状态进行调整,保障用户飞行器的正常运行。

传统的跟踪与数据中继系统是利用中继卫星进 行"弯管传输",而在天地联合组网测控模型中,低轨 星座网络代替中继卫星来完成数据中继的任务,相 比传统的地球同步轨道中继卫星,低轨星座卫星不 仅具备很高的覆盖率,而且距离地面更近,具有更短 的传播时延。最重要是的,星座网络中的卫星间存 在星间链,卫星上装备有具备路由功能的机载处理 模块,能够组成功能强大的星座互联网。在该星座 互联网中,每颗卫星都相当于一个独立的IP网络节 点,因此,针对突发任务请求,用户飞行器可以按照 自己的任务需求,在路由表中寻找相应的目的节点, 独立自主地完成数据的传输任务,不再依赖于预先 规划任务的测控机制,大大提高测控的灵活性。

地面控制中心是测控技术的计算中枢,地基、 天基或是天地联合组网的测控机制所查询的任务 调度方案(预约)或路由表(即时),都是在地面控制 中心进行计算与生成的。以控制指令上传过程为 例,介绍天地联合组网测控机制工作流程:首先,地 面用户会根据任务需求向地面控制中心申请进行 测控控制指令上传的工作;然后,地面控制中心会 根据相关请求内容(控制用户飞行器IP地址、地面 用户IP地址、用户飞行器的调整策略等),在路由表 中寻找对应的传输路径,地面控制中心用查询结果 对测控指令进行封装并将其发送至对应的地面站, 地面站通过中继网络(低轨星座)将测控指令发送 至对应的目标飞行器;最后,用户飞行器会根据测 控指令进行相应的姿态、方向等调整,完成控制指 令上传工作。对于用户飞行器测量数据的下传过 程是控制指令上传过程的逆过程,同样根据查询路 由表完成测量数据的下传工作。

#### 1.2 时间扩展图表征天地联合网络时变特性

考虑一个典型的天地联合网络,包含一颗源卫 星*s*,多颗传输卫星{*r*<sub>1</sub>,*r*<sub>2</sub>,...,*r*<sub>N-2</sub>}和一个地面站节 点*d*,如图3所示,链路连接关系随时间变化。源卫 星*s*期望通过传输卫星中继或直接过顶下传将信息 (如位置、姿态、遥感信息等)发送到地面站,用于测 控。为了精准刻画天地联合网络的时变拓扑和链 路时延,构建时间扩展图模型*T*<sub>EG</sub> ={*V*,*E*,*D*}。特 别地,依据拓扑变化特征将规划时间区间*T* = [*t*<sub>0</sub>,*t*<sub>k</sub>)划分为*k*个连续时隙( $\tau_1, ..., \tau_h, ..., \tau_k$ ),  $\tau_h$  = [*t*<sub>h-1</sub>,*t*<sub>h</sub>),满足各时隙内网络拓扑保持不变。



图 3 天地联合网络示例 Fig.3 An example of the space-ground integrated network

构建的时间扩展图如图 4 所示,包含:1) 节点 集合 V 为网络中卫星节点在各时隙中的复制。 2)边集合 E。对于  $\forall u^h, v^h \in V$ ,传输边 $(u^h, v^h) \in E$ 为 从 节点 u 到 v 的在时隙  $\tau_h$ 内的通信链路,对于  $\forall u^h, u^{h+1} \in V$ ,存储边 $(u^h, u^{h+1}) \in E$ 刻画了节点u的 存 储 能 力 。 3) 链 路 时 延 集 合 D。对于  $\forall (u^h, v^h) \in E, D_{u^h, v^h}$ 为在 $\tau_h$ 时隙内链路(u, v)的传播 时延;对于 $\forall (u^h, u^{h+1}) \in E, D_{u^h, u^{h+1}}$ 为节点u托管数 据的时长,可以认为等于时隙 $\tau_h$ 的长度。本文假定 所有时隙长度均为60 s。

由于时间扩展图将数据源卫星和地面站分别 拆分为不同时段的多个源节点和目的节点,违背了





单源单汇最短路径的约束。

为解决该问题,在原始 TEG 模型中分别引入虚 拟源节点 s'、辅助发送边(s', s<sup>1</sup>)、虚拟目的节点 d'和 辅助汇聚边{ $(d^{h}, d')|1 \leq h \leq k$ },得到修正的图模型 MTEG,如图 5 所示,支持跨时段端到端路径的构建。



Fig.5 Modified time-expanded graph

基于MTEG,可以将时延保障鲁棒路由问题建 模为最短时延备份路径问题,即

min 
$$D(P_c) + D(P_b) = \sum_{(u,v) \in P_c} D_{u,v} + \sum_{(m,n) \in P_b} D_{m,n}$$

s.t.  $(u, v) \neq (m, n)$ ,  $\forall (u, v) \in P_c, (m, n) \in P_b$  (1) 式中:  $P_c = \{(s', s^1), \dots, (u, v), \dots, (d^i, d')\}$ 和 $P_b =$  $\{(s', s^1), \dots, (m, n), \dots, (d^j, d')\}$ 为从s'到d'的一条 主路径和一条备份路径,两者没有重复边;  $D(P_c), D(P_b)$ 为路径 $P_c$ 和 $P_b$ 的端到端时延,由 路径中各通信链路的传播时延和各节点的托管 时长决定。 2 天地联合鲁棒性路由方法

## 2.1 基于时间扩展图的最短时延备份路径算法

对于给定的修正时间扩展图 MTEG,为求得两 条互为链路备份的最短时延路径,最直观的贪婪策略 是先采用任意最短路径算法搜索一条从s'到 d'的最 短时延路径 P<sub>c</sub>。然后对 MTEG 进行剪枝,即去除掉 包含在 P<sub>c</sub>中的所有边,得到残余网络 MTEG,并搜索 另一条端到端最短路径 P<sub>b</sub>,获得具有时延和鲁棒性保 障的备份路径路由。然而,由于剪枝会降低网络的连 通性,可能导致备份路径无法构建,如图6所示。



Fig.6 Construction failure of backup path owing to pruning

天地联合网络中节点高速移动、链路断续连 通,缺乏稳定的端到端连通路径,基于剪枝的备份 路径构建算法应用受限。

本文依托增广路径回退思想,提出基于时间扩展 图的最短时延备份路径算法。在路径搜索过程中,若 选定的主路径导致满足链路无关的备份路径无法构 建时,能够自主对主路径进行修正,得到满足时延和 鲁棒性要求的两条路径。特别地,考虑到MTEG中 不同时隙的复制边本质上对应同一条物理链路,一旦 该链路在某时隙 $\tau_h$ 中断,则后续时隙中相应的复制边 也不可用。因此,为严格满足链路备份要求,在主路 径 $P_c$ 搜索完并更新网络链路时延代价时,对于  $\forall(u^h, v^h) \in P_c$ ,MTEG中 $(u^h, v^h), \dots, (u^k, v^k)$ 的时延代 价均要修正,以避免备份路径 $P_b$ 构建时选择与 $P_c$ 重 复的链路。具体算法步骤如下:

**步骤1** 时延惩罚值θ定价。θ定义为MTEG 中虚拟源节点s<sup>'</sup>到虚拟目的节点d<sup>'</sup>之间最长时延无 环路径的时延代价。

步骤2 主路径  $P_c$  搜索。利用 Dijkstra 算法<sup>[21]</sup> 在 MTEG 中搜索从 s' 到 d' 的最小时延路径  $P_c = \{(s', s^1), \dots, (u, v), \dots, (d^i, d')\}_{\circ}$ 

步骤3 链路时延代价更新,获得残余网络 MTEG。 对于  $\forall (u,v) \in P_{\epsilon} - \{(s',s^1), (d^i, d')\},$ 在 MTEG中引入反向边(v,u),定义时延代价为 $D_{v,u} = -D_{u,v},$ 支持 $P_{\epsilon}$ 的调整;对于 $P_{\epsilon}$ 中的任意通信链路  $(u^h, v^h),$ 在MTEG中将边 $(u^h, v^h), \cdots, (u^k, v^k)$ 的时延 均增加 $\theta$ ,避免搜索备份路由时重复选择 $P_{\epsilon}$ 中的链路。

步骤4 备份路径  $P_b$ 构建。利用 Bellman-Ford 算法<sup>[22]</sup>在 MTEG 中寻找从 s'到 d'的最小时延路径。

**步骤5** 路径更新。若*P*<sub>e</sub>中存在子路径在*P*<sub>b</sub> 中有对应的反向子路径,则需抵消该子路径,重构 端到端路径*P*<sub>e</sub>'和*P*<sub>b</sub>',即为满足链路备份要求的两 条最短时延路径。

#### 2.2 算法复杂度分析

**定理1** 对于给定的天地联合网络,包含N个节点(卫星和地面站)和M条通信链路,基于时间扩展图的最短时延备份路径算法时间复杂度为 O(k<sup>2</sup>NM),其中,k为时间扩展图划分时隙数。

**证明** MTEG 表征天地联合网络时对节点和 链路进行了复制,包含 *kN*+2个顶点和至多 *k*(*M*+1)+1条边。步骤1中时延惩罚值定价可通 过将各边时延代价取负,并利用 Dijkstra 算法寻找最 小"负时延"路径,转换后得到最长时延路径代价 $\theta$ , 复杂度为 $O((kN+2)^2) \approx O(k^2N^2)$ 。步骤 2 中调 用 Dijkstra 算 法 搜 索 主 路 径  $P_c$  复 杂 度 也 为  $O((kN+2)^2) \approx O(k^2N^2)$ 。步骤 3 中需更新时延代 价的边至多为(k+1)M条,因此复杂度为 $O((k+1)M) \approx O(kM)$ 。步骤 4 中由于 MTEG 存在时延 代价为负的边,因此采用 Bellman-Ford 算法计算  $P_b$ , 复 杂 度 为  $O((kN+2)((k+1)M+k+1)) \approx$  $O(k^2NM)$ 。由于步骤 5 中反向子路径消除至多进 行 M次,因此复杂度为O(M)。综上,基于时间扩展 图 的最短时延备份路径算法具有 2 ·  $O(k^2N^2)$ +  $O(kM) + O(k^2NM) + O(M) \approx O(k^2NM)$ 的时间复 杂度。

## 3 算法应用实例

基于图 6 给出的 MTEG,给出基于时间扩展图的最短时延备份路径路由算法的运行实例。

如图7(a)所示,根据端到端最长时延路径 { $(s', s^1), (s^1, s^2), (s^2, r_2^2), (r_2^2, r_4^2), (r_4^2, d^2), (d^2, d')$ } ( 标 为红色),得到时延惩罚值 $\theta = 60.06$  s。在图7(b) 中,应用 Dijkstra 算法,获得最短时延主路径  $P_c =$ { $(s', s^1), (s^1, r_2^1), (r_2^1, r_2^2), (r_2^2, r_3^2), (r_3^2, d^2), (d^2, d')$ }, 时 延 $D(P_{c}) = 60.03 \,\mathrm{s}$ 。为更新MTEG中的链路时延 代价,首先引入反向边 $(r_2^1, s^1), (r_2^2, r_2^1), (r_3^2, r_2^2)$ 和  $(d^2, r_3^2)$ ,设定"负时延"代价分别为 -0.01, -60, -0.01和-0.01s。此外,将( $s^1, r_2^1$ ),( $r_2^1, r_2^2$ ),( $r_2^2, r_3^2$ )  $\pi(r_3^2, d^2)$ 的时延均增加 $\theta_{o}$ s与 $r_2$ 之间的链路被 $P_c$ 在 时隙 $\tau_1$ 占用,因此 $(s^2, r_2^2)$ 的时延需更新为60.08 s,得 到的残余网络MTEG如图7(c)所示。在图7(d)中, 应用 Bellman-Ford 算法搜索最短时延备份  $P_b$  =  $\{(s', s^1), (s^1, r_1^1), (r_1^1, r_3^1), (r_3^1, r_3^2), (r_3^2, r_2^2), (r_4^2, d^2), \}$  $(d^2, d')$ ,  $D(p_b) = 60.06 \, \text{s}$ 。因 $P_c$ 与 $P_b$ 存在反向子路  $\mathcal{E}(r_2^2, r_3^2)$ 和 $(r_3^2, r_2^2)$ ,需对两条路径合并消除,最终 得到时延最短且链路备份的两条端到端路径 P\_'= { $(s', s^1), (s^1, r_1^1), (r_1^1, r_3^1), (r_3^1, r_3^2), (r_3^2, d^2), (d^2, d')$ }(标 为绿色)和  $P_b' = \{(s', s^1), (s^1, r_2^1), (r_2^1, r_2^2), (r_2^2, r_4^2), \}$  $(r_4^2, d^2), (d^2, d')$  (标为紫色), 时延分别为 $D(p_c') =$  $60.04 \text{ s} 和 D(p_b') = 60.05 \text{ s}$ 。当测控数据传输过程 中 $P_{c}'$ 因链路失效而不可用时,数据将通过路径 $P_{b}'$ 继续传输,时延仅增加0.01s。



Fig.7 An application of the TEG-based minimum delay backup path routing algorithm

传统备份路由构建方法的运行实例如图 8 所 示,该方法基于快照图<sup>[13]</sup>、贪婪策略和剪枝操作。 由于在第1时段内,源节点*s*与目的节点*d*之间无连 通路径,仅能在第2时段的网络拓扑中搜索主路径。 如图 8(a)所示,以路径时延最小化为优化目标,应 用 Dijkstra 算 法 获 得 主 路 径  $P_c$ =  $\{(s, r_2), (r_2, r_3), (r_3, d)\}$ ,路径时延 $D(P_c) = 60 + 0.04 = 60.04$  s,包含 60 s 的等待时延和 0.04 s 的路 径传输时延。

通过剪枝操作获得的残余网络如图8(b)所示, 由于第1和第2时段内s与d均不连通,因此无法构 建备份路径P<sub>b</sub>。



Fig.8 An example of the traditional backup path routing algorithm

# 4 结束语

本文针对未来海量多功能卫星可靠测控需求, 提出天地联合测控时延保障鲁棒路由方法。首先, 分析现有地基与天基测控系统的优势与不足,提出 基于混合星座组网的新型测控架构。然后,利用时 间扩展图模型表征网络拓扑和链路时延的时变性, 并将时延保障鲁棒路由问题建模为最短时延备份 路径问题。基于构建的时间扩展图模型,提出高效 的最短时延备份路径算法。该算法采用贪心思想 并搜索路径,并利用增广路径回退机制,动态调整 主路径,获取满足时延要求的备份路径,确保在任 意单链路故障情况下测控业务的快速传输。

#### 参考文献

- [1] 曹岸杰, 王辉, 刘庆波, 等. 一种基于时间调制的弹性化 SAR卫星系统[J]. 上海航天, 2018, 35(6): 51-56.
- [2] 白元庆.航天测控网络中量子密钥通信技术应用研究 [D].沈阳:沈阳航空工业学院,2009.
- [3] 郭明坤,夏广庆,韩亚杰,等.微纳卫星新型动力系统研究进展[J].上海航天,2019,36(6):104-113.
- [4]关晖,宁永忠.我国在轨卫星测控发展历程及展望[J]. 国际太空,2018(1):57-61.
- [5] BRANDEL D L, WATSON W A, WEINBERG A. NASA's advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(7): 1141-1151.
- [6] 李爱红.中继卫星高速数传系统中发射端数字信号处 理技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
- [7]张海涛,张占月,吴帅,等.地球静止轨道卫星碰撞碎片 短期演化风险分析[J].上海航天,2019,36(1):66-77.
- [8] 李于衡,孙海忠,王旭康.近地卫星天基测控现状研究[J].无线电工程,2020,50(1):1-9.
- [9] 翟政安,吴斌.我国航天测控网发展构想[J].飞行器测 控学报,2000,19(3):7-12.
- [10] 李艳华,卢满宏.天基测控系统应用发展趋势探讨[J]. 飞行器测控学报,2012,31(4):1-5.
- [11] 沈荣骏,赵军.我国航天测控技术的发展趋势与策略 [J].宇航学报,2001,22(3):1-5.

- [12] 李红艳,张焘,张靖乾,等.基于时变图的天地一体化网 络时间确定性路由算法与协议[J].通信学报,2020,41 (10):116-129.
- [13] HUANG M, CHEN S, ZHU Y, et al. Topology control for time-evolving and predictable delay-tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(11): 2308-2321.
- [14] KÖHLER E, LANGKAU K, SKUTELLA M. Timeexpanded graphs for flow-dependent transit times [C]// European Symposium on Algorithms. Berlin: Springer, 2002: 599-611.
- [15] GEORGE B, SHEKHAR S. Time-aggregated graphs for modeling spatio-temporal networks [M]. Berlin: Springer, 2008: 191-212.
- [16] LI H Y, ZHANG T, ZHANG Y K, et al. A maximum flow algorithm based on storage time aggregated graph for delay-tolerant networks [J]. Ad Hoc Networks, 2017, 59: 63-70.
- [17] KODIALAM M, LAKSHMAN T V. Restorable dynamic quality of service routing [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6):72-81.
- [18] ZHAO Z G. A robust ATM-Based routing algorithm in LEO satellite communication networks [C]// Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 626-626.
- [19] ZHANG J, MODIANO E. Robust routing in interdependent networks [C]// 2017 IEEE Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [20] LONG F. Satellite network robust QoS-aware routing[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [21] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerische Mathematics, 1959, 1:269-271.
- [22] CHENG C, RILEY R, KUMAR S P R, et al. A loopfree extended Bellman-Ford routing protocol without bouncing effect [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1989, 19(4): 224-236.