



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

LEO&GEO 双层卫星网络的组网关键技术研究

作者姓名: 姚晔

指导教师: 梁旭文 研究员

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学位类别: 博士

学科专业: 通信与信息系统

研究所: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

二〇一三年八月

Research on Key Techniques of Networking for LEO&GEO
Double-layered Satellite Network

By

Yao Ye

A Dissertation/Thesis Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Communication and Information System

Shanghai Institute of Microsystem And Information Technology
August, 2013

致 谢

值此成文之际，谨向在这几年来给予我指导、关心、支持和帮助的老师、领导、同学和亲人们致以衷心的感谢！

首先，由衷地感谢我的导师梁旭文研究员。梁老师严谨求实的治学态度，精益求精的科研精神，锐意进取的工作作风，宽厚坚实的理论功底，深深影响着我，本文的完成离不开梁老师的热心关怀和悉心指导。有幸得到梁老师的指导，是我一生中最难得的机遇。在此谨向梁老师致以最诚挚的感谢！

感谢通信通信技术室副主任龚文斌博士的协助指导。龚老师在我的学习和工作中给予了我悉心的指导，龚老师在通信、电子领域知识渊博，经验丰富，平易近人，是我的良师益友。在此向龚老师致以深深的谢意！

特别感谢通信技术室主任刘会杰研究员。刘老师作为室主任，工作非常繁忙，在工作之余，刘老师不忘关心我的学业，在生活和工作上提供了良好的科研条件和工作环境。刘老师为人谦逊、敬业务实，老师的言传身教，不仅使我学到了宝贵的专业知识，同时也学到了求实的工作态度和诚实的做人原则，在此向刘老师致以衷心的感谢！

感谢所研究生部余翔波老师，在工作和生活上不厌其烦的关心和帮助，在论文写作的每个阶段都给我提供了帮助和支持。

感谢漆庄平博士在繁忙的工作之余对我的论文写作工作提供的耐心的、无私的帮助，无数次的指导和帮助让我受益匪浅，也给我树立了完成论文研究工作的信心，非常感谢你！

感谢戴永珊同学对本论文认真细致的文字校对工作。

感谢办公室的贾铂奇、江玉洁、姜兴龙、陈晓挺、姜泉江、白雪柏、何涛、任前义、马陆、曾媛、沈洪兴、何晓苑、李欣禹、方睿、金凤、张亮、张磊等同学，大家互相关心、支持帮助，一起相处的日子里大家共同进步。

感谢我的父母、公婆和家人，你们的理解、支持和照顾，使我没有了后顾之忧，是我能够专注于研究工作、完成博士学业的坚强后盾和重要保证。

感谢我的丈夫，在无数个出差在外的日子，在无数个为了论文加班奋斗的晚上，在无数次退缩想要放弃的时候，是你的支持、鼓励和包容给了我战胜困难的决心和勇气，谢谢所有的日子有你陪伴。

我还想特别感谢我的儿子小豆豆，你是我的小天使，每当想起你，都让我多了一份坚定和坚持，我会继续勇敢前行。

再次感谢所有关心、支持和帮助过我的人们！

LEO&GEO 双层卫星网络的组网关键技术研究

姚晔(通信与信息系统)
指导老师: 梁旭文 研究员

摘要

在卫星通信领域,多层卫星网络通信系统的研究是近年来的热点和焦点。本文分析了多层卫星网络相对于低轨单层卫星网络的优势及其应用场景,提出了 LEO&GEO 组成的双层卫星网络作为研究对象,针对其组网特点提炼出了双层卫星网络的组网关键技术:组网架构设计技术、抗毁性技术、动态抗毁路由技术、分组交换调度技术,并进行了分析研究,给出了优化的解决方案,在 OPNET 及 STK 仿真平台上针对各项关键技术的优化方案进行了仿真分析和仿真验证。

研究的主要内容包括:

1. 研究了多层卫星网络组网架构设计中的星座结构优化设计与拓扑分析、星间链路设计与性能分析和通信协议设计三个方面。首先结合卫星网络中不同轨道高度上卫星的特点,对多层卫星网络的拓扑结构和单层卫星网络的拓扑结构进行分析比较,通过对 GEO 卫星低轨空域覆盖能力的分析,提出了优化的分层卫星网络的星座设计模型,该模型满足了系统的设计目标,并从通信时效性、抗毁性、经济性对星座构型进行了优化设计。然后对星间链路的几何特性和性能特性进行了仿真分析。最后,在通信协议设计方面,在深入分析 TCP/IP 协议和 SCPS 协议的基础上,设计了一种适用于本文的双层卫星网络的 TCP/IP 各层协议体制。

2. 对卫星网络的抗毁性技术进行了研究,从网络拓扑结构和业务通信两个方面对网络抗毁性提出了量化的指标体系。在拓扑结构方面针对现有的一些评估标准存在无法正确评价节点重要度以及不能满足不同节点数的网络间的抗毁性分析与比较等不足,提出了基于节点重要度的抗毁性评估方法,可以实现不同节点数的网络的抗毁性评估;在业务通信方面从网络是否具有恢复策略进行分析,提出了“最佳搜索”原则的抗毁性评估方法,建立了网络业务通信抗毁性测度模型,并得到了抗毁性指标的计算方法。采用本文提出的抗毁性指标评价体系对本文所提出的双层卫星网络进行了抗毁评估分析,并与单层 LEO 卫星网络和具有强连接的双层卫星网络进行了对比分

析，从而得出了有效且针对性强的抗毁策略和方法。

3. 对双层卫星网络的动态抗毁路由技术进行了研究，提出了一种新的基于分层分簇的自适应动态抗毁路由算法。算法采用基于不同种类业务的区分处理机制、路由中转层数选择机制以及基于状态更新的链路拥塞触发更新机制实现了对不同种类业务的动态自适应处理；并且采用链路冗余设计方案、簇头选择备份机制以及簇头兼容簇管理者功能的角色扩充机制实现了在卫星节点或链路失效时的抗毁性；通过仿真分析，证明算法在网络计算复杂度和存储复杂度有着良好性能，并通过丢包率、网络平均归一化链路负载和特定路径的综合路径权重，以及平均阻塞概率和特定路径的阻塞概率的仿真结果证明了本算法的有效性。

4. 基于 CICQ 交换结构提出了一种新的基于流量控制的 FCSA 算法，能够灵敏反映网络通道的状态进而达到对流量控制的目的，通过 OPNET 仿真分析表明该算法在突发业务源和非均匀流量模型下 FCSA 算法相比其他几种典型 CICQ 调度算法时延性能最优，接近于 OQ 算法，并且 FCSA 算法吞吐量可以接近 100%。针对星载交换机业务类型和链路特点，将此算法进行适应性修改提出了 DFCSA 算法，应用于星载交换机中进行星载区分建模，理论分析和仿真结果表明，该算法可以满足星载交换机多业务突发传输的特点，实现不同优先级业务的公平调度，同时易于硬件实现。

关键词：双层卫星网络，组网架构设计技术，抗毁性技术，动态路由技术，分组调度技术，OPNET 仿真

Research on Key Techniques of Networking for LEO&GEO Double-layered Satellite Network

Yao Ye (Communication and Information System)

Directed by: Prof. Liang Xuwen

Abstract

The research of multi-layered satellite communication system has been a very active field in recent years in the satellite communication field. This dissertation analyzed the advantage and application situations of multi-layered satellite network compared with LEO single-layered satellite network. Based on its networking feasibility, this paper mainly relates some key technologies of LEO&GEO double-layered satellite network, including network-architecture designing, destruction-resistant, dynamic routing and scheduling technology. And then some simulation results of the optimal solutions have gained using OPNET and STK simulating tools.

The main research topic of issue is:

1. Respecting the design of the multi-layered satellite network architecture, the paper studies the following three aspects: constellation structural optimization designing and topological analysis, inter-satellite link design and performance analysis, and communication protocol designing. Firstly, based on the constellation designing goals, a simplified hierarchical satellite network model is proposed which can optimize the cost effectiveness , destruction-resistant and communication timeliness after the topology structure and feasibility of multi-layered and single-layered satellite networks are analyzed and compared. Secondly, the paper simulates the geometric features and performance characteristics of inter-satellite links. Finally, on the design of communication protocol, a double satellite network TCP / IP protocol layers institutional is proposed by depth analysis of the TCP / IP protocol and SCPS protocol.

2. Some quantized indexes have been proposed at the satellite network topology and communication two aspects by studying the destruction-resistant of satellite network. On

satellite network topology, some of the existing assessment criteria can't evaluate the node importance degree properly , and can't meet the requirement in the analysis and comparison of destruction-resistant between networks of different nodes. So a new destruction-resistant assessment method based on node importance is proposed, which can assess all kind of networks which have different number of nodes. On the communications, the paper studys from recovery strategy analysis, and find a destruction-resistant assessment method based on the principle of "Best Search". Then the dissertation sets up a model to measure the destruction-resistant on networks service communications and find a way to calculate the destruction-resistant index. Using this method, the simplified hierarchical satellite network, single-layered satellite network and some other multi-layered satellite network destruction-resistant have been measured. So some targeted strategies have been implemented to the simplified hierarchical satellite network to improve its robustness and destruction-resistant.

3. For the related feature of "intermittent strong connection" network model, a dynamic layering and clustering adaptive survivable routing algorithm based on LEO&GEO double-layered satellite network is proposed. This algorithm is of high adaptability because it can distribute traffic more evenly and avoid congested links to ensure load balancing on the transmission. In addition, the algorithm also provides solutions to situations , such as the node breakdown or link breakdown ,to achieving the destruction-resistant. Simulation results show that the proposed routing algorithm results in low delay, small delay jitter and provides excellent performance for quality of service(QoS) requirement.

4. For the Combined Input and Cross-point-Queued(CICQ) switch fabric, a new FCSA algorithm based on traffic control is present. It can reflect the state of the network's channel sensitively to control the flow. The OPNET simulation analysis shows that FCSA has the best delay performance compared with the others, closing to the OQ algorithm, in the model of bursty traffic sources and non-uniform flow. In addition, its throughput can be close to 100%. In connection with the service type and link characteristics of spaceborne-switch, a improved DFCSA algorithm to modeling spaceborne-distinction is

present. By simulation, the results show that the proposed algorithm is suitable to apply to implement onboard satellite switch with different burst traffics, because of its low complexity and capability in hardware implementation.

Keywords: Double-layered satellite network, Network-architecture designing technology, Destruction-resistant, Dynamic routing protocol, Scheduling algorithm, OPNET Simulation

目 录

致 谢.....	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	IV
目 录.....	VII
第一章 绪论.....	1
1. 1 研究背景及意义.....	1
1. 1. 1 卫星移动通信系统概述.....	1
1. 1. 2 多层卫星网络研究现状.....	2
1. 1. 3 研究对象的提出.....	7
1. 2 多层卫星网络组网的关键技术.....	7
1. 2. 1 多层卫星网络组网架构设计.....	8
1. 2. 2 多层卫星网络抗毁性技术.....	9
1. 2. 3 多层卫星网络路由技术.....	10
1. 2. 4 多层卫星网络交换技术.....	10
1. 3 论文主要研究内容.....	10
1. 4 全文结构安排.....	11
第二章 LEO&GEO 双层卫星网络组网架构设计.....	13
2. 1 组网架构设计面临的问题.....	13
2. 2 组网架构设计分析.....	14
2. 3 优化的分层卫星网络星座结构设计.....	14
2. 3. 1 GEO 高轨卫星对低轨空域的覆盖.....	15
2. 3. 2 LEO 低轨卫星星座设计.....	17
2. 3. 3 星座模型的建立.....	21
2. 3. 4 多层卫星星座网络系统性能分析.....	23
2. 4 优化的分层卫星网络星间链路设计.....	27
2. 4. 1 星间链路几何特性分析.....	27
2. 4. 2 星间链路特性仿真分析.....	29
2. 5 优化的分层卫星网络通信协议设计.....	32
2. 6 本章小结.....	34
第三章 LEO&GEO 双层卫星网络的抗毁性技术.....	36
3. 1 引言.....	36
3. 2 抗毁性技术研究概况.....	36
3. 2. 1 抗毁性评估的研究现状.....	37
3. 2. 2 网络抗毁方法的研究现状.....	38
3. 3 卫星网络拓扑结构抗毁性评估标准.....	39
3. 3. 1 节点重要度测度方法.....	40
3. 3. 2 基于节点重要度的抗毁性测度方法.....	42

3.3.3 典型拓扑验证.....	43
3.4 网络业务通信抗毁性评估标准.....	45
3.4.1 无备份路径的网络抗毁性测度方法.....	45
3.4.2 具有备份路径的网络抗毁性测度方法.....	46
3.4.3 基于“最佳搜索”原则的备份路径建立机制.....	47
3.4.4 典型拓扑计算.....	49
3.5 LEO&GEO 双层卫星网络抗毁测度描述.....	50
3.5.1 拓扑结构抗毁性测度验证.....	50
3.5.2 网络业务通信抗毁性测度验证.....	55
3.5.3 提高抗毁性的方法.....	56
3.6 本章小结.....	57
第四章 LEO&GEO 双层卫星网络的动态路由技术.....	58
4.1 引言.....	58
4.2 卫星网络路由策略概述.....	58
4.2.1 路由策略的实现难点.....	58
4.2.2 路由策略的评价指标.....	59
4.2.3 单层卫星网络路由策略技术.....	60
4.2.4 多层卫星网络路由策略技术.....	65
4.3 基于负载均衡的双层卫星网络动态抗毁路由技术.....	69
4.3.1 相关定义.....	70
4.3.2 分层分簇的管理方法.....	72
4.3.3 路由算法的工作原理.....	74
4.3.4 原始路由表的计算.....	75
4.3.5 动态真实路由表的计算.....	82
4.4 算法分析和仿真评价.....	83
4.4.1 算法的创新性和算法的开销.....	83
4.4.2 仿真模型设计和仿真结果.....	84
4.5 本章小结.....	88
第五章 LEO&GEO 双层卫星网络的分组调度技术.....	90
5.1 引言.....	90
5.2 CICQ 交换结构分组调度算法研究现状.....	91
5.2.1 分组调度技术性能评价指标.....	91
5.2.2 基本的分组调度策略.....	92
5.3 基于流量控制的分组调度算法.....	96
5.3.1 CICQ 交换结构建模与定义.....	96
5.3.2 算法描述.....	97
5.3.3 算法仿真结果.....	100
5.3.4 算法小结.....	102
5.4 星载交换调度算法仿真.....	103
5.4.1 星载交换体制.....	103
5.4.2 卫星星载交换机模型.....	105
5.4.3 星载区分服务建模及仿真.....	105

5. 5 本章小结.....	111
第六章 全文总结.....	113
参考文献.....	116
作者攻读博士学位期间发表的论文.....	126
作者简历.....	127

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 卫星移动通信系统概述

由于具有通信距离远、费用与通信距离无关、覆盖面积大、不受地理条件限制、通信频带宽、传输容量大、适于多种业务传输、可进行多址通信、通信线路稳定可靠、通信质量高，以及既可为固定终端又可为车载、船载、机载和个人终端提供通信等一系列优点，卫星通信已经成为重要的现代通信手段之一，在全球通信中大展身手，特别是军事领域，卫星以独一无二的优势，得到世界各国的高度重视。

利用卫星进行通信的设想最早是 Arthur C. Clarke 在 1945 年 10 月提出的。他在《Wireless World》的论文中提出了利用卫星进行通信的科学设想。1957 年 10 月 4 日，前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星 Sputnik，让人们看到了真正实现卫星通信的希望。在 Clarke 提出卫星通信约 20 年之后，这一设想终于变成了现实；1962 年 7 月，美国成功地发射了第一颗通信卫星 TelSat，试验了横跨大西洋的电话和电视传输，揭开了卫星通信发展的序幕。1998 年底，Iridium 系统正式投入商业运营，开创了世界通信的新时代，第一次实现了真正意义上的全球个人通信。正因为如此，Iridium 系统才在 1998 年被美国《大众科学》评为最佳产品之一。数十年来，卫星通信已经进入军事侦察、通信广播、电视直播、导航定位、气象预报、资源检测、环境检测和灾害防护等国防和民用的各个领域，成为了现代社会中不可缺少的通信手段^{[1]-[4]}。

卫星网络系统是由不同层次、不同轨道上多种类型的卫星系统按照空间信息资源的最大有效综合利用原则，有机构成的智能化体系。卫星从轨道类型可以分为 3 种：低轨道（LEO）（距地面数百至 1500km，运行周期 2~4 小时）、中轨道（MEO）（距地面 5000~20000km，运行周期 4~12 小时）、同步静止轨道（GEO）（距地面 35800km，运行周期为一个恒星日，即 23 小时 56 分 04 秒）^[2]。

同步静止轨道（GEO）卫星系统位于地球上方 35000km 附近的地球同步轨道上，卫星绕地球公转与地球自转的方向和周期都相同。如果 GEO 卫星进行全球覆盖（除南北极地区）则只需相距 73000km 的 3 颗卫星，这比采用中、低轨卫星覆盖全球所需要的卫星数目少。尽管 GEO 卫星能以少量的卫星实现全球覆盖，而且星间切换次数少，但由于 GEO 卫星无法为高纬度地区，特别是两极地区提供服务，再加上其大的链路损耗和长的通信延时等不足，对用户终端的有效全向辐射功率（EIRP）和 G/T 的要求比较高，而利用非静止轨道（NGSO）卫星组成星座，不仅可以用于区域覆盖、间断覆盖，而且可以做到包括两极区域的真正意义上的全球连续覆盖。因此，研究重点转向了由 NGSO 卫星组成的低轨道卫星（LEO）和中轨道卫星（MEO）。

中、低轨道卫星属非同步卫星，作为陆地移动通信的补充和扩展，与地面公众网有机结合，实现全球个人移动通信。中轨卫星（MEO）、低轨卫星（LEO）系统相对同步静止轨道（GEO）卫星，至少有以下几个好处：（1）由于轨道高度较低，信号的传播路径就比较短，传播损耗和延迟就比较小，这样不仅能更好地传输实时性业务，而且能大大减小卫星和地球站天线的尺寸和发射功率，因此便于实现个人通信；（2）多颗中、低轨卫星组成的通信系统比对地静止轨道卫星通信系统能更好的进行频率复用，同时能缓解对地静止轨道上卫星过分拥挤的情况；（3）对于全球个人通信，用对地静止卫星实现高纬度地区的通信是比较困难的，而采用倾斜或极轨道卫星可以覆盖地球上的任何地方。

在卫星通信网络发展初期造价低、结构简单的单层卫星网络可以满足系统设计要求。但当卫星通信网络进入以业务多样化、骨干传输可靠化、覆盖全球化为特征的信息网时代后，由于受到单一轨道的限制，单层卫星网络就很难满足系统设计要求了。而不同轨道高度组合的多层次卫星星座网络则逐渐成为一种合理的拓扑结构形式，这也促使包含多层次卫星网络的空间信息系统成为一种新的研究方向和发展趋势。

多层次卫星网络是指在双层或多层轨道平面内同时布星，利用层间星间链路建立的立体交叉卫星网络。与单层卫星网络相比，多层次卫星网络具有空间频谱利用率高、组网灵活、抗毁性强等优点，能够实现各种轨道高度卫星星座的优势互补，将成为未来卫星网络发展的一种理想组网模式。

1.1.2 多层卫星网络研究现状

早在上世纪 90 年代末期，包含星间链路（ISL: Inter-Satellite-Link）的不同轨道卫星之间的通信研究提上日程，也提出一些混合型卫星网络的设想和计划。波音公司提出的 SpaceWay 系统，计划用 16 颗 GEO 卫星和 20 颗 MEO 卫星组成网络；Motorola 的 Celestri 低轨系统计划引入 MEO 卫星，13 颗 LEO 和 6 颗 MEO 卫星共同组成了 Rostelesat 星座；另外 GESN、GNSS/Galileo 和 West 系统均由数目不同的 MEO 和 GEO 卫星构成。很多学者和国际上的研究机构也对多层次卫星网络进行了研究，主要包括：卫星组网、路由技术、交换技术、网络管理技术等内容。

K. Kimura 等最早提出构建双层卫星网络（Double Layered Satellite Constellation, DLSC）的设想^[5]，DLSC 由双层的低轨道卫星/中轨道卫星（low earth orbit/medium earth orbit, LEO/MEO）共同组建，如图 1-1 所示。在此组网结构中，MEO 卫星间具有星间链路（inter-satellite-link, ISL），LEO 卫星间没有 ISL 相连，MEO 卫星可以通过层间星间链路和在自己“视距”内的所有 LEO 卫星相连。Kimura 通过对双层星座空间几何覆盖性能的分析，指出 DLSC 结构能提供比 LEO 网络系统更好的覆盖特性，包括更高覆盖重数、更好仰角和更加灵活的星座类型选择性。在 DLSC 系统中，LEO 层卫星负责与地面的小型终端通信，以减少链路损失；而与关口站和大

型终端通信则由 MEO 层卫星完成，这样可以降低卫星跟踪的复杂度。但是在文章中没有分析 MEO 层卫星的 ISL，而且由于强调了 MEO 层的中继作用，影响了整个系统的抗毁性。

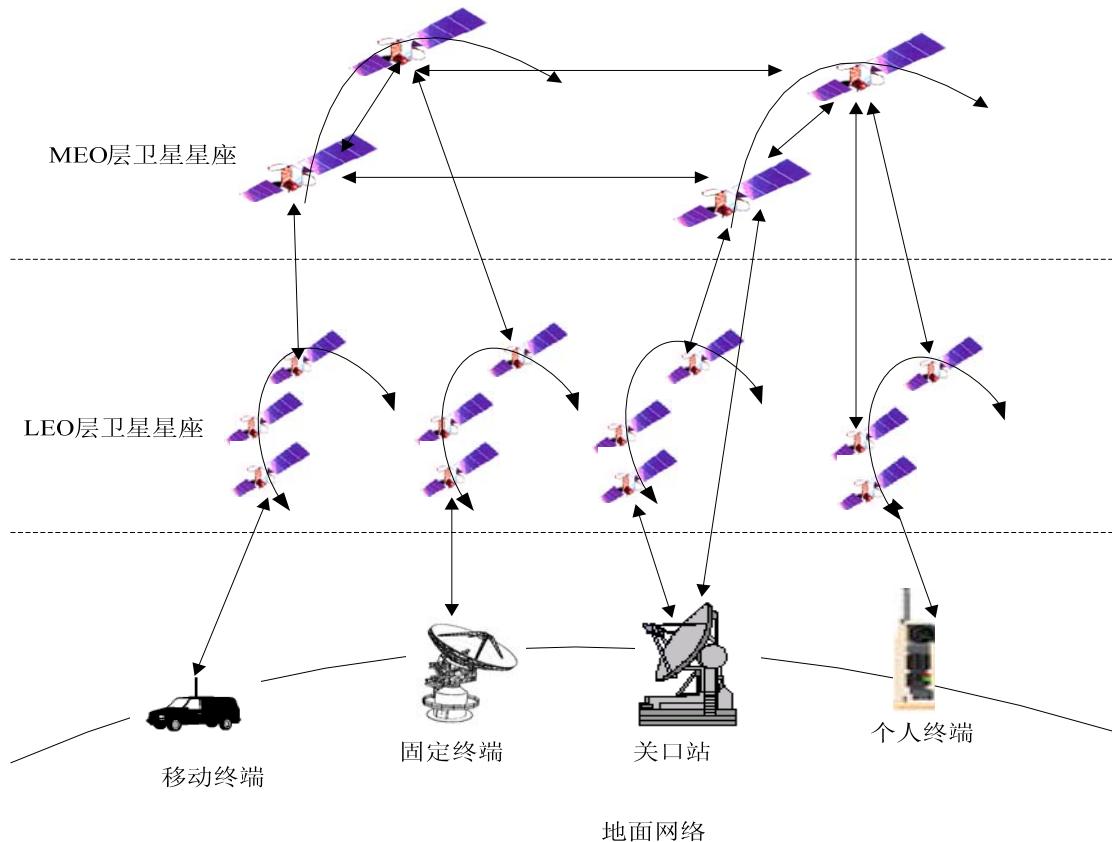


图 1-1 DLSC 双层卫星网络结构示意图

Jaeook 提出了可以灵活配置网络拓扑结构的多层星座网络 (Satellite over Satellite, SoS) 结构^[6]，如图 1-2 所示。SoS 网络由一个基本的 LEO 星座作为基础，可以基于对网络性能和服务业务的需求，灵活的调整其所包含的轨道层数和轨道高度。在 SoS 网络中，低层 LEO 卫星通过 ISL 与相邻的 LEO 卫星建立链路，同时与上层卫星通过层间链路进行通信，并且具有上下行链路 (Up and Down Link, UDL) 与用户通信，而上层星座中的卫星除了具有 ISL 和 IOL 之外，根据需要也可以维持 UDL。对于短距离业务 (Short Distance Dependent, SDD)，由 LEO 卫星通过 LEO 层的 ISL 进行传输；而对于长距离业务 (Long Distance Dependent, LDD)，则由 LEO 卫星经过 ISL 由 MEO 卫星或 GEO 卫星进行中继。在文章中没有对 SoS 系统的覆盖特性进行分析，也没有对星间链路进行具体的描述。

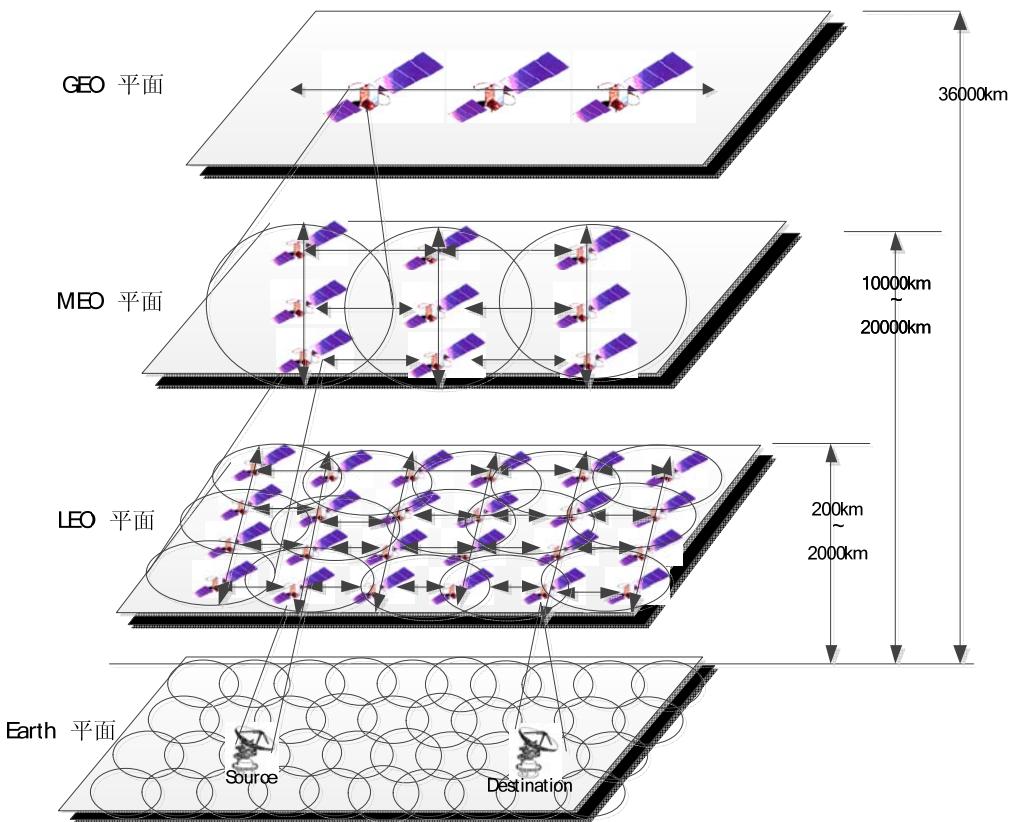


图 1-2 SoS 卫星网络结构示意图

胡剑浩提出的具有星间链路的 LEO&MEO 双层卫星通信系统的网络模型与 Kimura 相似，但 MEO 层中卫星数量增加到 16 颗，并要求 MEO 卫星与在其“视野”范围内每颗 LEO 卫星均建立 ISL 连接，即通过在 MEO 层与层网络间建立“强联接”来提高多层卫星网络稳定性^[7]。增加不同星座层间的 ISL 数目虽然可以解决 DLSC 结构稳定性问题，但对卫星实现提出过高要求，导致系统实现难度增加。由于任意一颗 MEO 卫星均可同时与多颗 LEO 卫星“视距”可见，而且其数目随星座运行不断变化，因此要求在每对存在“视距可见性关系”的 MEO 卫星和 LEO 卫星间都建立 ISL，必然要求 MEO 卫星具有多个 ISL 收发设备，直接导致 MEO 卫星实现难度加大和有效载荷的增加。

Ian 提出比 DLSC 更复杂的多层次星座结构^[8]。MLSN 网络由 GEO 卫星、MEO 星座和 LEO 星座构成，其中 GEO 卫星成为路由算法决策中枢，MEO 星座完成对地球表面完全覆盖，GEO 卫星和 MEO 卫星组成多层次星座结构的骨干网，而 LEO 卫星主要实现对地移动终端的接入，如图 1-3 所示。在 MLSN 结构中，其中同层卫星之间和不同层卫星之间均具有星间链路，系统实现的高复杂性同样成为 MLSN 结构的缺点。为维持 LEO 卫星与 MEO 卫星、GEO 卫星和其它 LEO 卫星间的 ISL 连接，LEO 卫星必须拥有大量 ISL 收发设备，造成 LEO 卫星实现难度增加。MLSN 网络中的各层卫星间都存在“冗余连接”关系，网络拓扑结构的完备性和高抗毁性造成系统的复杂性比较高，使卫星实现难度增加。

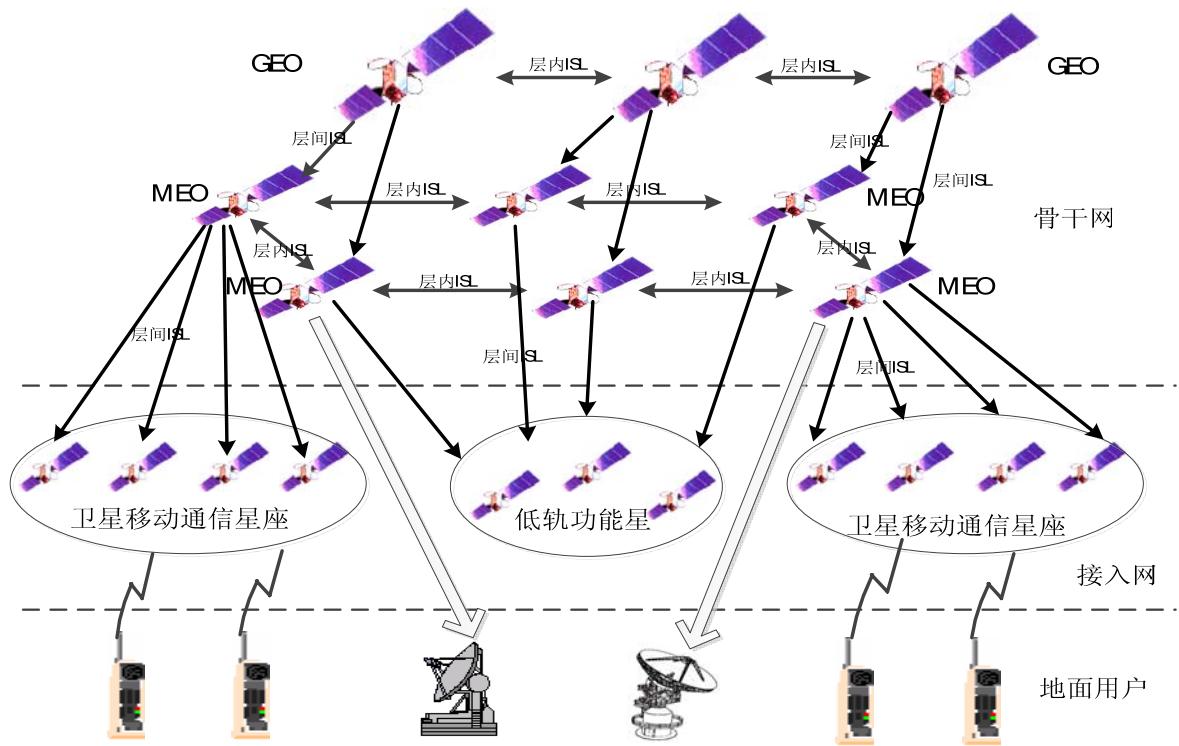


图 1-3 基于“骨干/接入”模型的多层次卫星网络 MLSN 网络示意图

由 Durga Shankar Dasha 研究的多层次卫星网络中，由 GEO、LEO 和高空平台 HAP (High Altitude Platform) 构成空间网络^{[9][10]}，GEO 和 LEO 提供全球覆盖的通信服务，在热点地区（如战场或灾难救援现场），HAP 盘旋在高度为 20–30km 的空中，为地面的移动手持终端提供高速的通信服务，并能够通过激光 ISL 与上层的卫星网络组成高速网络，如图 1-4 所示。在这种网络结构中，HAP 作为用户的接入节点，LEO 卫星作为第二层的路由器，GEO 卫星可以被看作骨干路由器。

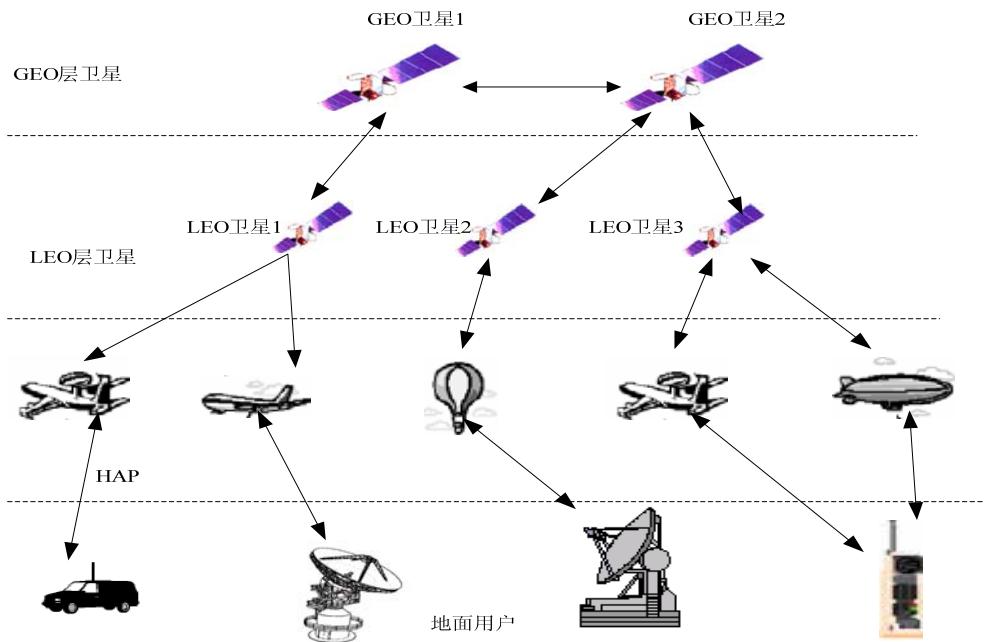


图 1-4 GEO/LEO/HAP 卫星网络结构示意图

表 1-1 总结了多层卫星网络的结构参量。

表 1-1 多层卫星网络结构参量

多层次卫星 网络模型	两层卫星网络			三层卫星网络	
	LEO+MEO	LEO+MEO	MEO+GEO	LEO+GEO+HAP	LEO+MEO+GEO
设计者(国家)	胡剑浩 (中国)	Kimura (日本)	波音公司 (美国)	Durga Shankar Dasha	Ian (美国)
卫星数目 (颗)	LEO:63 MEO:16	LEO:594/588 MEO:16/12	MEO:20 GEO:3	LEO:66 GEO:3 HAP:多个	LEO:72 MEO:18 GEO:3
星间链路 (条/颗)	LEO→MEO 2 MEO→MEO 4	LEO→LEO 2 (轨道内) LEO→MEO 1 MEO→MEO 4	MEO→MEO 4 MEO→GEO 1	LEO→LEO 4 LEO→GEO 1 HAP→LEO 1	LEO→MEO 1 LEO→GEO 多条 MEO→MEO 多条 MEO→GEO 多条 GEO→GEO 2
星座及轨道类型	LEO 和 MEO 均 为 Walker delta 星座	LEO 和 MEO 为极 轨道或倾斜轨 道	MEO:极轨道 GEO:同步轨道	LEO:极轨道或 倾斜轨道 GEO:同步轨道	LEO:极轨道 MEO:极轨道 GEO:同步轨道
轨道高度	LEO:1400	LEO: 760	MEO:10353	LEO:500~1000	LEO: 1375

(km)	MEO:10353	MEO:10353	GEO: 35786	GEO:35786 HAP:30	MEO:8000/120 00 GEO:35786
轨道倾角	LEO:48° MEO:45°	LEO:88. 5° /90° MEO:41. 3° /90°	ME0:48° GEO:0°	LEO:45° /90° MEO:0°	LEO:90° MEO:90° GEO:0°
轨道数目 (颗)	LEO:7 MEO:4	LEO:13/22/27 MEO:2/3/4	ME0: 5 GEO: 3	LEO:6 GEO:1	LEO:12 MEO:6 GEO:1
覆盖范围	南北纬 60° 之间	全球覆盖	全球覆盖	全球覆盖	全球覆盖

总体来说，多层卫星网络由包括数据交换的骨干网和各种接入网组成。由上述文献分析可以看到，由于 GEO 和 MEO 卫星的轨道高，其传输时延和链路损耗都比较大，因此在多层卫星网络中通常都是作为空间信息交换的骨干网，并且负责与关口站和大型终端通信；而 LEO 卫星和 HAP 则可以为地面的移动小终端用户提供更好的服务，因此在上述的多层卫星网络中，LEO 和 HAP 是作为地面用户的接入节点，并能够通过 ISL 与骨干网进行数据交换。

1. 1. 3 研究对象的提出

从当前卫星移动通信系统的研究现状可以看出，未来卫星通信发展需要对热点地区获取不间断的全方位多频段信息，用户可能在同一时间内需要导航、预警、监控等多种信息，这就要求有不同轨道上多种类型的卫星系统按照空间信息资源的最大有效综合利用原则，互通互连，有机构成智能化体系。为此卫星通信系统必然向网络模式发展，即多种卫星及星座系统互连，构成天基综合信息网，来完成数据获取及传输的任务，保证用户近乎实时的得到多种类型的信息，因此多层卫星网络正在成为各国的研究目标，也成为当前各国卫星通信发展的趋势。

从我国目前的卫星通信系统的研究现状可以看出，至今我国尚无自建的国内综合的卫星移动通信系统，根据我国现在的需求情况，我国也急需建立我国自主控制的卫星移动通信系统，建立何种星座的结构以及何种轨道类型主要取决于应用环境（如是否需要支持手持机、以固定业务为主还是以移动业务为主、以宽带业务为主还是以窄带业务为主、业务对实时性的要求、服务区域的地理纬度等）、技术成熟程度、资金情况等。

在建立我国自主控制的卫星移动通信系统时，需考虑的主要因素有卫星通信能力、覆盖要求、空间环境、卫星发射、卫星寿命、卫星成本等因素。根据系统用户需求分析，以及当前我国卫星研究的现状，星座设计应达到以下几个目标：

- (1) 以区域覆盖为主、兼顾全球，对重点区域达到多重覆盖；
- (2) 能为实时、可靠的通信提供保证，要求通信终端可手持；
- (3) 卫星研制和发射费用合理；
- (4) 卫星覆盖具有冗余性和一定的抗毁能力；
- (5) 能够支持语音通信和大容量的数据通信能力以及可以满足未来发展趋势的多媒体信息传输的能力。

充分利用多层卫星网络的特点和优势，同时又能简化卫星网络拓扑的设计，建成一个适合我国现在国情的多层卫星卫星网络是我们的当务之急。

1.2 多层卫星网络组网的关键技术

多层卫星网络在设计时，需要根据 GEO、MEO、LEO 卫星的特点，将其按照功能进行划分，具有网络大尺度、拓扑动态、节点间关系复杂以及网络业务种类繁多等特点；并且还要考虑用户的需求如卫星通信能力、覆盖要求、空间环境、卫星发射、卫星寿命、卫星成本等各种因素，这些特点使得多层卫星网络的组网技术不同于地面网络，需要针对卫星星座特点以及应用需求，开展面向多层卫星网络的组网关键技术研究。

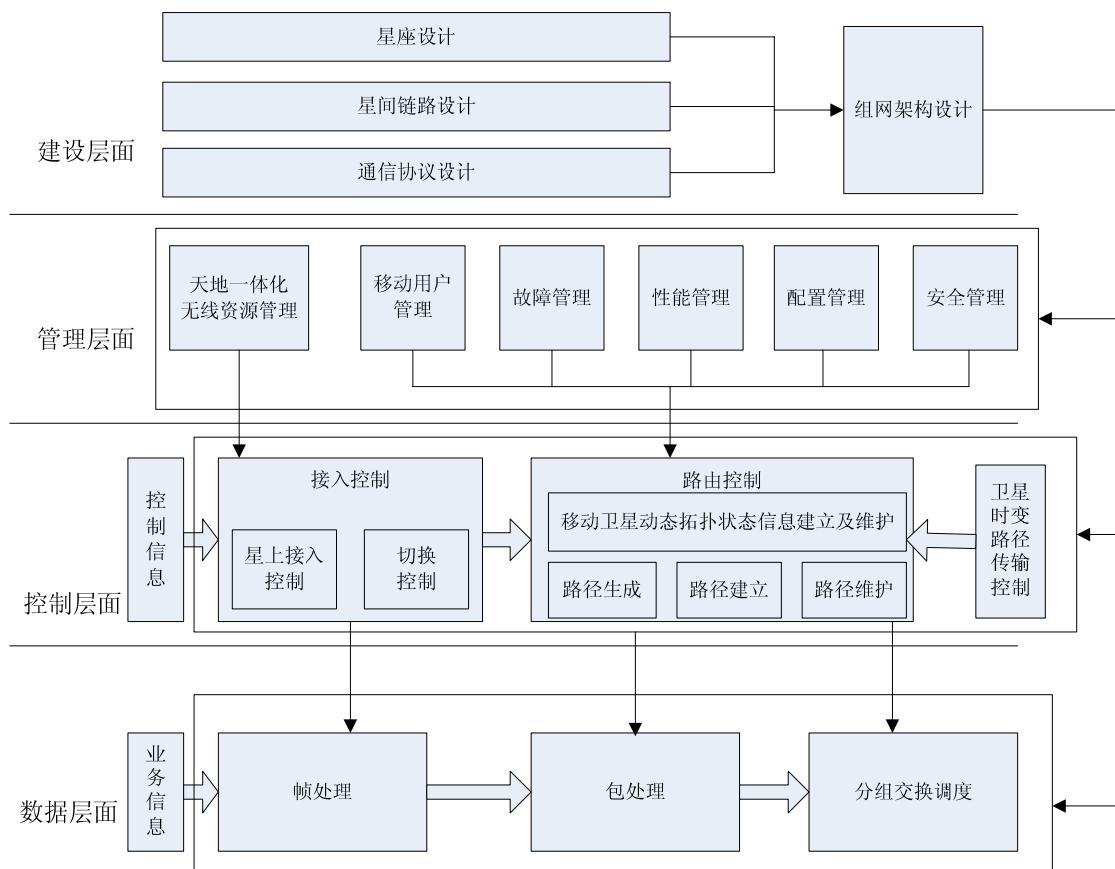


图 1-5 多层卫星网络关键技术分解图

多层卫星网络组网技术包括建设层面、管理层面、控制层面和数据层面，其中建设层面即组网架构设计技术，主要包括网络的星座设计、拓扑设计、星间链路设计以

及通信协议设计；管理层面即网络管理控制技术，主要包括无线资源管理、用户管理以及故障管理（包括抗毁性技术）等功能，可以保障卫星网络资源的高效利用，并保证网络在正常、故障等各种状况下有效的运行，为网络的高效、可靠的运行提供有效的支持；控制层面由网络中各种信令协议组成，为卫星网络提供接入控制、路由控制以及传输控制等功能，以保证网络中各种业务信息有效的传输；数据层面主要实现网络内业务数据的处理，包括帧处理、包处理以及数据分组交换调度等功能。其主要关键特性及关键技术分解图如图 1-5 所示。

卫星组网关键技术几部分内容是相辅相成、承上启下、有机结合的，因此围绕上述多层卫星网络组网技术四个层面的技术问题，本文重点研究了组网架构设计、抗毁性技术、路由技术以及分组交换调度技术，下面对这几部分关键技术内容进行分别论述。

1.2.1 多层卫星网络组网架构设计

组网架构设计是系统建设的顶层问题，是实现网络中业务通信和各种网络功能的基础。组网架构设计的研究目标是设计合理有效的卫星星座组网体系结构设计，构建系统整体结构和组成框架，包括星座设计、拓扑设计、网络协议框架、主要网络元素的功能以及性能需求等。

通过上文的分析可以看出，多层卫星网络的组网类型有多种构成方法，按照网络的层次划分，可以分为两层网络结构和三层网络结构，两层网络结构包括：LEO+GEO、LEO+MEO、MEO+GEO，三层网络结构有：LEO+GEO+HAP、LEO+MEO+GEO。根据卫星应用系统对星座覆盖性能的要求的不同，层次内的星座设计方法主要有：星形星座、极轨道星座（或优化极轨道星座）、8 星座（或 Walker 星座）、玫瑰星座（或 Rosette 星座）等。另外根据卫星应用系统对业务通信的要求，如仅支持语音业务、仅支持数据业务或者需要支持宽带的多媒体业务等，在构建网络时也需要作为一个重要的考虑因素，另外拓扑对于抗毁性以及鲁棒性的要求也决定了网络体系结构的设计。

总之，不同的星座设计方法具有不同的优点和特点，也适应于不同的应用需求，在后面章节中通过分析不同组网结构的优点和特点，构建满足需求的网络结构模型。

多层卫星网络包含三种 ISL，分别是：轨道内链路、轨道间链路和层间链路。对于星间链路特性的分析，通常用星间链路的俯仰角、方位角以及星间链路长度来表征。俯仰角和方位角的变化情况反映了卫星之间卫星相对关系的变化情况，表明在卫星间实现星际通信的难易程度。星间链路长度反映了卫星之间长度的变化情况，通常作为星间路由选路的依据之一，因为星间长度直接决定了星间传输时延的变化。通过预先计算出邻近卫星的空间几何特性，可以加快卫星之间的瞄准捕获和跟踪，事先优化建立星间通信系统。因此需要对卫星网络中的星间链路几何特性进行分析，并对其性能进行仿真分析。

在多层卫星网络中传输距离较远、信道误码高以及多径效应、多普勒偏移等，并伴随着规律的卫星移动等特点导致地面的通信体制、协议不适用于卫星，需要对地面应用的通信协议体制修改以适用于卫星。

1.2.2 多层卫星网络抗毁性技术

卫星通信网络系统是一个复杂、庞大的系统工程，为了保证其达到覆盖性、通信性能、设计成本等各方面的要求，对系统拓扑结构设计以及路由调度算法等提出了一定的要求。同时，由于卫星通信中信道带宽受限、链路通信易受敌方干扰等各种因素影响，为了使其能够更加高效的运行，有必要引入抗毁性来保证系统的正常运行。

卫星系统的抗毁性用于描述网络能够避免网络故障的发生或有时间采取必要的措施来阻止网络故障的发生，即使节点或链路发生故障时网络仍能采取相应的策略，最大程度的为用户提供通信能力。

由于卫星网络结构复杂，因此对网络的各方面性能进行准确的衡量和评估是非常复杂和困难的。对卫星系统的抗毁性进行研究的主要内容包括：网络拓扑结构设计的抗毁性测度评价、网络业务通信的抗毁性测度评价。

1.2.3 多层卫星网络路由技术

路由是任何一个通信网络要解决的核心问题。由于卫星网络拓扑的动态变化，因此应用于拓扑较为稳定的固定网络中的传统路由协议不能直接应用到卫星网络中。然而，卫星网络也与节点完全随机运动的地面移动自组网不同，卫星总是沿着固定的轨道运行，因此卫星网络的拓扑变化又是周期性和可预测性的，另外卫星网络中的节点个数在一段时间内也是相对稳定的。因此可以考虑利用这两个特点简化卫星网络路由协议的设计。

在双层卫星网络 SoS^[6] 和 TLSR^[7] 模型中，它们分别采用基于 ATM 的分组交换方式和分层路由协议 HQRP 实现数据传输，然而这两种算法都属于面向连接的路由机制，在通信建立前先建立一条虚路径，在通信结束时拆除，路径的建立需要大量的信令信息的支持、网络拓扑的动态变化导致算法频繁进行切换处理，从而导致网络的路由信息更新频繁，使卫星网络稳定性较差。

基于此，基于 IP 路由的包交换路由策略^[11~16]逐渐应用到卫星网络中。如何适应卫星网络拓扑的变化，并能适应网络中业务量及负载的变化进行动态的选路是本文研究的重点，同时需要考虑在卫星网络中如果节点或链路故障情况下的抗毁路由。

1.2.4 多层卫星网络交换技术

对于卫星网络研究来说，另外一个关键技术是星载网络设备设计。其研究目标是针对空间环境的特点（电磁辐射强、干扰大），研制功耗低、重量轻、抗辐射性能好、可靠性高的星载网络设备。而其中的分组交换技术—分组调度策略对于卫星组网的性

能至关重要。

对于空间交换网络，由于每颗卫星和每条星际链路的业务量大且动态范围也很大，并具有时变的网络拓扑结构，为了有效地利用带宽资源，提供高的传输速率，保证星载交换机端到端的延时，达到用户的 QoS 要求，需设计合适的星上交换结构，以及高效的调度算法。如何设计一个高效实用的满足用户 QoS 要求的分组调度算法是本文研究的重点。

1.3 论文主要研究内容

1. 根据我国的现实情况以及多层星座模型设计的要求，与已有的典型多层卫星网络星座进行比较和分析，提出了优化的分层卫星网络星座设计的模型 OHSN，并对其系统性能进行了分析。优化的分层卫星网络能在基本不损失系统性能的前提下，以更少的成本和设计难度满足系统的设计要求，达到组网灵活、简化设计的目的。

2. 从网络拓扑结构和业务通信两个方面对网络抗毁性提出了量化的指标。在网络拓扑结构抗毁性评估方面首先提出了基于节点度和节点凝聚度的节点重要度评价方法，然后由此提出一种基于节点重要度的抗毁性评价方法，可以实现不同节点数的网络的抗毁性评估。在通信方面从网络是否具有恢复策略进行分析，给出抗毁性评估方法。应用所提出的抗毁评估方法对本文所提出的简化的分层卫星网络进行了抗毁分析，并与单层 LEO 卫星网络和具有强连接的双层卫星网络进行了对比分析，从理论上分析了不同卫星网络拓扑结构的抗毁性，以便提出有针对性的抗毁策略和网络优化的方法。

3. 在优化的分层卫星网络（OHSN）的模型下，综合考虑了链路时延和 ISL、IOL 链路负载，提出了一种能够负载均衡的自适应的动态路由算法，能够均衡整个网络的负载，更加均匀地分配网络流量，具有较小的丢包率，端到端链路时延、网络归一化链路负载。并且算法能够避开拥塞的链路，并考虑一定的抗毁性。

4. 在卫星星上资源受限的条件下，选取 CICQ 交换结构作为星载交换结构，提出基于流量控制的 FCSA 算法，通过 OPNET 仿真分析表明该算法在均匀分布和突发业务源的情况下具有良好的时延性能和公平特性，并且复杂度低，吞吐量大。将此算法应用于星载交换机中进行星载区分建模，结果表明，该算法可以满足星载交换机多业务突发传输的特点，实现不同优先级业务的公平调度，易于硬件实施。

1.4 全文结构安排

本论文采用 GEO 和十一五背景预研提出的 24 星低轨方案组成的 LEO&GEO 双层卫星网络为研究对象，对其中所涉及的关键技术进行了研究。主要思路是解决系统设计中所涉及到的关键技术问题，同时要兼顾卫星网络资源受限的特点，满足语业务性能要求，使算法具备可实现性。

第一章主要是对研究的背景和意义进行了介绍，分析了多层卫星网络的研究现状，引出本文所要研究的问题。并对多层卫星网络组网的关键技术进行了概括性总述，后续的研究在此基础上开展。

第二章主要讨论双层卫星网络的组网架构设计。首先介绍了星座设计的概念和星座的类型，分析了不同参数星座类型的优缺点。然后根据星座模型设计的要求，与已有的典型多层卫星网络星座进行比较和分析，提出了优化的分层卫星网络星座设计的模型，然后对此网络模型的网络拓扑特性和星间链路特性进行了仿真分析，并设计了一种适用于本文的双层卫星网络的 TCP/IP 各层协议体制。

第三章首先描述了网络抗毁性技术的概念及研究意义，从网络拓扑结构和通信业务两个方面提出了量化的抗毁性评价指标体系；针对本文的双层卫星网络和单层卫星网络以及具有强连接的多层卫星网络的抗毁性进行了定量的抗毁性评价，根据评价结果提出了针对本文网络结构的抗毁性策略。

第四章首先分别对单层卫星网络和多层卫星网络路由技术进行了概述，对不同的路由技术按照不同的分类方法进行了归类划分，基于本文的“间断性强连接”模型，在已有的 CDSNR 算法基础上提出了一种分群分簇的基于负载均衡的双层卫星网络动态路由算法，并对其中采取的抗毁策略进行了详述，最后对其性能进行了仿真验证。

第五章首先分析了星载交换机的结构，基于 CICQ 交换结构提出了基于流量控制的调度算法—FCSA 算法，并在均匀流量和非均匀流量模型下与已有的算法进行了仿真比较。进而对此算法进行改进将其应用于星载交换中，针对星载交换业务类型和 QoS 要求提出了可以对不同优先级业务进行区分处理的 DFCSA 算法，在 OPNET 中建立调度算法模型验证了算法性能，并理论分析了其公平性能。

第六章总结了全文并展望了未来的研究方向。

第二章 LEO&GEO 双层卫星网络组网架构设计

2.1 组网架构设计面临的问题

在卫星网络中，组网架构设计是至关重要的内容，直接影响到系统性能的多个方面，如系统网络组成、链路传播特性、系统投资、业务类型、覆盖范围等。针对不同的覆盖要求、时延要求、系统成本要求、抗毁性要求、卫星网络管理要求，存在着不同的星座设计思想。综合分析不同设计思想的最优化设计方法的设计结果，才能够得出满足要求的最为优化的卫星星座。

从本质上讲，卫星星座优化设计的目的是在许多相互联系的参数的大量可能的组合中找出能最好满足任务要求的那组参数组合。具体来说，组网架构设计主要需考虑如下问题：

(1) 需要考虑卫星网络系统需求

一般，至少需要考虑以下几方面的系统性能需求：

- ✓ 覆盖特性

覆盖特性反映了基于该星座的卫星通信系统通信服务可达的范围，直接决定了该系统可以支持的应用范围大小。

- ✓ 系统整体的传输时延

时延是评价通信业务性能的重要指标，通信业务的时延由多个部分组成，不同网络影响业务时延大小的因素也不相同。卫星星座构型是决定该卫星通信网络的传输时延性能的主要因素之一。例如 GEO 卫星距离地面距离很远，星地传输时延接近 150ms，系统难以支持实时性高的业务；相反地，以低轨道卫星为核心的低轨星座系统，其整体传输时延性能要远好于同步卫星系统。

- ✓ 对用户终端的支持能力

对多种终端支持能力也是星座设计需要考虑的，这方面，主要考虑如下两个因素：卫星节点到地面终端距离和终端的移动性。

除了上面的几种考虑因素，还需要考虑系统成本要求、抗毁性要求、卫星网络管理要求等因素。

(2) 需考虑星间链路性能

星间链路是卫星组网架构设计中的重要组成部分之一，在两颗不断运行的卫星节点间建立星间链路，卫星节点之间的相互关系必然会影响星间链路的性能，因此，在设计星座时，需要考虑所设计的星座是否有利于星间链路的建立。星间链路构建时主要考虑星间链路的方位角、俯仰角以及星间距离的变化情况。

(3) 需考虑卫星节点处理能力限制

由于卫星技术以及能量等因素，卫星平台往往在处理能力、储存能力等方面远远低于地面设备，因此，在进行星座设计时，还需要考虑卫星节点处理能力的限制，注重多星协同、星地协同，以提高系统的整体性能。

2.2 组网架构设计分析

在本文中，参考国内外研究成果，结合国内技术水平和发展现状，对卫星组网架构设计遵循以下目标和思路：

- (1) 覆盖范围：以区域覆盖为主、兼顾全球，对重点区域达到多重覆盖，可以提供最小仰角为 5° 的中低纬度带的实时连续覆盖（除南北极外）；
- (2) 业务特性：能为实时、可靠的通信提供保证，要求通信终端可手持，功能多样化，支持语音业务和数据业务，以数据业务为主，满足未来发展趋势的多媒体通信；
- (3) 系统网络组成：组网灵活、网络设计简单有效；
- (4) 抗毁性：星座设计具有较好的抗毁性能和鲁棒性能；
- (5) 考虑系统设计的成本以及设计难度，根据成本经济性原则，在我国现有的技术条件下技术可实现，难度较低，并且满足未来空天地一体化的发展趋势。

根据上文提出的设计要求，卫星星座的设计并不是唯一的，其构建方法有多种途径：采用多层卫星网络来实现或者采用由 LEO 卫星构成的单层卫星星座。

- (1) 由 X 颗低轨卫星构成一个星座，以实现“准实时”的全球通信；
- (2) 采用多层卫星网络的组网模式。

随着卫星网逐渐向业务多样化（包括语音、数据等媒体业务）、骨干传输可靠化的方向发展，这不仅要求卫星网能提供高质量的单用户和地面网络的无缝接入及一定程度的 QoS 保证，又要求其能够提供可靠的骨干传输能力，这样仅采用由 LEO 小卫星组建的卫星网络已不能同时满足上述多种需求。

因此，结合我国现有的技术现状以及卫星的设计难度、发展趋势等各种因素，本文考虑采用构建由不同轨道高度的卫星组成的多层卫星网络作为研究对象，构建一个优化的多层卫星网络组网体系结构，作为我国卫星系统发展过程中的一个初级目标，为构建未来的天基综合信息网打下基础。

2.3 优化的分层卫星网络星座结构设计

多层卫星网络的组网类型有多种构成方法，按照网络的层次划分，可以分为两层网络结构和三层网络结构，两层网络结构包括：LEO+GEO、LEO+MEO、MEO+GEO，三层网络结构有：LEO+GEO+HAP、LEO+MEO+GEO。前者以 Kimura 的 DLSC 模型为代表，后者以 Ian 的 MLSN 和 Jaeook 的 SoS 模型为代表。上述模型出于对网络稳

定性考虑，都要求多层星座网络的各层卫星间存在“冗余连接”关系，即 LEO 卫星、MEO 卫星和 GEO 卫星间都必须通过 ISL 连接。多层次卫星网络“强连接”关系直接导致系统网络复杂性过高。LEO 卫星为了维持与 MEO 卫星以及 GEO 卫星之间的连接关系，每颗 LEO 卫星必须拥有大量 ISL 收发设备，造成 LEO 卫星实现难度增加。其次，冗余连接关系使得节点间存在多条“冗余”路径选择，导致节点路由汇聚任务很繁重，网络拓扑结构的每一次微小变化都将引起网络路由表的大规模更新。

本文根据所提出的设计要求简化卫星网络星座结构的设计，构成优化的分层卫星网络（OHSN, Optimized Hierarchical Satellite Networks）。

在优化的分层卫星网络中，由 LEO 卫星和 GEO 卫星组成。GEO 卫星通过 ISL 连接，构分成层卫星网络的骨干网，作为分层卫星网络的交换节点，负责空间数据的传输和转发，为所连接的 LEO 卫星提供信息交换服务，同时，作为地面网络的补充，为地面大型终端的固定用户提供服务。LEO 星座作为优化的分层卫星网络的接入网络，通过 ISL 与骨干网相连，LEO 卫星成为具有交换功能的用户接入点，为地面小型终端的移动用户提供服务，并为其覆盖区内用户进行信息交换。下面通过分析设计相应的 GEO 卫星和下层的 LEO 的星座。

2.3.1 GEO 高轨卫星对低轨空域的覆盖

GEO 星座设计的目的是根据系统对 GEO 卫星覆盖区域的要求，确定 GEO 卫星在赤道上空的经度位置。GEO 卫星经度位置的确定既要考虑对地面区域的覆盖也要考虑对低空空域的覆盖。

静止卫星可覆盖低空空域的两个弧段(区域)Arc1 和 Arc2 如图 2-1 所示。

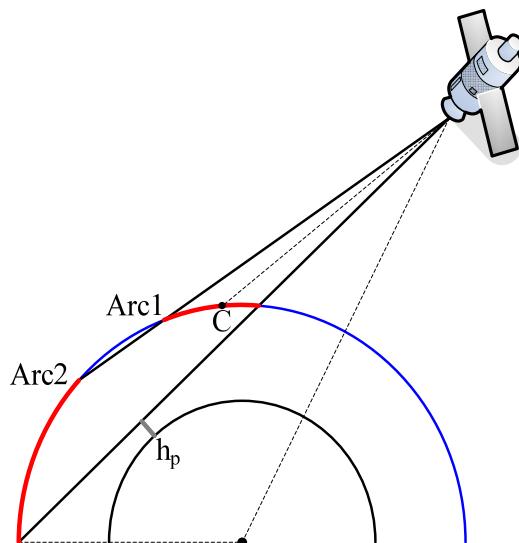


图 2-1 静止星对低轨空域的覆盖示意图

理论分析可知，一颗静止星可零仰角覆盖地面的 45%，而对高度为 500、1000 和 1450km 空域的覆盖率分别为 57%、62% 和 65%。

理论上，两颗 GEO 卫星就可以实现对全球一定高度低空空域的连续覆盖^[17]。图 2-2 所示为两颗 GEO 卫星对低空空域覆盖时的几何关系示意图。

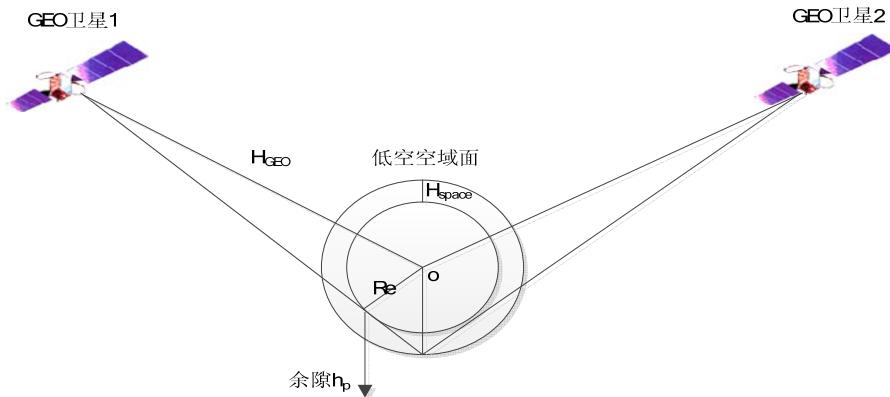


图 2-2 两颗 GEO 卫星对低空空域覆盖时的几何关系示意图

图 2-2 中, $H_{GEO}=35786\text{km}$, 为静止轨道卫星高度; H_{space} 为低空空域面的高度; 余隙 h_p 为低空空域面上的点与卫星间的星间链路连线与地面的最小距离。考虑到地球并非理想的球体以及低空的复杂电磁环境, 视距通信链路对地留有一定的保护距离是适当的。

根据图 2-2 所示的空间几何关系, 可以得到覆盖全球低轨空域的两颗静止卫星的经度差 (即地心角差) α 与低空空域高度 H_{space} 和余隙 h_p 之间的关系式:

$$\alpha = 360^\circ - 2 \cdot [\arccos\left(\frac{R_e + h_p}{R_e + H_{GEO}}\right) + \arccos\left(\frac{R_e + h_p}{R_e + H_{space}}\right)] \quad (\text{式 2- 1})$$

在余隙 $h_p=20\text{km}$ 的情况下, 地心角 α 随低空空域高度 H_{space} 的变化如图 2-3 所示。

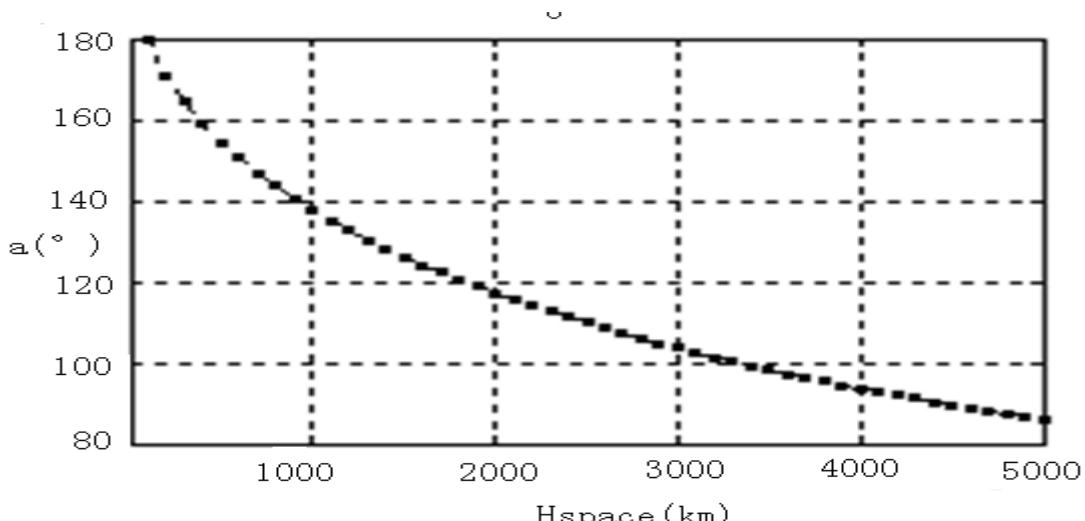


图 2-3 两颗 GEO 卫星间经度差随覆盖低空空域高度的变化

由图 2-3 可见，随着覆盖空域高度的增加，两颗 GEO 卫星间所需的经度差将减小，有利于系统的实现。在覆盖空域最低高度为 100km 时，需要的经度差约 179.5° ；当低空空域高度为 1500km 时，需要的经度差为 130° ；低空空域高度为 5000km 时，需要的经度差为 86° ；当两颗 GEO 卫星的经度差达到最大值 180° 时，所能够覆盖的最低空域高度约为 95km。

因此，在本文的设计中，若要满足对中国及周边地区（东经 65° 到 172° ，南北纬 54° 范围）覆盖的要求，即采用一颗 GEO 卫星即可实现区域覆盖，可以考虑 GEO 卫星定位于东经 120° 上空。但是如果考虑要实现对低空空域的连续覆盖，至少需要两颗卫星，并且两颗卫星的经度差要满足上述的分析，即取决于下层低空空域 LEO 卫星的轨道高度。

2.3.2 LEO 低轨卫星星座设计

根据分层天基网络的体系结构，LEO 卫星网络作为整个网络的接入点，可供选择的方案较多，例如：1) 由稀疏的 Walker 星座到完整的 Walker 星座；2) 由不同倾角的 Walker 星座叠加而成；3) 可以覆盖全球的极轨道星座；4) 极轨道星座和 Walker 星座构成的混轨星座；5) 按需求设计为“话音星座”或“数据星座”。

LEO 卫星网络的设计主要取决于系统设计的要求，如是要求区域覆盖或全球覆盖，是要求语音业务还是数据业务还是要求多媒体业务，另外还取决于区域的重访时间要求和对某区域的连续覆盖时间要求等。

2.3.2.1 LEO 低轨卫星星座设计方法

在全球性卫星星座系统中，主要采用两种圆轨道星座设计方法：1) Walker 极轨道星座，基于覆盖带的设计方法比较适用于对圆极轨道星座的设计，如 Iridium、Teledesic 等；2) Walker 倾斜轨道星座，如 Globalstar、ICO、LEO ONE、Celestri、GIPSE、GPS、GLONASS 等采用的就是这种星座设计方法。其性能与玫瑰星座相当。在星座设计中，这两种设计方法可以互换。另外，由于椭圆轨道卫星对覆盖某些特定地区（高纬度）十分有利，也有少数椭圆轨道星座，椭圆轨道星座的轨道倾角固定为 63.4° 或者 116.6° ，主要用于设计对特定地区（高纬度地区）进行覆盖的星座如 ELLIPS0 等。

极轨道和近极轨道星座中卫星在运行空域面上的分布是不均匀的，卫星在赤道和低纬度地区间隔较大，覆盖特性较差，而在极地地区非常密集，覆盖特性很好。在极轨道星座中轨道间存在反向缝，反向缝两侧的卫星反向运行，因此在卫星穿越极区时，由于卫星相对位置的高速互换，天线跟踪不及时，会暂时关闭。但转发器的频繁开启和关闭又会引起星座拓扑结构的频繁变化等严重问题。另一方面，极轨道星座存在着低纬度地区覆盖稀疏、高纬度地区覆盖稠密的特点，但由于极地和高纬度地区的业务相对较小，会造成星座系统的资源浪费比较严重。

如图 2-4 所示，给出了极轨道星座的俯视图。

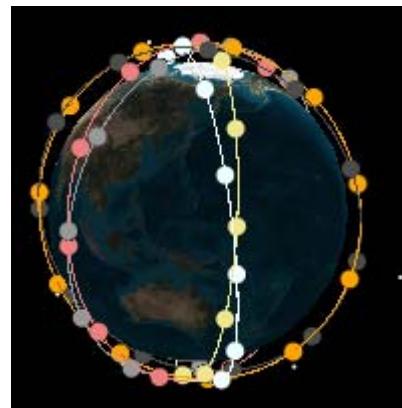


图 2-4 极轨道星座俯视图

Walker 倾斜轨道星座采用 3 元参数组 T/P/F 来描述其星座，其中，T 代表星座的卫星总数，P 代表星座的轨道平面数量，F 为相位因子，取值为 0 到 P-1 之间的整数。在确定上述参数之后，可按公式 2-2 确定相邻轨道相邻卫星的初始相位差 $\Delta\omega_f$ ：

$$\Delta\omega_f = 2\pi \cdot F / T \quad (\text{式 2- 2})$$

结合卫星的轨道高度 h 和倾角 i ，便可以完全确定 Walker 倾斜轨道星座所有卫星的位置。

在卫星轨道高度相同、覆盖性能接近的条件下，Walker 倾斜星座比极/近极轨道星座所需的卫星数少，这是因为 Walker 倾斜轨道星座中卫星在空域面上的分布更加均匀，而极轨道星座的卫星在赤道附近稀疏、两极地区密集，分布不均匀。因此，Walker 倾斜轨道星座更加适合于设计全球连续覆盖的卫星通信系统。

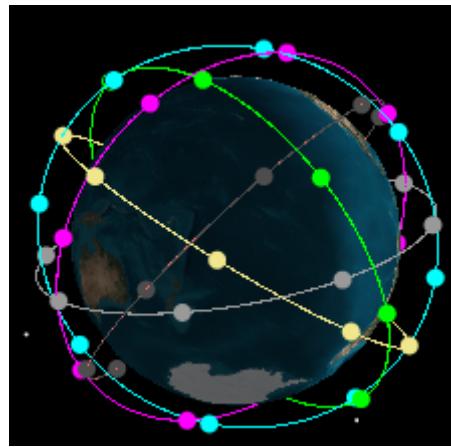


图 2-5 倾斜轨道星座俯视图

2.3.2.2 LEO 低轨卫星星座的选择

在覆盖条件方面，本文要求此 LEO 星座可以提供最小仰角为 5° 的中低纬度带的实时连续覆盖（除南北极外）。

根据上述分析，本文设计了 Walker delta 2π 型星座的 LEO 卫星星座，Walker 倾

斜轨道星座和极轨道星座相比更加适合于设计连续覆盖的卫星通信系统，可以提供对覆盖区的均匀覆盖，减少卫星数量。

根据上面的卫星星座设计方法，本文设计了轨道高度为 1450km 的 24/3/1 (30° 倾角) Walker 倾斜轨道星座设计方案。

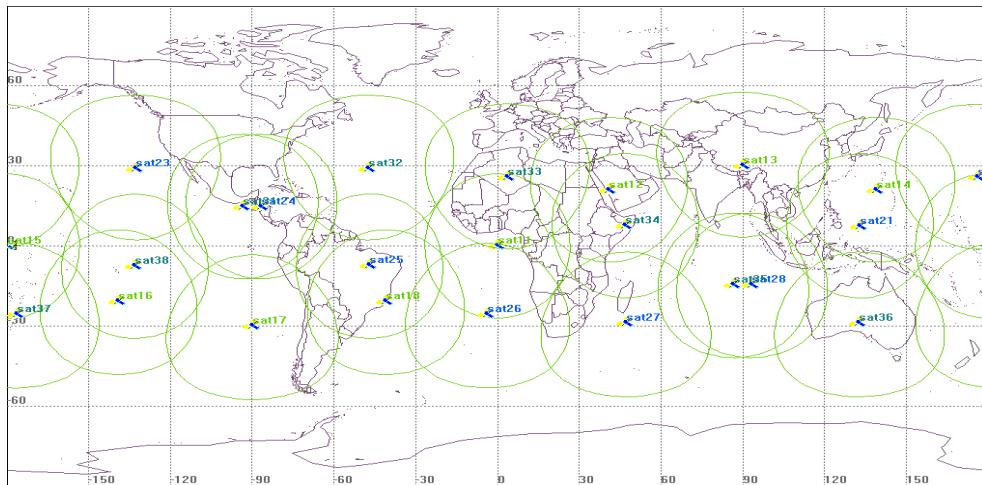


图 2-6 30 度倾角 1450km 24 星方案覆盖图

该星座覆盖性能如下图所示。

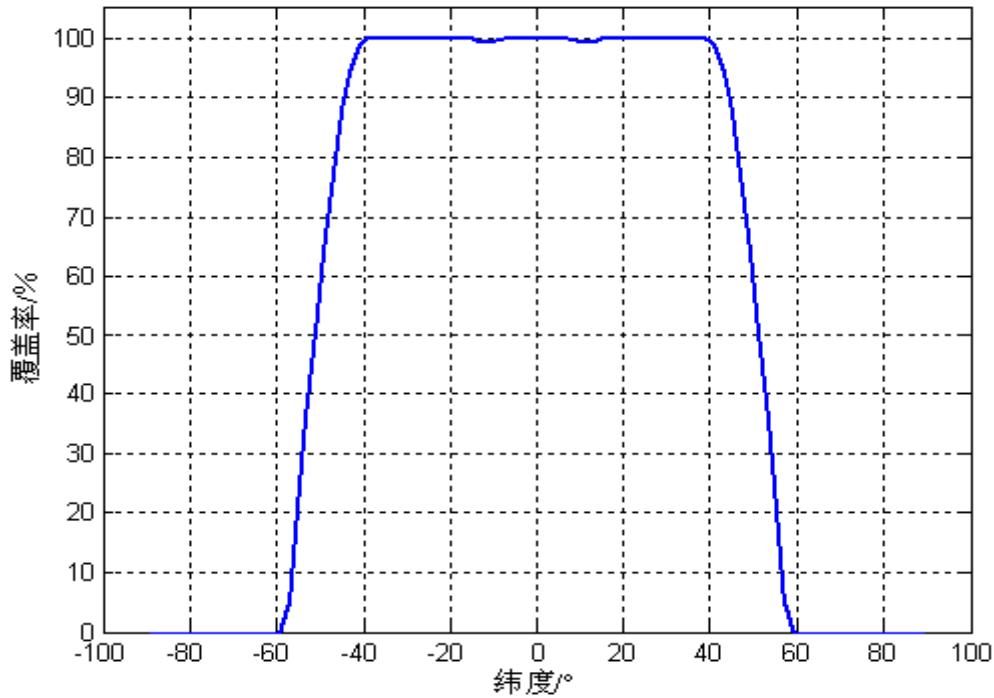


图 2-7 24 星低轨星座方案随纬度变化覆盖性能示意图

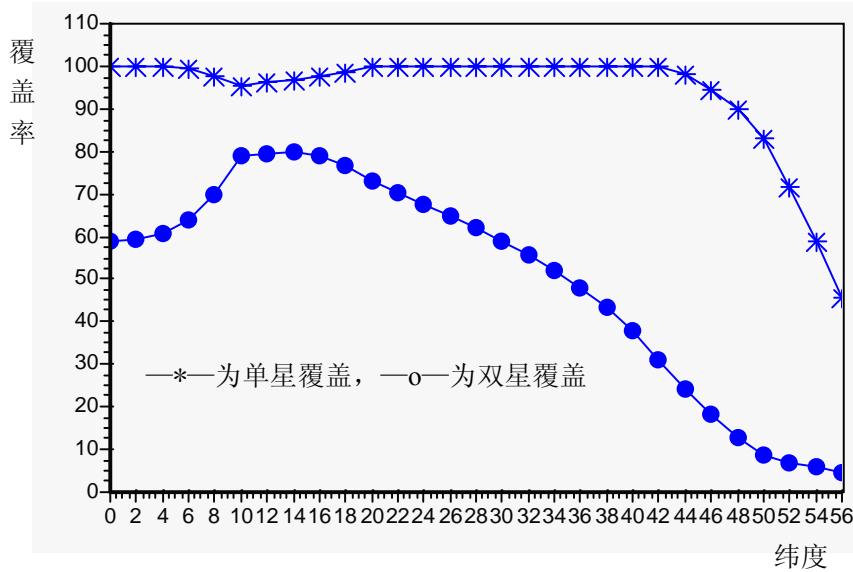


图 2-8 24 星低轨星座方案的多星覆盖性能示意图

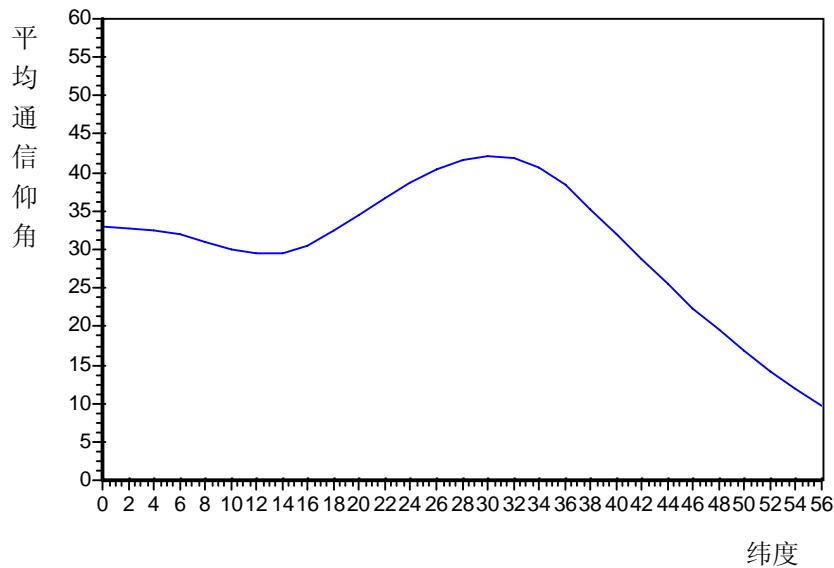


图 2-9 24 星低轨星座方案不同区域的平均通信仰角

通过图 2-7、2-8、2-9 的仿真可以看到，星座方案可以对 $-58^\circ \sim +58^\circ$ 的纬度范围提供最小仰角为 5° 的覆盖， $-39^\circ \sim -17^\circ$ 和 $17^\circ \sim 39^\circ$ 两个纬度带内，可以 100% 覆盖， $\pm 45^\circ$ 纬度带内，为双星或者多星覆盖。

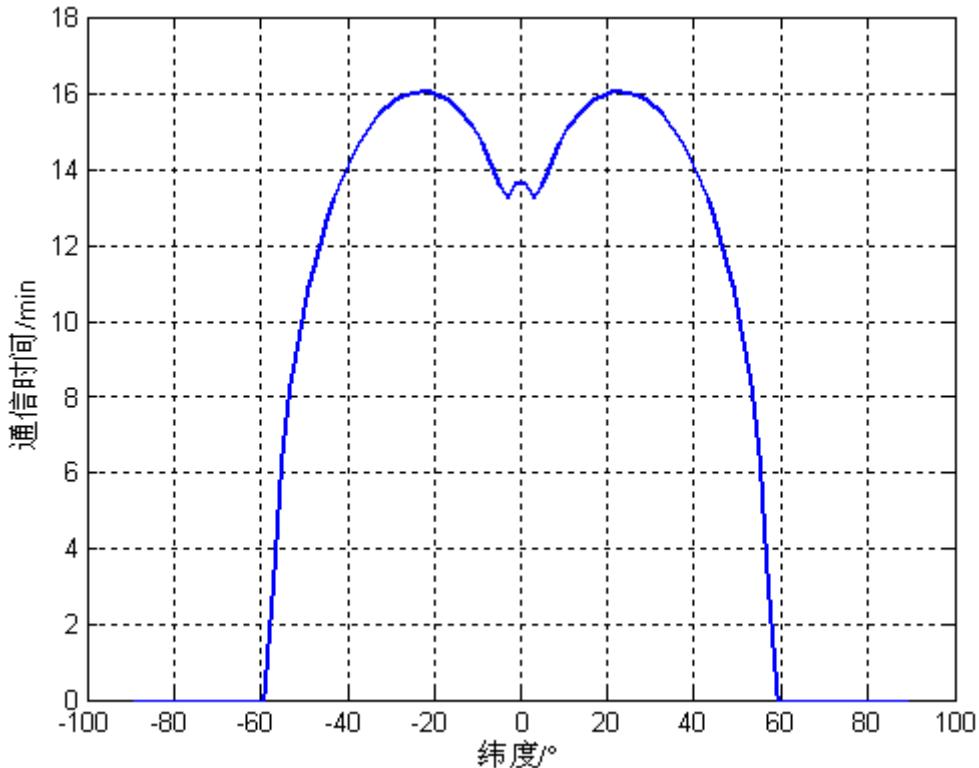


图 2-10 24 星低轨星座方案通信时间随地理纬度变化

由图 2-10 可以看出，该星座方案最大通信时间为 962s，最小通信时间为 0s。

上述分析了低层 LEO 星座的覆盖性能，另外考虑系统通信性能就要涉及到 LEO 层卫星间的星间链路的设计，如果 LEO 层卫星之间没有星间链路，那么只能支持同一个星下点范围的实时语音通信，由于本文的网络模型的建立要求支持语音、视频等多媒体业务，因此在低层 LEO 卫星网络内部每颗 LEO 卫星建立有 4 条星间链路。另外低轨卫星之间具有星间链路，也可以保持系统的独立性、抗毁性和可靠性。在第三章中对 LEO 卫星之间是否具有星间链路的情况下 LEO 卫星与 GEO 构成的双层卫星网络的抗毁性进行了建模对比分析，以便更准确的分析其抗毁性能。而 GEO 卫星尽管其相互之间的距离比较远，但由于其位置相对固定，只要两颗 GEO 卫星之间满足可见性条件（不被地球遮挡），则它们之间可以建立 GEO-ISL 并始终维持不间断。

2.3.3 星座模型的建立

经过上述的分析，选择 LEO 卫星网络与 GEO 卫星组成的双层卫星网络作为论文的研究对象，其星座模型如下图 2-11 所示：

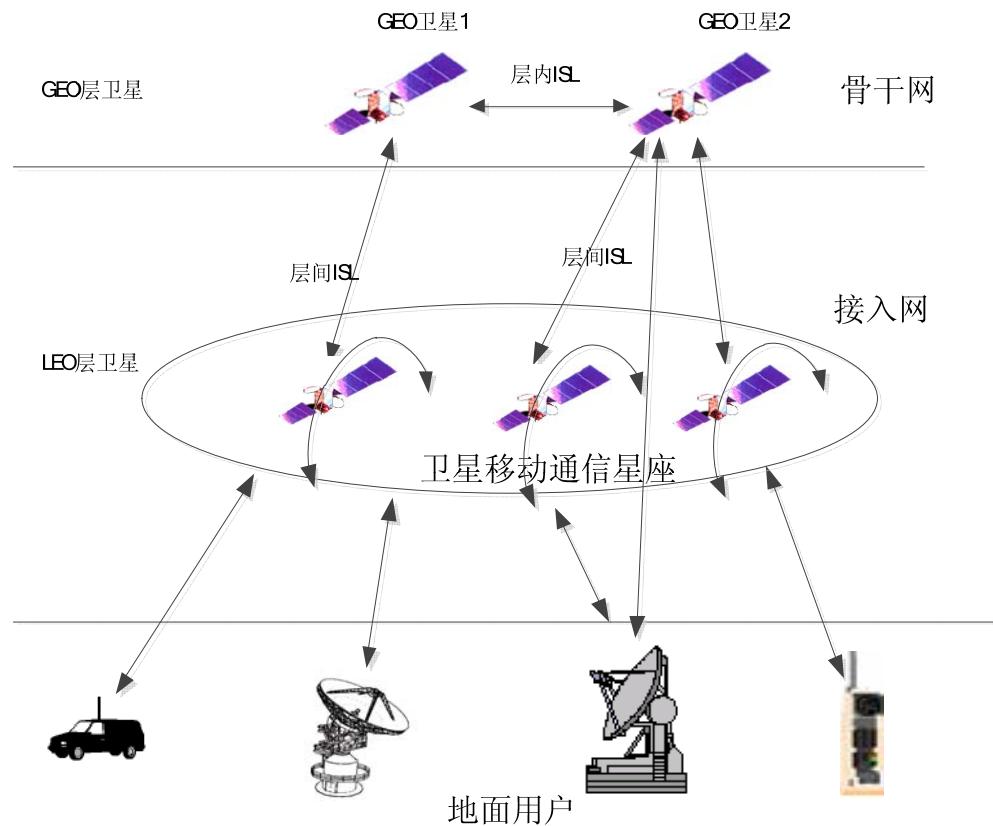


图 2-11 优化的分层卫星网络星座模型示意图

双层卫星星座网络采用 2 颗 GEO 卫星和 24 颗 LEO 卫星组成，由 2.3.1 节可知，当 LEO 星座轨道高度为 1450km 时，两颗 GEO 卫星的经度差只要满足大于 130° 即可实现对低轨空域的连续覆盖。因此，其轨道参数如表 2-1 所示：

表 2-1 双层卫星星座网络轨道参数

	混合轨道卫星星座方案
卫星总数	2GEO+24LEO
轨道类型	高轨轨道+低轨轨道
轨道高度 (km)	36000、1450
相位因子	-----
定点经度 (度)	W10, E120
轨道倾角 (度)	高轨星倾角：0 度 低轨星倾角：30 度

基于 STK 的 GEO/LEO 双层星座立体架构如下图 2-12 所示：

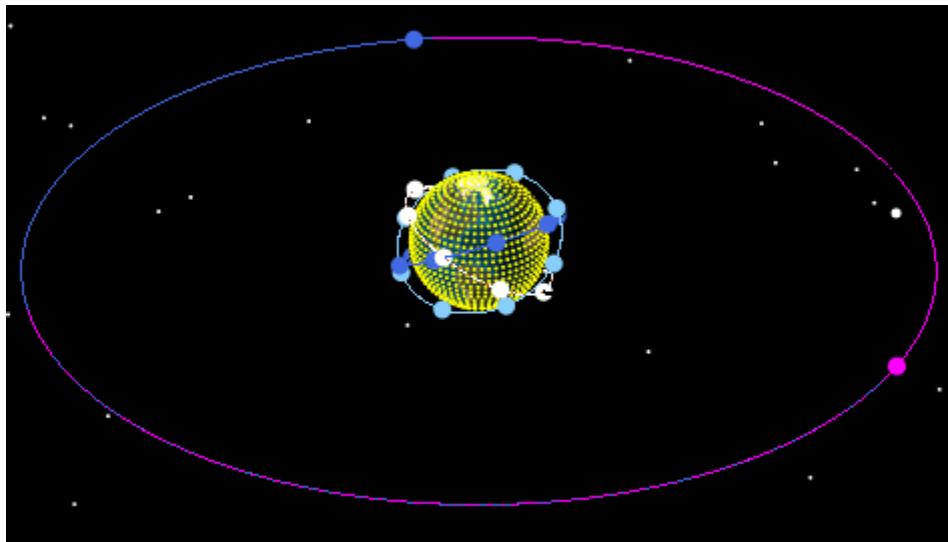


图 2-12 双层卫星网络三维示意图

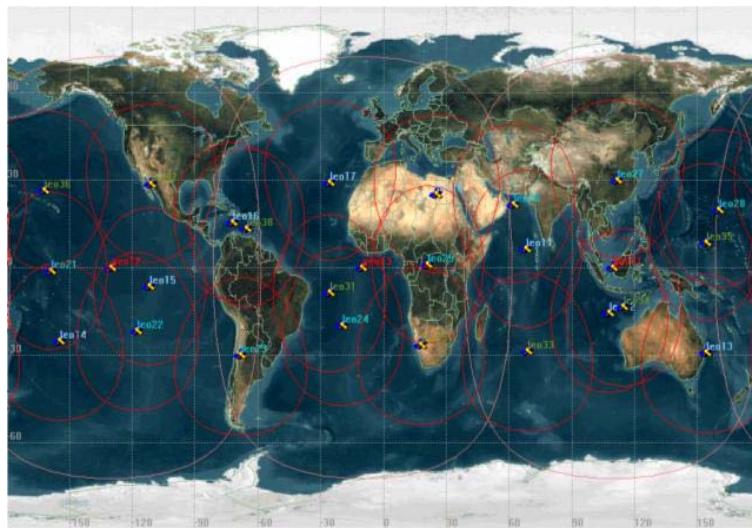


图 2-13 双层卫星网络二维示意图

2.3.4 多层卫星星座网络系统性能分析

应用卫星网络仿真方法和仿真工具 STK 对分层卫星网络进行建模，并进行仿真，通过与 MLSN 网络、HSBN 网络的性能进行比较，以说明所提出的分层卫星网络体系结构所带来的组网设计以及网络性能上的提高。

下面主要从系统通信性能、系统建设与维护、系统抗毁性和冗余性、系统成本等方面分析此星座网络的系统性能。

在文献[8]作者 Ian 提出了多层次卫星网络模型 MLSN，在文献[18]中提出了基于“骨干/接入”（B/A，Backbone/Access）模型的具有强连接方式的多层次卫星网络 HSBN 方案。下面分别对 MLSN 方案和 HSBN 方案进行性能分析的对比。

MLSN 方案由 GEO+MEO（MEO 卫星间具有星间链路）+LEO（LEO 卫星间有星间链路）卫星组成，GEO 卫星和 MEO 卫星组成骨干网，LEO 卫星作为接入网，

MEO 卫星和 LEO 卫星之间具有层间链路, GEO 卫星与 MEO 卫星和 LEO 卫星之间具有层间链路, 另外 MEO 卫星和 LEO 卫星在同一层内也具有星间链路, 具有强冗余连接关系。

HSBN 方案在 MLSN 方案的基础上, 简化了多层卫星网络结构的设计。HSBN 方案由 GEO+MEO (MEO 卫星间具有星间链路) +LEO (LEO 卫星间没有星间链路) 组成, GEO 卫星和 MEO 卫星组成骨干网, LEO 卫星作为接入网。MEO 和 LEO 星座均采用 Walker delta 2 π 星座, 可使在卫星运行过程中同一层面的卫星间的相对关系保持不变, 有利于卫星之间建立稳定的路由关系。MEO 卫星层内星间链路和 MEO 卫星与 GEO 层间星间链路为永久性星间链路, 因此骨干网具有稳定的拓扑连接关系。

表 2-2 多层卫星星座网络方案轨道参数

	方案 1 (MLSN 方案)	方案 2 (HSBN 方案)	方案 3 (OHSN 方案)
网络层次	3 层	3 层	2 层
卫星总数	GEO: 3、MEO: 18、 LEO: 72	GEO: 4、MEO: 8、 LEO: 24	GEO: 2、LEO: 24
轨道高度 (km)	GEO: 35786、MEO: 8000/12000、LEO: 1375	GEO: 35786、MEO: 13892、LEO: 1666	GEO: 35786、LEO: 1450
轨道倾角	GEO: 0°、MEO: 90°、LEO: 90°	GEO: 0°、MEO: 40.78°、LEO: 45°	GEO: 0°、LEO: 30°
业务特点	支持语音业务及数据 业务等多媒体业务	支持语音业务及数据 业务等多媒体业务	支持语音业务及数据业务 等多媒体业务
轨道数目	GEO: 1、MEO: 6、 LEO: 12	GEO: 1、MEO: 2、 LEO: 6	GEO: 1、LEO: 3
层间链路 (条/ 颗)	LEO->MEO 1 LEO->GEO 多条 MEO->MEO 多条 MEO->GEO 多条 GEO->GEO 2	GEO->MEO: 4 MEO->GEO: 2 MEO->LEO: 1 LEO->MEO: 1	GEO->LEO: 1 LEO->GEO: 1
同层链路 (条/ 颗)	GEO: 2、 MEO: 2 轨道内+2 轨 道间、LEO: 2 轨道 内+2 轨道间	GEO: 2、 MEO: 2 轨道内+2 轨 道间、LEO: 无	GEO: 2、 LEO: 2 轨道内+2 轨道间、
层间链路状态	GEO->MEO: 永久链 路、	GEO->MEO: 永久链 路、	GEO->LEO: 非永久链路 LEO->GEO: 非永久链路

	MEO->GEO: 永久链路 MEO->LEO: 非永久链路 LEO->MEO: 非永久链路	MEO->GEO: 永久链路 MEO->LEO: 非永久链路 LEO->MEO: 非永久链路	
同层链路状态	GEO: 永久链路 LEO: 轨道内为永久链路, 轨道间为非永久链路	GEO: 永久链路 LEO: 无	GEO: 永久链路 LEO: 轨道内为永久链路, 轨道间为非永久链路
最小通信仰角	GEO: 20° 、 MEO: 10° 、 LEO: 10°	GEO: 20° 、 MEO: 14° 、 LEO: 10°	GEO: 20° 、 LEO: 10°
覆盖范围	全球覆盖	全球覆盖	除南北极外的全球覆盖

MLSN、HSBN 以及 OHSN 方案的特点归纳如下:

(1) MLSN 方案和 HSBN 方案均引入了 MEO 星座, OHSN 方案中不再具有 MEO 星座, 覆盖特性的满足通过 LEO 卫星星座实现, 由于南北极业务量小, 本文设计的 LEO 星座可以覆盖除南北极外的全球区域, 因此这样的设计也是合理的。

(2) MLSN 方案中 MEO 卫星可以直接为地面移动终端提供接入服务, 在 HSBN 方案中由 GEO 卫星和 MEO 卫星构成的天基骨干网只对地面的大型终端用户提供服务, 而小型终端由 LEO 卫星提供服务。在 OHSN 网络中, 地面用户移动终端只与 LEO 卫星通信, 而大型地面站终端可以由 GEO 卫星提供服务。

(3) 在 MLSN 网络中, GEO 与下层的 MEO 卫星和 LEO 卫星之间均存在星间链路, LEO 卫星之间也存在星间链路。为了简化设计, HSBN 中 LEO 卫星之间不存在星间链路, GEO 与 LEO 卫星之间也不存在星间链路。从系统设计上 HSBN 比 MLSN 设计简单。在 OHSN 网络中, GEO 卫星与下层的 LEO 卫星具有层间链路, 并且相对上述两种方案改进了强连接的连接方式, 不要求 LEO 层每颗卫星均与上层 GEO 卫星保持连接, 更加简化了卫星网络的结构设计复杂度, 并且降低了多层星座卫星网络中卫星和星间链路的设计复杂度。

通过比较可以看出, HSBN 网络模型相对于 MLSN 网络简化了网络结构设计, 但是它同样需要一个覆盖全球的 MEO 星座, 虽然简化了下层 LEO 卫星的设计难度和设计成本, 但由于 MEO 卫星与 LEO 卫星高速运动, 星间链路建立和维护均比较困难, 并且路由构建复杂, 因此本文不考虑 MEO 星座, 由 LEO 卫星星座提供接入服务, GEO 卫星作为骨干网, 本文提出的 OHSN 网络具有如下结构特征:

(1) LEO 卫星之间具有 ISL 相连接;

- (2) GEO 卫星与 LEO 卫星间具有 ISL 相连接;
- (3) 根据覆盖关系, 不需要所有 LEO 卫星均与上层 GEO 卫星具有连接关系, LEO 卫星某一时刻最多只有 2 颗卫星与 GEO 卫星具有连接关系。

其在系统通信性能、系统建设与维护、系统抗毁性与冗余性、系统成本等各方面的性能如下:

(1) 系统通信性能

在通信容量方面, 该方案可以实现系统容量的充分利用。GEO 卫星可以实现对 1500km 空域的连续覆盖, 在境内通信区, 主要利用 LEO 卫星来实现业务的语音通信, 在大业务量或业务有不同 QoS 要求时可以选择利用 LEO 卫星或 GEO 卫星来完成业务的多媒体通信。

(2) 系统建设和维护

在系统建设过程中, 可以考虑采用分步实施的策略。

首先实现中国局部地区的重点覆盖通讯, 通过一颗静止星, 把卫星上的区域波束天线指向通过敏感地区上空的低轨卫星, 在境外某空域形成“中继区”, 即可实现信息存储转发与可预报的语音通信。此时的低轨卫星只需满足最低配置即可。

然后利用若干静止星, 可对全球空域形成一些“中继区”, 并力求覆盖全球空域, 通过二颗静止星, 可达到对 1500km 空域的连续覆盖, 再通过扩展低轨卫星星座, 即可达到对全球区域的实时通信。这种阶段部署的方案可以实现系统效能的最大化。

(3) 系统抗毁性和冗余性

对于下层轨道卫星, 一方面同轨道的卫星可以起到互为冗余备份的作用, 系统的可靠性、降级使用能力得到提高; 另一方面系统具有下层轨道与地球静止轨道的双重优势, 可以实现下层轨道卫星和 GEO 卫星对地面的双重覆盖, 可以达到一定程度的抗毁性和安全性的要求。下文会对卫星网络的抗毁性和安全性设计进行更加详尽的分析。

从通信系统的设计角度, 这种方案的下层轨道卫星不仅可支持小型终端, 而且可以充当“接入网”的角色。高—低轨道组合, 为“接入网”接入核心网提供了通道。可以提高系统的扩展性。

(4) 系统成本

卫星总数量少, 相对于 MLSN 多层卫星星座和 HSBN 星座, 减少了 MEO 卫星的数量, 大大降低了成本。

可以看出, 利用低轨卫星星座系统覆盖的广域性以及 GEO 卫星的强大的处理能力, 结合两者的优势, 实现了 GEO、LEO 卫星的优势互补, 将低轨卫星作为接入卫星, 实现对用户的接入处理, 将 GEO 卫星作为骨干卫星, 作为路由以及交换的处理器, 以及作为在网络业务繁忙时的备份卫星, 可提高整个网络的抗毁能力以及抗打击能力, 并且具有组网灵活、管理简单等特点。同时, 随着我国天基综合信息网的发展,

能够提供可靠接入服务以及 QoS 保证，能结合各个轨道层面优势的多层次星座卫星网络是未来天基综合信息网的发展趋势。因此，将其作为研究目标是必要的，同时国内外也早已开展了相关方面的研究，但还没有论文对其进行系统的描述，包括其组成，以及其关键技术等，本文主要从我国的需求出发，提出这样一种解决方案，然后论证了其可行性，对其关键技术进行研究，作为后续进行深入研究的基础。

2.4 优化的分层卫星网络星间链路设计

在此 LEO&GEO 双层卫星网络中，包含 3 种 ISL：轨道内链路（LEO-LEO 星间链路，GEO-GEO 星间链路）、轨道间链路和层间链路（GEO-LEO 星间链路）。

对于轨道内链路，是指 LEO 层内 LEO 同轨面间的链路以及 GEO 卫星与 GEO 卫星之间的链路。LEO 同轨道面间的链路，星间相对位置固定，在整个运行过程中是非常稳定的。GEO-GEO 星间链路在相同覆盖情况下，可以极大地提高系统的通信容量；在覆盖不同区域时，可以大大增加通信覆盖面积，同时提高地面站的最小仰角，提高通信质量，并可以减少对卫星轨道位置的限制，建立全球卫星通信网。这种链路主要应用于实现全球中继通信卫星网络系统。

轨道间链路主要指 LEO 层不同轨道面间的星间链路。轨道间链路是动态变化的，根据两星之间距离、方位角、俯仰角的变化率以及天线的跟踪扫描特征动态建立连接。

GEO-LEO 层间链路利用 GEO 卫星联系地面站和 LEO 卫星，两颗卫星适当配置组网，可以基本覆盖中、低轨道空域，大大节省了系统投资和复杂度。

星间链路属于无线链路，为了适应卫星通信系统不断增长的高码速率的传输要求，国际上趋向于采用微波、毫米波或激光链路。对于星间链路特性的分析，通常用星间链路的俯仰角、方位角以及星间链路长度来表征^[19~26]。

2.4.1 星间链路几何特性分析

图 2-14 给出了 GEO 卫星与 LEO 卫星间的瞬时层间 ISL 示意图。其中 O 为地心，G 为 GEO 卫星，L 为 LEO 卫星，d 为 GEO 卫星与 LEO 卫星间瞬时层间 ISL 的距离， R_G 为 GEO 轨道半径， R_L 为 LEO 轨道半径， E_{GL} 为 GEO 卫星与 LEO 卫星间瞬时层间 ISL 仰角， θ 为地心角， R_E 为地球半径， H_{ISL} 为瞬时层间 ISL 与地心间的高度。

根据图 2-14，瞬时层间 ISL 距离 d 可表示为：

$$d = \sqrt{R_G^2 + R_L^2 - 2R_G R_L \cos(\theta)} \quad (\text{式 2- 3})$$

根据轨道动力学和球面三角形的几何分析，可以写出卫星 SAT 在地球上对应的轨迹方程：

$$\begin{cases} \varphi_{sat} = \arcsin(\sin \beta) \sin(\xi) \\ \lambda_{sat} = \lambda_0 + \arctan(\cos(\beta) \tan(\xi)) + \begin{cases} -180^\circ, \xi \in [-180^\circ, -90^\circ] \\ 180^\circ, \xi \in [-90^\circ, 90^\circ] \\ 0^\circ, \xi \in [90^\circ, 180^\circ] \end{cases} \end{cases} \quad (\text{式 2- 4})$$

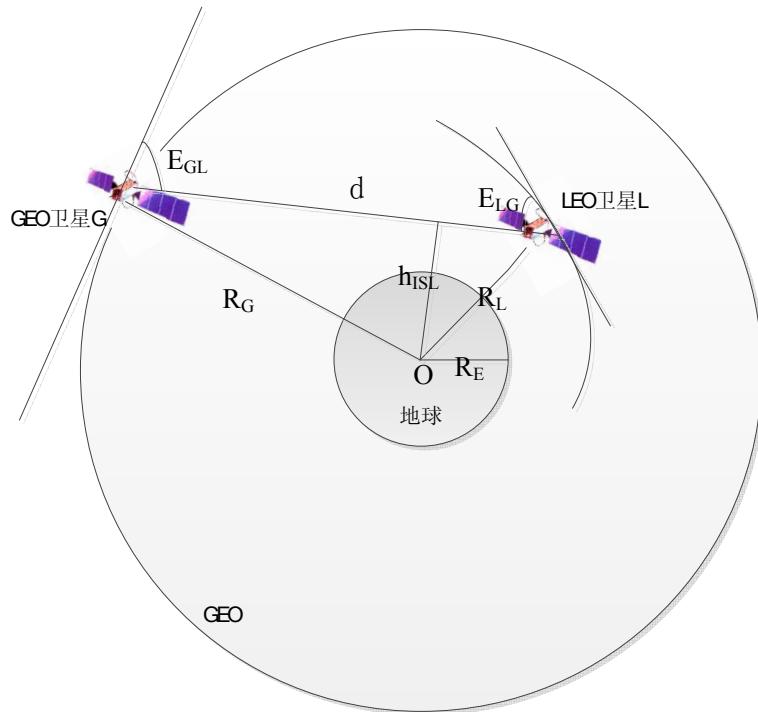


图 2-14 GEO 卫星与 LEO 卫星瞬时层间 ISL 示意图

其中 φ_{sat} 、 λ_{sat} 分别为 SAT 在地球上的纬度、经度， ξ 为飞行 t 时刻 SAT 与升节点间的角距， λ_0 为升节点的经度， β 为轨道倾角。根据球面几何知识， θ 可由 GEO 卫星及 LEO 卫星的经纬度表示，即

$$\theta = \arccos[\sin(\varphi_G) \sin(\varphi_L) + \cos(\varphi_G) \cos(\varphi_L) \cos(\lambda_G - \lambda_L)] \quad (\text{式 2- 5})$$

则瞬时层间 ISL 距离 d 可由 GEO 卫星及 LEO 卫星的星座设计参数完全确定。

根据图 2-14，瞬时层间 ISL 仰角 E_{GL} 、 E_{LG} 可以表示为：

$$E_{GL} = \arccos\left[\frac{R_L \sin(\theta)}{d}\right] \quad (\text{式 2- 6})$$

$$E_{LG} = \arccos\left[\frac{R_G \sin(\theta)}{d}\right] \quad (\text{式 2- 7})$$

在不考虑象限的条件下，GEO 卫星与 LEO 卫星的方位角及 LEO 卫星与 GEO 卫星之间的方位角 可以依据文献[19]求得。

上面描述了层间 ISL 的星间距离、星间方位角、仰角的计算公式。

下面介绍层间 ISL 的可通性判据准则：

由于地球上空大气层对信号产生衰减及干扰，对于瞬时层间 ISL 的可通与否，不能单从地球对层间 ISL 是否阻挡来判断。在考虑层间 ISL 可通性判据时，需要考虑在地球对层间 ISL 阻挡的临界条件下，考虑 ISL 可通性保护余隙，如果假设保护余隙为 H ，那么如上图 2-14 所示：

$$h_{ISL} = R_G \cos(E_{GL}) \quad (\text{式 2- 8})$$

当 $h_{ISL} \geq R_E + H$ 时，层间 ISL 可以建立；当 $h_{ISL} \leq R_E + H$ 时，ISL 不可以建立。

2.4.2 星间链路特性仿真分析

2.4.2.1 GEO-LEO 层间星间链路特性仿真分析

在此 LEO&GEO 双层卫星网络中，ISL 有 3 种，分别是同一个轨道面内的轨道内链路和轨道间链路以及不同层之间的层间链路。对于星间链路特性的分析，通常用星间链路的俯仰角、方位角以及星间链路长度来表征。俯仰角和方位角的变化情况反映了卫星之间卫星相对关系的变化情况，表明在卫星间实现星际通信的难易程度。星间链路长度反映了卫星之间长度的变化情况，通常作为星间路由选路的依据之一，因为星间长度直接决定了星间传输时延的变化。通过预先计算出邻近卫星的空间几何特性，可以加快卫星之间的瞄准捕获和跟踪，事先优化建立星间通信系统。

下面对 ISL 的方位角、俯仰角以及星间距离的变化情况进行了仿真。

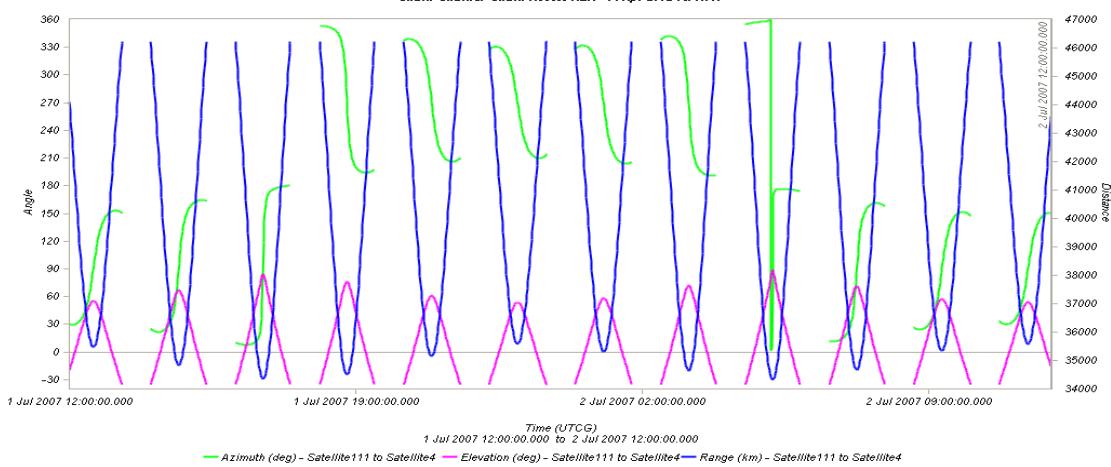


图 2-15 GE01 与 LE011 的星间链路俯仰角、方位角和星间距离变化示意图

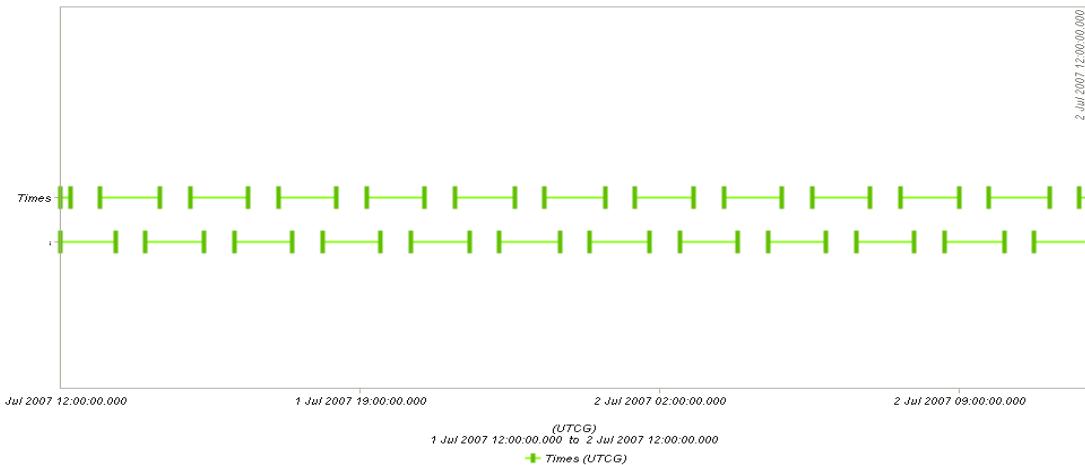


图 2-16 GE01 与 LE011、LE015 的连接关系示意图

二颗 GEO 卫星分别与三个轨道面的 LEO 卫星建立星间链路的具体建链时间如表 2-3 所示：

表 2-3 一个轨道周期内 GEO-LEO 卫星星间链路建立时间段

GEO1~ LEO 轨道面 1	建链时间	GEO2~LEO 轨道面 2	建链时间	GEO2~ LEO 轨道面 3	建链时间
GEO1-LEO11	00:00-01:17	GEO2-LEO21	00:00-01:11	GEO2-LEO31	00:00-01:06
	01:59-03:21		01:53-03:15		01:48-03:10
	04:03-05:24		03:58-05:18		03:53-05:13
	06:07-07:28		06:02-07:22		05:57-07:17
	08:10-09:33		08:05-09:28		08:00-09:23
	10:15-11:40		10:09-11:34		10:04-11:29
	12:21-13:45		12:16-13:40		12:10-13:34
	14:27-15:48		14:22-15:43		14:17-15:38
	16:31-17:51		16:26-17:46		16:21-17:41
	18:35-19:56		18:29-19:51		18:24-19:45
	20:38-22:02		20:33-21:57		20:28-21:51
	22:43-24:00		22:38-24:00		22:33-23:58
GEO1-LEO15	00:00-00:14	GEO1-LEO25	00:00-00:09	GEO2-LEO35	00:00-00:04
	00:56-02:19		00:50-02:14		00:45-02:08
	03:01-04:22		02:56-04:17		02:51-04:12
	05:05-06:25		05:00-06:20		04:55-06:15
	07:08-08:30		07:03-08:25		06:58-08:20
	09:12-10:36		09:07-10:31		09:02-10:26
	11:18-12:43		11:12-12:37		11:07-12:32
	13:24-14:47		13:19-14:42		13:14-14:36
	15:29-16:50		15:24-16:45		15:19-16:40
	17:33-18:53		17:28-18:48		17:23-18:43
	19:36-20:59		19:31-20:53		19:26-20:48

	21:40-23:05		21:35-23:00		21:30-22:55
	23:47-24:00		23:41-24:00		23:36-24:00

在不同层间的星间链路的变化情况如图 2-15 所示，星间距离在 30000km~50000km 之间变化，其通信时延为 100ms~167ms。如此远的通信距离造成了很长的延迟，给星间链路建链也带来了一定难度。并且由于 GEO 卫星与 LEO 卫星之间俯仰角、方位角变化率比较大，并且层间星间距离较远，因此，对于上下层之间星间链路，GEO 卫星只与其中一颗卫星进行通信，这样可以简化卫星的管理和路由。

GEO 卫星与低轨 LEO 卫星之间的层间链路可以用 GEO 卫星与 LEO 卫星之间的时间窗口个数（可通信次数）、平均时间窗口长度（平均每次可通信时间）、最大和最小可通信时间（最大和最小的时间窗口长度）等参数描述。

图 2-16 仿真了 GEO 卫星与下层 LEO 卫星之间的连接变化情况。以 GEO1 与 Satellite 11 为例来做仿真，GEO1 与 LEO11 的连接时间为：最短连接时间为 4573s，最长连接时间为 5101s，平均连接时间为 4871s。GEO1 与 LEO15 的连接时间为：最短连接时间为 840s，最长连接时间为 5091s，平均连接时间为 4305s。经过一天的仿真可以看出：GEO1 与低轨轨道面 1 上的卫星 LEO11 在不能通信期间，可以由 LEO15 接续进行服务。基于此仿真，可以为下面的动态路由算法的提出作为支撑。

2.4.2.2 低轨道同层星间链路特性仿真分析

低轨道同层间星间链路在同轨面和异轨面之间建立星间链路，同轨面星间链路连接关系是固定的，星间链路距离为 5991km，近似认为各星间链路传播时延相等，约为 20ms。

以 LEO11 与 LEO27 作为代表进行低轨道同层间异轨星间链路的连接关系仿真，异轨链路是否可以通信主要参考卫星之间距离及方位角等相对运动参数。一个轨道周期内卫星 LEO11 与 2 轨道面异轨邻星 LEO27 之间的链路特性统计数据如下表 2-4 所示：

表 2-4 一个轨道周期内 LEO11 和 LEO27 的相对运动参数

邻星 参数	LEO11-LEO27
星间距 R/km	4546.2~8157.5
方位角 $A/(\text{°})$	-66.9~66.9
俯仰角 $Z/(\text{°})$	-16.9~-31.4
星间距变化速率/(\text{km/s})	-3.3~3.3
方位角变化速率/(\text{°}/\text{s})	-0.078~0.078
俯仰角变化速率/(\text{°}/\text{s})	-0.013~0.013

从表中可以看出，在异轨星间链路持续时间段内，卫星之间的方位角变化速率、俯仰角变化速率都很小，方位角和俯仰角范围都不大，根据现有的星间链路研制水平，天线完全能够跟踪上，具有可实现性。

2.5 优化的分层卫星网络通信协议设计

对于本文提出的 LEO&GEO 双层卫星网络，其通信协议分层模型如图 2-19 所示：

目前，可以用在卫星网络的通信协议主要有两种：TCP/IP 协议族和 SCPS 协议族。由于空间传输环境的特殊性，采用地面网络通用的 TCP/IP 协议还是近来研究较多的 SCPS 协议是需要考虑的一个重点。

SCPS 协议是以 Internet 协议为基础，进行了适当的修改和扩充而发展起来的空间通信协议规范。它遵循 OSI 协议分层结构，四个协议集从上而下分别是文件协议（SCPS-FP）、传输协议（SCPS-TP）、安全协议（SCPS-SP）和网络协议（SCPS-NP）。

SCPS 相对于 TCP/IP 协议族主要进行的改进有以下两个方面：

(1) 降低通信开销。在空间通信发展初期，星上资源非常有限。SCPS 协议为了降低通信开销，对协议进行了简化处理。如 SCPS-NP、SCPS-TP、SCPS-SP 协议相对于 Internet 中 IP、TCP、IPsec 协议头部长度尽可能减小。

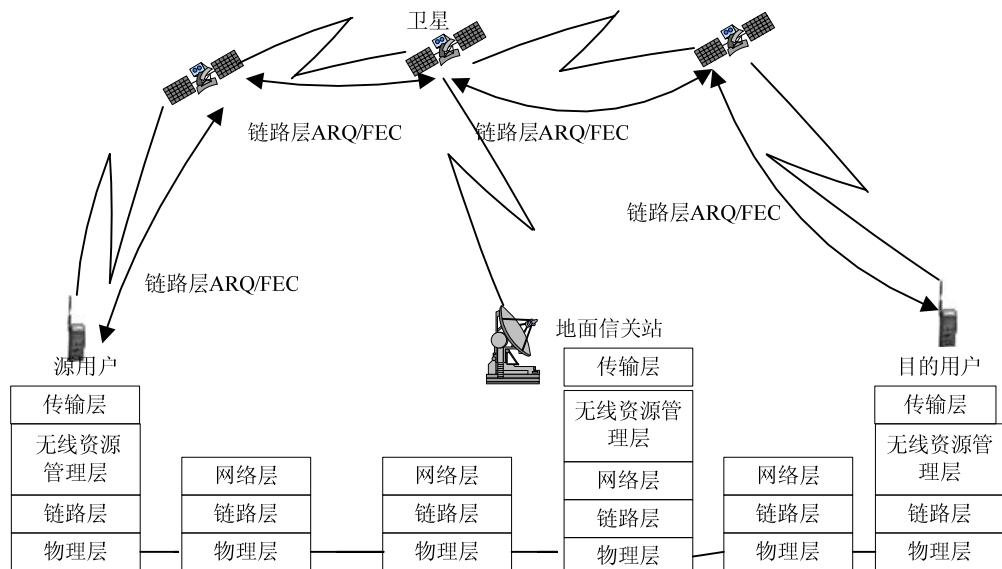


图 2-17 星上处理交换通信协议分层框图

(2) 适应空间环境长时延、高误码率、带宽不对称的特点。这方面的改进主要体现在传输层协议上，SCPS-TP 协议相对于 TCP 协议进行了改进，以适应卫星通信的特点。

卫星网络通信的特点：链路不对称、传播延迟比较大、链路持续的时断时续、网络拓扑结构不稳定动态变化。对于卫星协议的要求首先应能适应这种网络的特点、支持多类型通信服务，同时必须可以兼容多种多样的网络，并且不能限定底层的链路的传输技术，应在不同的传输速率和误码率的情况下，都能达到令人满意的程度。而根据上述的分析，SCPS 协议相对于 TCP/IP 协议的改进主要出于这两个方面原因，但随着空间技术的迅速发展，这两个方面的问题都已经得到解决，首先，对于资源开销问题，目前空间通信使用了一些新的频段，并应用了一些新的技术，空间链路带宽相对

于发展初期已有很大程度的提高，可用的通信资源大大增加。其次，TCP 协议不适合于应用在空间环境的问题，目前已有很多研究文献对其进行研究，提出了许多改进的方法。另外由于 SCPS 过分注重空间低层链路的影响，企图从协议上来适应这一环境，一方面使其失去了一般性，另一方面是其不得不以损失某些功能为代价，从而损失了灵活性和扩展性。

IP 网络协议经过这么多年的发展，可以适应空间网络环境的需求。具体表现在，对于特定环境，IP 有其特定的解决方法，例如在低速链路上的传播，IP 采用协议头压缩技术，对于移动问题采用移动 IP 技术，而不是变动 IP 协议本身，IP 是一个轻巧的协议，与其他机制相结合完成特定环境下的特殊要求。IP 技术在无线移动通信和多媒体信息传输中的发展使之逐渐适应空间通信需求，其主要体现在以下几个方面：

(1) 可以实现对移动通信的支持：卫星可以通过移动 IP 协议实现漫游，卫星在空间可组织成自组织网络互相通信，实现相互之间的通信；

(2) 对 QoS 的支持：随着现在空间技术的发展，卫星的复杂性大大提高，卫星通信支持的应用范围也越来越广，需要对多媒体类型提供传输服务。为了支持多媒体业务传输，IP 技术也由传统的“尽力而为”的服务方式引入了服务质量支持。目前提出了多种机制，如集成服务模型和区分服务模型，基于约束路由选择和多协议标签交换（MPLS）等流量工程机制，随着服务质量机制的引入，使 IP 网络能够更好的适应未来空间任务需求。

(3) TCP 网络性能的提升：传统 TCP 不适宜直接应用在卫星网络中，针对这一情况，人们提出了各种解决方案，如增大初始窗口、延迟应答、多个流共享参数、使用 TCP 代理等，并对 TCP 和改进措施在差错链路上的传输进行了建模和性能分析。

因此，综合考虑在本文所提出的卫星网络中应用传输层经过修改的 TCP/IP 协议，所有卫星均具有星上交换和星上处理功能。其七层协议分别描述如下：

■ 应用层——数据或语音编码技术

应用层主要是用户的数据源信息，主要为用户的语音、业务等多媒体数据。

■ 传输层——TCP 协议

在星际通信时，传输层协议是必不可少的，是通信可靠进行的保证。在地面的通信网络中，最为普遍的是 TCP/IP 协议，其良好的差错与流量控制能力使其在地面通信网络中的应用最为广泛。TCP/IP 最初是为地面网络互联而开发的，当应用于卫星网络中，由于卫星网络具有其本身固有的特点，特别是卫星信道距离远并且伴有很大的衰落和很高的延迟，链路传输较易出错等特点，因此，使得原本为有线网络设计的 TCP 协议用于卫星网时效率很低。

卫星网上 TCP 业务的性能与服务质量成为近年关注的话题，为了提高 TCP 在卫星网络中的性能，国内外开展了大量的研究工作^[27~33]，主要有三类：改进端到端 TCP 拥塞控制算法、基于代理分割 TCP 连接以及无线信道和有线信道实行分离，在无线

端应用新的或修改的 TCP 协议。除此之外，在链路层采用 ARQ（Automatic Retransmission Request 自动请求重传）和 FEC（Forward Error Correction 前向纠错）技术，可以减少因链路出错丢包而导致 TCP 发送窗口缩减、吞吐量降低，并通过逐跳链路层中继机制，在低层提供可靠的数据传输。

■ 网络层——路由转发

为了实现星间链路以及层间链路的信息传递，网络层是很重要的一个方面。网络层主要负责卫星和卫星之间的分组交换和路由选择，对于网络层而言，最重要的就是分组调度机制、资源管理机制、路由分发机制，需要采用合适的分组调度算法、根据分组类型对其进行区分业务处理将其输出到正确的输出端口，采用有效的资源管理算法对有限的星上资源进行优化使用，采用优化的路由算法，以保证 TCP/IP 分组能够在网络中正确传递。

在后文的论述中，也详细重点对网络层的机制进行了重点的考虑。

■ 数据链路层——成帧

数据在网络中传输时首先要进行分组，打包成帧，采用一定的传输体制进行传送。数据链路层的主要工作就是将上层数据进行分帧处理，将一块大的数据分解为多个分开的帧，每个帧都有一定的长度和大小，然后在帧的头部加入控制和路由信息，最后送到物理层进行底层的传送。

数据链路层包含了一些控制的协议，比如 ARP 等，这些协议已经具备了统一的模式，并且对于数据传输的质量影响并不是很大，因此在本文的卫星网络中采用通常的经典的数据链路层协议。

■ 物理层——物理信道传输

物理层位于整个通信协议的最底端，为了使数据适应物理媒介的传输，在最底层的数据要进行最基础的同步、编码调制等，对于卫星通信系统，尤其是对于星间链路通信，相对运动速度较快，多普勒频移相对较高，需要进行频率的同步，否则会给解调带来困难。另外还需要考虑星间链路的瞄准、捕获跟踪技术，以实现物理信道的建立，实现数据的正确传输。

2.6 本章小结

本章重点研究了多层卫星网络组网架构设计中的星座结构优化设计与拓扑分析、星间链路设计与性能分析和通信协议设计三个方面。

在星座结构优化设计方面首先介绍了星座设计的概念和星座的类型对比，分析了不同参数星座类型的优缺点。然后根据多层星座模型设计的目标要求，与已有的典型多层卫星网络星座进行比较和分析，提出了优化的分层卫星网络星座的模型，并对其系统性能进行了分析。优化的分层卫星网络能在不牺牲系统性能的前提下以更少的成本和设计难度满足了系统的目标要求，达到优化设计的目的。

在星间链路技术方面，首先分析了星间链路的几何特性，然后对本文提出的网络模型的星间链路性能进行了仿真分析。最后给出了一种星间链路的的瞄准、捕获和跟踪技术实现方法。

在通信协议设计方面，在深入分析 TCP/IP 协议和 SCPS 协议的基础上，对采用 TCP/IP 协议的双层卫星网络的各层协议体制进行了研究设计。上述的星间链路设计和通信协议的设计为后文的路由算法的设计和分组调度算法的设计打下了基础。

本章的优化分层卫星网络结构模型是我国未来天基系统发展方向的一个理论设想。我们知道天基信息网的建设是分阶段进行的，针对我国国情，在完善卫星系统数量和种类的基础上，提高卫星网络的性能，在外部空间逐步满足未来全球实时多媒体业务通信的发展趋势，建立我国自己的多层次天基卫星网络是一个从无到有、循序渐进的过程，需要不断的探索和努力。

第三章 LEO&GEO 双层卫星网络的抗毁性技术

3.1 引言

通信网络抗毁性是指在网络中出现确定性或随机故障时, 网络维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力^[34]。由于卫星置于空间环境中, 一旦发射升空, 如果出现节点失效或是链路故障, 则几乎无法修复, 特别是在未来空间攻防中, 卫星节点和卫星链路受到攻击被动失效的概率大大增加, 因此研究卫星网络中卫星节点失效以及链路故障对整个卫星网络的影响即卫星网络的抗毁性是卫星通信领域一个十分关注的重点问题。

卫星网络抗毁性研究的重点是建立不同卫星的星间、星地通信信道, 实现卫星、地面站等通信节点的动态组网通信, 体现空间环境、不同的攻击方式和不同的通信选择方案对网络的影响, 建立抗毁性测度指标评价体系, 并对网络的抗毁方法进行分析研究, 建立网络抗毁性模型, 对网络抗毁性指标进行测度和评估, 有助于对网络进行合理的维护和管理, 也有助于设计与实现具有高抗毁性的网络。

网络的抗毁性评估方法主要包括定性的抗毁性评估^[34-37]和定量的抗毁性评估方法^[38-43]两种, 定性的评估方法虽然可以给人以直观的理解, 但缺乏相应具体评估指标, 没有给出精确的描述, 难以准确地判断系统的抗毁性。因此, 在开展网络抗毁性研究时, 需要针对不同的网络模型定量地建立相应的指标评估标准, 这是有效地进行网络抗毁性评价的前提条件。

现有网络中的主流的抗毁方法主要包括两类: 预先保护与事后恢复两种方式。预先保护方式即在网络中的节点或链路发生失效前, 预先为业务配置保护路径或备份节点, 并且预留足够的带宽资源。当网络中节点或链路发生失效时, 业务可以切换到备份路径或者已经预留好带宽资源的保护路径上, 通过重路由或迂回路由技术从而保证业务不受网络失效的影响。恢复方式和保护方式相反, 事先不为业务预留保护资源, 当网络中节点或链路发生失效时, 通过事先设计方案的实施来及时快速的恢复网络先前的状态, 包括在初始选择路径时选择连通概率比较高的链路, 减小网络发生连通故障的概率, 降低服务被中断的概率等。这两种方式各有特点: 保护的方式中由于业务预先分配好链路, 业务切换时间短, 业务重新建立比较快, 但是消耗的带宽资源比较大, 恢复的方式消耗的资源比较少, 但是由于是在发生失效后为业务重新计算链路, 业务的切换时间比较长, 业务重建比较慢。

本章首先介绍了已有的抗毁评估方法的研究现状, 针对卫星网络拓扑特征和业务特点建立了网络抗毁能力的一般衡量标准, 然后依据此标准对卫星网络的拓扑结构和网络业务特性进行了抗毁性评估, 据此提出了有针对性的提高抗毁性的方法。

3. 2 抗毁性技术研究概况

3. 2. 1 抗毁性评估的研究现状

目前，抗毁性评估在一些领域取得了一定的研究成果，定性的描述网络的抗毁性主要包括以下几个方面：

- 1) 可重构自恢复性、自适应性：系统遭受各种威胁攻击之后能够快速的恢复网络功能，继续向用户提供正常服务；
- 2) 服务的连续性、完整性：网络能够保证其基本功能和性能，如满足其覆盖性、通信需求、动态路由重构能力，若有网络性能下降，但网络须保证可以被用户所接受并继续可用；
- 3) 响应时间（及时性）：服务应该满足用户对系统响应的及时性要求，服务的反馈信息要在用户能够接受的时间内到达。

定量的抗毁性评估主要是在图论、概率论、随机过程等学科研究成果的基础上综合开展的，抗毁性定量评估的关键环节之一是制定可量化且可操作的性能评估指标，这将直接关系到评估是否具有科学性、全面性、有效性、合理性和可用性。目前，对网络抗毁性评估指标的研究在国内外还处于起步阶段，现在主要的研究成果有：

最早出现关于网络抗毁性描述的参数是连通度和边连通度，Menger、Whitney 等人在这方面做了大量卓有成效的工作。一般情况下，网络的连通度越好，它所代表的网络就具有更好的拓扑稳定性。但随着研究的深入，研究者发现仅用这两个参数不足以刻画网络的抗毁性能，为解决这个问题，研究者又相继引入了一些其他的关于网络抗毁性能的参数。

研究者相继提出了联接数^[44]、网络离散数^[45]、网络完整度^[46]的概念。联接数，顾名思义，刻画了网络中点与边的“联结”程度，联接数越大，网络中的点就越被“紧密”地连接在一起，网络的稳定性与抗毁性就越好。网络离散数越大，其连通性就越差，从而稳定性也越差，反之亦然。

Cozzens 等人于 1995 年提出网络粘连度^[47]的概念，这是网络抗毁性研究一个比较新的参数，因为该参数同时反映了网络被破坏的情况和剩余部分的状态，从而是一个非常理想的网络抗毁性参数，同时也受到了广泛的关注。文献[48]对二维移动自组网提出了基于半马尔可夫过程的抗毁性模型，该模型对抗毁性进行量化评估。文献[49]提出了一种将抗毁性分析与模型分层相结合的方法，它将各个抗毁指标结合在

一起，以状态形式反映抗毁性，但缺乏量化指标；文献[50]利用德尔菲法（Delphi）对网络抗毁性的指标进行综合，利用模糊运算求出网络生存性综合量化性能，然而依靠专家经验赋予权重太过主观，不能得到客观的性能指标；在文献[51]中，权值分配的方法能够客观反映多目标的网络抗毁性能，但只是适应静态拓扑网络。

上述抗毁评估利用这些定量描述的概念，并利用模型检测、贝叶斯分析、概率论和其它数学方法针对地面移动自组网进行了抗毁性的定量分析。

对于卫星网络的抗毁性评估，相关的文献比较少。文献[52]最早提出了关于卫星网络的抗毁性的评估方法，A.B.Glenn 最早在文献[53]中对卫星网络的抗毁性评估指标进行了研究，提出了网络传输性能因子作为衡量网络性能抗毁度量标准，网络性能传输因子 Factor=throughput/ mean transmit time 定义为在平均传输延迟下的网络吞吐量。文中列出了网络抗毁性能与归一化网络传输性能因子之间的性能关系曲线；同时文中还从抗毁成本角度提出了网络的建设成本与敌方破坏所带来的成本之比作为抗毁性能度量标准，并列出了网络抗毁性能与此参数之间的性能关系曲线。文献[54]和[55][56]针对 Walker 星座的卫星通信网络模型提出了抗毁性能评估的方法，文献[54]从拓扑结构的角度对网络抗毁性进行了研究，文献[55]从通信流量特性方面对抗毁性进行了仿真研究。文献[56]认为网络拓扑结构和网络流量是同等重要的，基于拓扑结构的度量方法反映了网络的物理特性，基于通信量特性的度量方法反映了网络的性能特性。文中结合文献[54]和文献[55]中的方法提出了一种新的抗毁性度量评估的措施，将网络拓扑结构抗毁性和网络性能抗毁性综合起来考虑，提出了对两者进行加权求和的评估方法并对此进行了仿真。文献[56]提出了包括微观、中观、宏观三个研究层次的空间信息网络抗毁性研究方法，将人的认知、心理等行为纳入抗毁性研究，对空间信息网络抗毁性进行建模，然后利用建立的模型对空间信息网络抗毁性进行了实例仿真和评估。

以上的文献中的抗毁性评估模型，以及其中定义的抗毁性参数，能在一定程度上描述网络可能遭到的破坏和被最大程度破坏后剩余部分的工作状态，但是针对高速动态变化的卫星网络这一特殊应用环境，如何结合网络的拓扑特征和业务特征选择最佳的抗毁性参数，建立相应的抗毁性评估模型和参数就显得尤为重要。

3.2.2 网络抗毁方法的研究现状

对网络抗毁性研究的目的是为了提高网络的抗毁性，从而使网络能够提供更好的服务。前面提到，提高网络抗毁性的措施不止一种，基本思路是“预防”与“恢复”。主要的通用的网络抗毁方法有以下几种：

1) 利用备份机制提高网络的恢复能力

在网络通信过程中如果节点或链路发生了故障，那么通信将无法进行。为了使用户能够继续得到服务，利用备份节点或备份链路来恢复通信是一种常用并且十分重要的手段。

当网络中的某个卫星节点失效以及某条链路故障时，为了使用户感觉不到故障的发生，可以采取为网络中的节点通信安排合理的备份通信路径，使卫星网络的路由快速应对此变化，选择最短备份路径，使通信迅速恢复，不影响卫星网络的整体性能，减少网络故障对用户的影响。文献[57]对 ATM 网络中的各种冗余备份情况进行了分析，得出了相应的结论。

2) 利用各种网络新技术提高网络的抗毁性

借鉴 ATM 网络、Ad hoc 网络的组网技术，利用各种自愈技术、动态路由技术和自配置技术提高网络的抗毁性已经成为研究的热点。

网络自愈技术可以大大提高网络的连通率，其实现方式主要有环状的网络结构和动态路由技术。**SDH** 网络的环状结构为网络的自愈提供了备份路径，并且已经实现了切换时间只有几个微秒。动态路由技术的快速发展使得网络抗毁性的提高得以实现，在设计路由技术时一方面要考虑故障链路或节点的影响，选择连通概率最高的链路，减小网络发生连通故障的概率，另一方面，在设计路由算法时可以为节点之间计算 N 条满足相应 QoS 约束的路径。动态路由技术的最新进展是基于多协议标签交换 **MPLS** 的方法。这种方法通过结合固定标记交换和复杂的选路协议实现了非常复杂的网络管理、流量工程和自愈恢复。

网络自配置技术就是网络根据目前的状态和故障情况，重新选择配置参数，对网络进行重新自我配置，实现网络的快速恢复，从而提高网络的抗毁性。

3) 利用网络管理技术提高网络的抗毁性

任何网络的网络管理系统都是整个网络的核心，一旦网络管理中心被毁，整个网络就会瘫痪，所以利用各种网络管理技术来提高网络抗毁性的研究也日渐深入。

文献[57]提出了采用 **CORBA** 技术实现的一种可靠的网络管理系统。其利用 **CORBA** 的命名服务器、事件信道和一些别的内建的重要组件来实现的容错方法，当发生系统能够容忍的故障时，系统会通过这种容错方法屏蔽这些故障，使用户感觉不到故障的发生，提高了整个网络的抗毁性。

为了适应网路抗毁性对网络管理的要求, 网络管理系统的结构也从原来的集中式的管理结构逐渐向分布式管理的结构转变, 通过文献[58]的分析可以看出, 分布式网络管理结构在管理性能、应用程序的可测量性、网络监测和数据搜寻等方面均比集中式网络管理有更多的好处, 并且可以增强网络抗毁性的结果。

任何单一的一个指标都无法全面、客观地描述网络的抗毁性, 从大的方面来说, 抗毁性的参数评估主要分为两大类: 一类是用来对网络拓扑结构进行评估的参数, 一类是用来对网络的通信量以及通信性能进行评估的参数。前者反映了网络拓扑结构受故障影响的程度, 后者反映了网络通信受故障影响的程度, 前者是后者通信抗毁性和抗毁性的基础, 能够直接反映网络抗毁性和抗毁性的性能。本文首先基于对网络节点重要度的分析评估, 提出一种适应卫星网络拓扑结构的抗毁性评估方法。

3.3 卫星网络拓扑结构抗毁性评估标准

通过上述介绍可以看出, 已有的一些通信网抗毁性分析成果存在以下不足: 不能对节点数不同的网络间的抗毁性进行分析和比较、没有结合节点本身的重要性对节点重要度评价从而导致无法正确评价节点重要度等不足, 本文在已有的分析方法基础上, 给出了一种基于节点的网络拓扑结构抗毁性评价改进方法, 并验证了该方法的有效性。

3.3.1 节点重要度测度方法

节点的重要性通常通过节点在网络中的位置和连接方式的属性来体现, 但网络有时赋予某些节点特殊的意义, 此时节点的重要性需要特殊考虑。目前, 对网络节点重要性的测度指标主要有两类: 一是节点局部连接属性测度, 二是节点全局位置属性测度。前者测度中典型的指标是节点的度和节点的聚集系数, 后者测度的典型指标是介数和以平均最短路径损失、不连通分支数、生成树的数目等为基础的复合指标。文献[58]一文提出了一种改进的节点删除法来评估网络节点重要度, 以节点删除对网络拓扑造成的边数和全网效率下降程度为节点重要度衡量指标, 综合考虑了节点的连接度以及节点在网络拓扑中的位置。对于本文的网络, 采用节点度和节点凝聚度综合加权的方法定义节点的重要度, 主要考虑了节点在网络中的位置以及连通功能来定义节点的重要度, 然后在节点重要度的基础上建立了网络抗毁性测度指标^[59]。

为方便起见, 下面参考相关文献给出本文将要用到的概念和符号。网络在数学上可以描述为一个图 $G = \langle V, E \rangle$, G 为由顶点和边构成的图, 其中 $V = \langle v_1, v_2, \dots, v_i, v_n \rangle$ 是网络的顶点集, $E = \langle e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m \rangle$ 表示边的集合, 图的边对应网络的链路。 $n = |V|$

表示节点数量, $m = |E|$ 表示边数量。 k_i 表示节点 i 的连接度, c_i 表示节点的连通度, d_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度。

为简便起见，以便研究与分析，对网络做出以下几点假设。

(1) 假设网络中的所有节点只存在故障与正常两种状态，不存在除此以外的第三种状态；

(2) 真实环境中，因链路连接方式多，损毁难度大且效果不明显，故本文着重研究基于节点的网络抗毁性，假设链路不会损坏，一旦节点损坏，与之相关联的所有链路同时失效；

(3) 假设所有节点工作状态相对独立且互不影响，每个节点的生存概率 p_i 存在两种情况，即蓄意攻击和自然破坏，则 p_i 为节点在该情况下正常工作时间与总运行时间之比的期望。

定义 1

节点 v_i 的度 k_i 定义为与该节点相连的边的数量。

定义 2

节点的连通度 c_i 是与该节点直接相连的顶点之间的边的数量的总和。这一指标反映的是节点的局部连通属性，是 0 与 $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$ 之间的整数。

定义 3

节点的凝聚度定义为下式所示：

$$ck_i = \frac{k_i(k_i-1)}{2c_i} \quad (\text{式 3- 1})$$

通过定义 2 的描述可知，节点的凝聚度 $ck_i \geq 1$ ，当 c_i 越大，表明节点的局部连通性越好，节点自身的重要性越小，删除此节点给网络连通性带来的影响越小，因此，节点的凝聚度 ck_i 是节点重要度的正向评价指标。当网络中的节点连通度 $c_i=0$ 时，定义节点的凝聚度是一个无穷大的整数，表明此节点不能被其他节点所替代，在整个网络中有着重要地位。

定义 4 节点的重要度 $Im(v_i)$ 定义为下式：

$$Im(v_i) = 1 - (\alpha * \frac{1}{k_i} + (1-\alpha) * \frac{1}{ck_i}) \quad (\text{式 3- 2})$$

即网络节点重要度是节点度与节点凝聚度的加权和，这个指标较全面地反映了节点的连接形式和结构形式。 α 为调节两者之间权重的系数因子，可以通过网络拓扑结构的特点以及研究经验来综合确定。相对于其他重要度测度指标具有直观、计算量小和综合性强的特点。节点重要度 $Im(v_i) \leq 1$ ，值越大，反映出节点越重要。在下文的计算中， α 取 0.5。

例：设某网络的拓扑结构如下图所示。

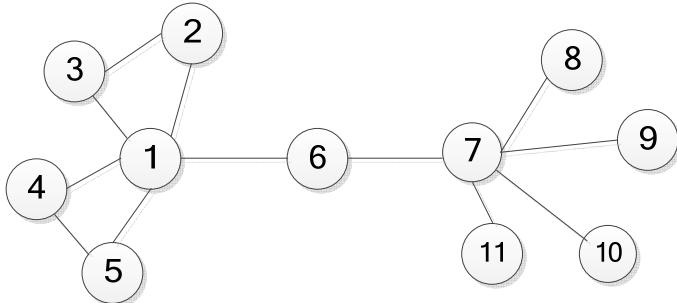


图 3-1 一种网络拓扑结构示意图

从图 3-1 的拓扑结构可以看出，节点①和⑦的度是相同的，在网络中的位置基本相同，如果只考虑节点的度来定义节点的重要度，则两节点的重要度是一样的，若采用本文的重要度判断方法，可知节点①没有节点⑦重要，因为删除或者收缩节点后，节点⑦的连通效率比节点①高。

通过上述的节点重要度定义方法可以看出，节点 i 的重要度不仅与节点的连接度数相关，还与节点在网络中的位置相关，在同样的连接度数的条件下，凝聚度越大的节点重要度越大，该节点删除或收缩以后对网络拓扑的影响越大，处于相对重要的一个拓扑位置。

在某些情况下，在网络拓扑中通常会对某些节点赋予特殊的含义，因此在上述评价的基础上需要引入节点本身物理特性所带来的节点重要度的影响，对式 3-2 计算得出的结果按照每个节点的物理特性赋予不同的权值，进行改进可得：

$$Im(v_i) = \left[1 - (\alpha * \frac{1}{k_i} + (1 - \alpha) * \frac{1}{ck_i}) \right] \times q_i \quad (式 3-3)$$

在式 3-3 中， q_i 表示节点 i 的物理属性所带来的对节点重要度的影响权重。这样，在节点重要度的定义中，既考虑了节点本身的物理属性，又考虑了其在网络中的全局和局部位置属性，可以更加准确的对其重要度进行评估。

3.3.2 基于节点重要度的抗毁性测度方法

抗毁性是指网络在遇到干扰或破坏时仍能保持比较稳定的状态的性质，反映了网络系统的顽健性和稳定性。我们知道全连通网络是抗毁性最强的网络，但是由于建设成本比较高等因素，现实中的网络很少会采取全连通网络。在文献[60]中提出了将网络抗毁性评价的着眼点放在待评价网络结构与全连通网络的结构差异上，对于重要度的评价采用基于最短路径数的与跳面节点法相结合的多指标评价的方法，本文对此进行改进，首先基于节点自身重要性提出了基于节点度和节点凝聚度的重要度评价方法，然后建立了全网平均等效抗毁性测度的网络抗毁性评价模型，得出了网络归一化抗毁指标的计算方法。

假设网络中的节点总数为 n ， t 是使网络完全失去连接（所有节点之间没有连接，

节点均是孤立的)之前必须删除的节点数量,那么网络的抗毁性测度指标表示在网络变为完全孤立之前的连通度之和,可以表示为下式:

$$SM(G) = \sum_{k=0}^{t-1} CM(k) \quad (\text{式 3- 4})$$

上式中 $CM(0)$ 为网络 G 的连通度, $CM(1)$ 表示从网络中删除一个重要节点之后的网络的连通度,以此类推, $CM(t-1)$ 表示从网络中删除 $t-1$ 个重要节点之后的网络的连通度, $CM(k)$ 可以表示为下式:

$$CM(k) = \sum_{i=1}^{n-k-1} \sum_{j=i+1}^{n-k} CT_k(i, j) \quad (\text{式 3- 5})$$

$CT_k(i, j)$ 是网络 G_k 中节点 i 与节点 j 的连通度, $n-k$ 是 G_k 的节点数。节点 i 与节点 j 之间的连通度可以通过下式进行计算:

$$CT_k(i, j) = \sum_{l=1}^x \frac{1}{TS(l)} \quad (\text{式 3- 6})$$

x 是节点 i 与节点 j 之间的独立路径的数目, $TS(l)$ 表示这些路径的跳数。将式 3-5 和式 3-6 代入式 3-4 可以得到 $SM(G)$, 对网络的抗毁性进行评价。

将式 3-4 得出的值与全连通网络的网络抗毁性测度指标进行比较,假设节点个数为 n 的网络为全连通网络,则只有当删除 $n-1$ 个节点只剩余 1 个节点时网络才成为节点孤立的网络,则由 3-4 式可以得到全连通网络的抗毁性度量指标为:

$$\begin{aligned} SM(G') &= \sum_{k=1}^n CM(k) \\ SM(G') &= \sum_{k=1}^n \left(C_k^2 \times \frac{k}{2} \right) \end{aligned} \quad (\text{式 3- 7})$$

由式 3-4 和式 3-7 可以得出网络的归一化抗毁性度量指标为:

$$\eta_a = \frac{SM(G)}{SM(G')} \quad (\text{式 3- 8})$$

即按照公式 3-8 定义,抗毁性指标 $0 \leq \eta_a \leq 1$, 抗毁性度量指标与网络抗毁性成正向关系, η_a 越大,则认为抗毁性越强。

根据上述的定义,首先计算出每个节点的重要度指标,然后计算从网络节点完整到节点逐步失效的网络连通性,将其连通性能之和作为整个网络抗毁性的度量值。对抗毁性指标的考量除了考虑网络节点完整时的抗毁性能,还包括了节点逐个失效时它

们的抗毁性能，并且节点失效时是按照节点重要度的顺序首先使最重要的节点失效；通过归一化抗毁度量指标的计算可以用来比较不同节点个数的网络的拓扑结构的抗毁性，即算法通过度量实际网络和全连通网络的结构差异，解决了节点数不同网络之间抗毁性比较的问题。

3.3.3 典型拓扑验证

为验证该方法的有效性，选取两个典型的拓扑—图 3-2 (a) 和图 3-2 (b) 所示的网络作为实验的网络拓扑。之所以选这两个拓扑，是因为这个拓扑结构具有比较典型的代表性。下面对这两个典型的拓扑结构的抗毁性进行研究。

图 3-2 (a)、(b) 分别由 8 个节点和 9 个节点组成。

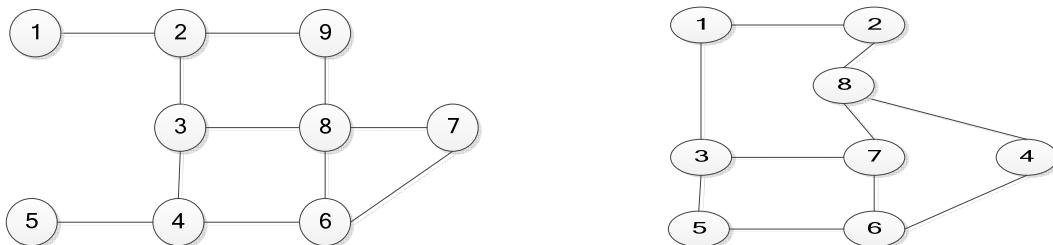


图 3-2 (a) 拓扑结构 G1

图 3-2 (b) 拓扑结构 G2

对于图 3-2 (a) 和 (b) 的拓扑结构，假定各节点权重相同，均为 1，经过计算各节点的重要度分别计算如下：

表 3-1 (a) 拓扑结构 G1 各节点重要度

节点号	重要度
1	0.5
2	0.84
3	0.84
4	0.84
5	0.5
6	0.67
7	0.375
8	0.79
9	0.75

表 3-1 (b) 拓扑结构 G2 各节点重要度

节点号	重要度
1	0.75
2	0.75
3	0.84
4	0.75
5	0.75
6	0.84
7	0.84
8	0.84

利用 3.3.2 节的计算方法对两个网络拓扑 G1 和 G2 的抗毁性测度计算结果如下：

表 3-2 网络拓扑结构 G1 抗毁性测度计算

网络拓扑结构	网络 G 的连通度 CM (k)	重要度
G ₁	CM (0) = 39.2	(0.5, 0.84, 0.84, 0.84, 0.5, 0.67, 0.375, 0.79, 0.75)
删除节点 3	CM (1) = 22.3	(0.5, 0.75, 0, 0.84, 0.5, 0.75, 0.5, 0.84, 0.75)
删除节点 8	CM (2) = 8.6	(0, 0, 0, 0.84, 0.5, 0.5, 0, 0, 0.5)
删除节点 2	CM (3) = 2	(0, 0, 0, 0.75, 0.5, 0.5, 0, 0, 0)

删除节点 4	所有节点孤立	(0,0,0,0,0,0,0)
SM(G_1)	72.1	
η_a	0.13	

表 3-3 网络拓扑结构 G_2 抗毁性测度计算

网络拓扑结构	网络 G 的连通度 $CM(k)$	重要度
G_2	$CM(0) = 28.8$	(0.75,0.75,0.84, 0.75,0.75,0.84,0.84,0.84)
删除节点 3	$CM(1) = 14.7$	(0.5,0.75,0, 0.75,0.5,0.84,0.75,0.84)
删除节点 6	$CM(2) = 10.7$	(0.5,0.75,0, 0.75,0,0,0.25,0.67)
删除节点 2	$CM(3) = 2.5$	(0,0,0, 0.75,0,0,0.5,0.75)
删除节点 8	所有节点孤立	(0,0,0,0,0,0,0)
SM(G_2)	56.7	
η_a	0.21	

从实验分析结果可以看出本文提出的抗毁测度算法可以对具有不同节点数的网络进行评估，网络 G_1 抗毁性比 G_2 弱。这是由于 G_1 中节点 3 和 8 处于网络的中间位置，如果这两个节点一旦受到攻击而失效，会导致网络拓扑结构被割裂成两个部分，网络会陷入瘫痪， G_1 的抗毁性较差。显然 G_2 抗毁性比 G_1 强，符合实际情况。

3.4 网络业务通信抗毁性评估标准

在研究网络的抗毁性时，不能仅仅简单地分析网络拓扑结构的抗毁性，还必须结合网络中的传输业务进行分析，才能较为准确地衡量这个网络的抗毁性。基于网络拓扑结构的抗毁性评估反映了网络的物理特性，而基于通信容量的抗毁性评估反映了网络的传输性能。网络系统通信时的抗毁性主要取决于所采用的路由算法、通信量分布以及网络元素的可靠性^{[61][62]}。网络元素的可靠性与节点以及链路自身的抗毁设计有关，主要包括节点自身的可靠度、故障容错设计等，不在本文研究范畴，下面主要针对网络中路由算法的设计分析网络中通信抗毁度的评价方法以及本文的双层卫星网络的抗毁测度验证。在网络中通过路由算法来提高网络抗毁性的方法通常是在网络中采取备用路径，这样在节点或链路故障时，利用已知的备份迂回路径尽量多地传送受影响的通信。具有备份迂回路径的抗毁性测度方法主要是建立在无备份路径抗毁性测度方法的基础之上的，因此，下文首先介绍无备份路径的网络抗毁性测度方法。

3.4.1 无备份路径的网络抗毁性测度方法

在卫星网络遭到破坏时，如果网络没有提供一定的策略对通信提供保证，网络中没有具有冗余容量的备份路径，则称为无备份容量测度。某一时刻无备份容量卫星系统的抗毁性测度计算如下：

与 3.3 节定义一致，假设链路不会损坏，一旦节点损坏，与之相关联的所有链路

同时失效，设每个节点能正常工作的概率为 p_i ($i=1,2,3,\dots,n$)。网络通信的抗毁性测度值为：

$$\eta_b = \frac{c_1}{c_2} \quad (\text{式 3- 9})$$

在公式 3-9 中， c_1 表示在网络中通信节点发生故障时的所有节点对之间能传送的通信量之和， c_2 表示在网络完好时所有节点对之间能传送的通信量之和。由 η_b 的物理含义可知， $0 \leq \eta_b \leq 1$ ，值越大，说明抗毁性越好。

假设节点 i 与节点 j 之间有 k 条链路，从节点 i 到节点 j 之间的通信链路 k 所依次经过的节点依次为： $V_{a0}, V_{a1}, \dots, V_{aj-1}, V_{aj}$ ， T_{ii+1} ($i=0,1,2,\dots,j-2,j-1$) 为 V_{ai} 到 V_{ai+1} 链路上的通信量， R_{ijk} 为经过路径 k 的两节点 i, j 之间的通信量（即剩余带宽）， D_{ii+1} ($i=0,1,2,\dots,j-2,j-1$) 为 V_{ai} 到 V_{ai+1} 链路上的传输时延， S_{ijk} 为通信链路 k 的两节点之间的传输时延， C_p （节点对间抗毁性）为当前时刻通信节点对 (i, j) 间可被网络传送的通信量的百分数， η_b （整个网络系统的抗毁性）为当前时刻可被网络传送的整个网络通信量的百分数。

$$S_{ijk} = \sum_{i=0}^{j-1} D_{ii+1} \quad (\text{式 3- 10})$$

$$R_{ijk} = \min T_{ii+1} \quad (i=0,1,2,\dots,j-2,j-1)$$

$$P[k] = \prod_{i=0}^{j-1} p_i \quad (i=0,1,2,\dots,j-2,j-1) \quad (\text{式 3- 11})$$

$$C_p(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^j R_{ijk} P[k]}{\sum_{k=1}^j R_{ijk}} \quad (\text{式 3- 12})$$

$$\eta_b = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sum_{i,j,k} R_{ijk} P[k]}{\sum_{i,j,k} R_{ijk}} \quad (\text{式 3- 13})$$

在上述公式中，各变量的含义定义如下：

$P[k]$ —路径 k 存在的概率；

N—节点数量；

L—是为节点对所规定的路径数量的最大值，此处取 1；当路由算法无备份容量时，k 取值为 1。

3.4.2 具有备份路径的网络抗毁性测度方法

当网络中有备份路径且备份路径拥有备份容量时，网络抗毁性测度就变得更加复杂。这是由于备份容量是为所有通信链路所共享的，所以在出现多个故障情况下，不同业务对的备份路径彼此相互关联。如果考虑网络中所有的可能故障状态，为每个故障状态下的业务确定最佳备份路径，即使面对中等规模的网络，计算也是不容易的。其实，在计算中，我们没必要考虑所有网络故障状态并为其计算备份路径，因为，一般在卫星网络中网络节点的可靠性是比较高的，多个网络元素同时出现故障的概率是很小的。下面我们针对某一时刻的网络抗毁性测度，给出一般性的抗毁性测度算法：

$$R_{ijk'} = \min(T'_{ii+1}, R_{ijk}) \quad (i=0,1,2,\dots,j-2,j-1) \quad (\text{式 3- 14})$$

$$C_p(i, j) = \frac{\sum_k R_{ijk} P[k] + \sum_{k'} R_{ijk'} P[k'](1 - P[k])}{\sum_k R_{ijk}} \quad (\text{式 3- 15})$$

$$\eta_b = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sum_{i,j,k} R_{ijk} P[k] + \sum_{i,j,k'} R_{ijk'} P[k'](1 - P[k])}{\sum_{i,j,k} R_{ijk}} \quad (\text{式 3- 16})$$

在上述公式中，各变量的含义定义如下：

k' ——当前时刻节点对的备份路径数，备份路径数的选取根据 S_{iik} 的大小进行排序，选择在 QoS 指标允许范围内的备份路径；

$P[k']$ ——路径 k' 存在的概率；

$R_{iik'}$ ——经过路径 k' 的两节点 i、j 之间的通信量。

网络业务通信抗毁性度量函数 η_b 刻画了无备份路径和具有备份路径两种情况下节点故障对网络连通性和时延特性的影响，也就是说，针对不同的业务负载、通信量和不同的备份路径，同一种网络结构对于网络抗毁性的贡献是不一样的，如何选取当前通信路径的备份路径，以及在多个网络故障状态与网络通信抗毁性的关系是下文要解决的重点。

3.4.3 基于“最佳搜索”原则的备份路径建立机制

从上述分析可以看出，网络业务通信抗毁性的目的就是在任何时刻网络出现故障

时，仍能尽量多地进行通信量的传送。由于不同业务对的备份路径彼此相互关联，因此，在节点或链路故障时如何选取建立备份路径是需要考虑的重点。本文通过分析研究提出了“最佳搜索”原则，即所规划的路由路径最短和尽可能多地恢复业务。下文详细描述了此原则的实现过程。

首先图 3-3 给出了一个 N 节点的网络中 (x, y) 之间的网络流模型，网络中链路的权重用一个二维向量来表示，二维向量包含该链路的承载业务量（第一分量）和该链路的最大容量（第二分量）。

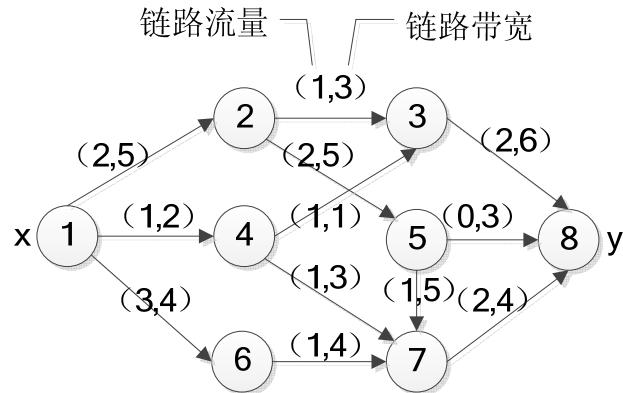


图 3-3 网络业务流模型 1

显然，由图 3-3 所示，节点 x 与 y 之间有许多条路径，选择具有最大剩余链路带宽的路径为： $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ ，这条路径最不可能导致拥塞，如果考虑节点 x 与 y 之间最大化利用每条链路的剩余容量，则路径的选择为： $1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ 。在网络中选择备份路径时，不仅要考虑链路的传输容量，而且要考虑业务的传输时延，特别是对于多层卫星网络中的 MEO 或 GEO 层卫星节点，链路传输时延在很大程度上影响着系统业务的 QoS 要求。所以，将链路传输时延作为链路选择的考虑因素之一，这样，任意一条链路的权重用一个三维向量来表示，前两个分量不变，增加了一个表示该链路传输时延的分量。

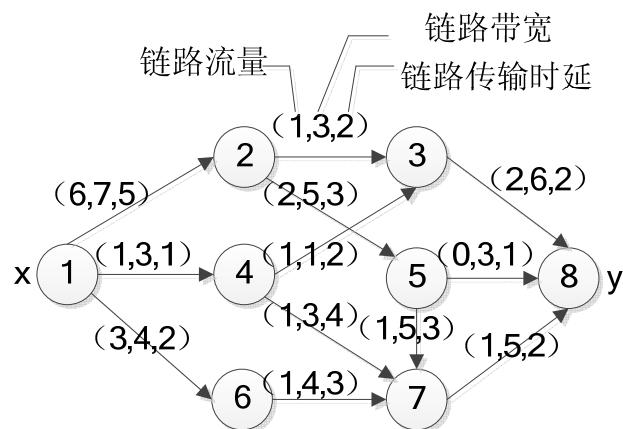


图 3-4 网络业务流模型 2

由图 3-4 所示，如果考虑到节点的传输时延，可以根据不同的流量分配方案，得

到不同的网络时延开销。如果选择最小传输时延的路径，则第一优选路径为： $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 8$ ，次优备选路径为： $1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ 。第一优选路径传输时延为 5，次优备选路径传输时延为 7。

上述仅是通过传输时延来定义备选路径，然而当节点或链路失效时，不能仅仅通过传输时延来选择路径，由于网络业务通信的抗毁性反映在网络在故障情况下能够传输的业务通信量的大小，因此，在选择备选路由时，应依据“最佳搜索”的原则来建立备选路径，即传输时延最短的情况下能使尽可能多的业务得到恢复。其实现过程为：

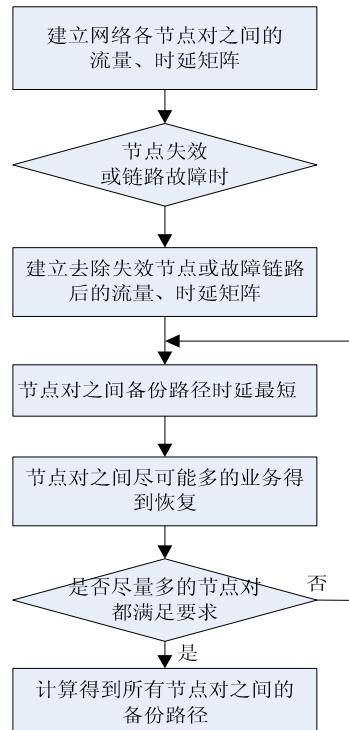


图 3-5 “最佳搜索”原则备份路径建立机制工作过程示意图

3.4.4 典型拓扑计算

下图为一个典型的 4 节点的网络，6 个业务对，链路上的标示与前文定义一致，用一个三维向量来表示。

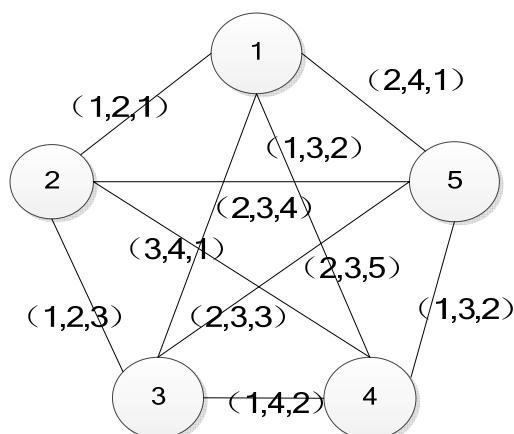


图 3-6 一个 4 节点的网络拓扑示意图

在选择备份路径时，按照上述介绍的“最佳搜索”的原则进行计算，则图 3-6 所示的网络拓扑各节点之间的优选路径与 1 个节点故障时的备份路径（简略起见，这里不再一一列出 2、3、4 个节点故障时的备选路径）如表 3-4 所示：

表 3-4 每一节点对的优选路径和备份路径

节点对\故障	无	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
(1, 2)	1-2	—	—	1-2	1-2	1-2
(1, 3)	1-3	—	1-3	1-3	1-3	1-3
(1, 4)	1-2-4	—	1-5-4	1-2-4	—	1-2-4
(1, 5)	1-5	—	1-5	1-5	1-5	1-5
(2, 3)	2-3	2-3	—	—	2-3	2-3
(2, 4)	2-4	2-4	—	2-4	—	2-4
(2, 5)	2-4-5	2-4-5	—	2-4-5	2-5	—
(3, 4)	3-4	3-4	3-4	—	—	3-4
(3, 5)	3-1-5	3-5	3-5	—	3-5	—
(4, 5)	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	—

对于此网络拓扑，分别计算网络中有 1、2、3、4 个节点故障时的网络业务通信抗毁性测度值，以及随着节点可靠性变化的抗毁性测度值的变化情况。

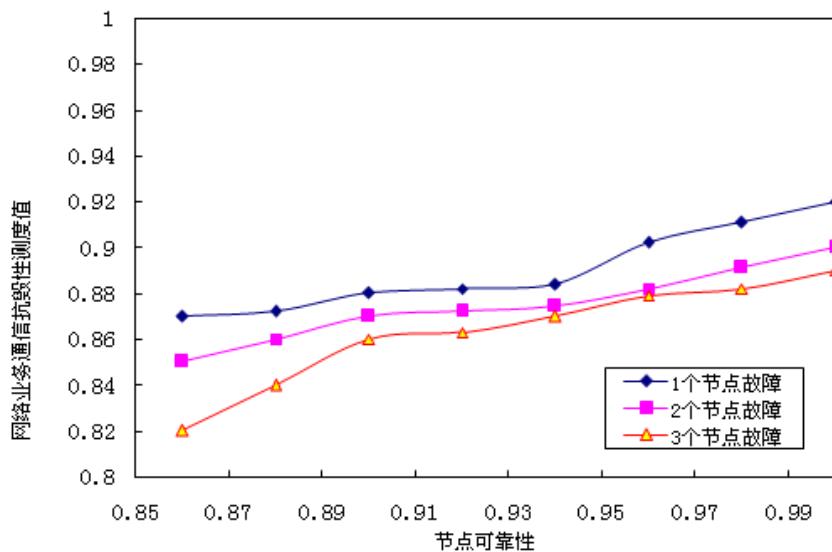


图 3-7 网络通信抗毁性测度值与网络中节点可靠性之间的关系示意图

图 3-7 的仿真结果表明不仅表明链路和节点越可靠，则网络抗毁性越强，而且表明当网络故障状态越少，则网络的抗毁性越强。根据计算结果，当 $P_1=0.95$ 时， $\eta_{b1}=0.886$ ， $\eta_{b2}=0.878$ ， $\eta_{b3}=0.872$ ， η_{b1} 、 η_{b2} 、 η_{b3} 分别表示网络中出现 1 个节点故障、2 个节点故障、3 个节点故障时的网络业务通信抗毁性测度指标。

3.5 LEO&GEO 双层卫星网络抗毁测度描述

3.5.1 拓扑结构抗毁性测度验证

根据上文提出的网络抗毁性测度方法，首先对本文提出的双层卫星网络在 LEO 层卫星之间不具有星间链路的情况下进行抗毁性评估：

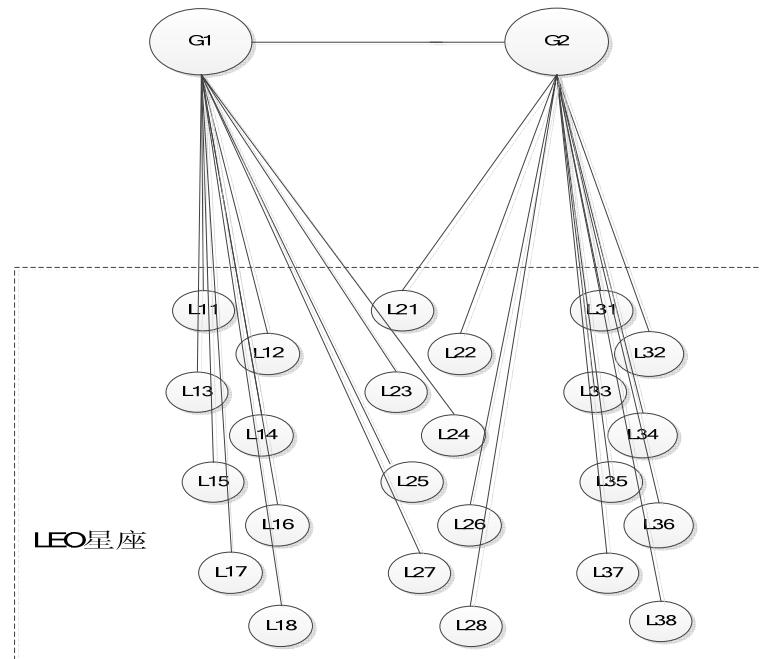


图 3-7 双层卫星网络（LEO 层卫星之间无星间链路）拓扑结构示意图

经计算，本双层卫星网络拓扑结构中各节点的重要度计算如下：

表 3-5 GEO 层卫星节点重要度计算结果

节点号	重要度
GEO 卫星节点 1	0.96
GEO 卫星节点 2	0.96

表 3-6 LEO 层节点重要度计算结果

节点号	重要度	节点号	重要度	节点号	重要度
Sat11	0.5	Sat21	0.5	Sat31	0.5
Sat12	0.5	Sat22	0.5	Sat32	0.5
Sat13	0.5	Sat23	0.5	Sat33	0.5
Sat14	0.5	Sat24	0.5	Sat34	0.5
Sat15	0.5	Sat25	0.5	Sat35	0.5
Sat16	0.5	Sat26	0.5	Sat36	0.5
Sat17	0.5	Sat27	0.5	Sat37	0.5
Sat18	0.5	Sat28	0.5	Sat38	0.5

在此网络拓扑下，很明显，GEO 层卫星节点具有比 LEO 层星座内各节点更重要的功能，因此，定义节点本身的物理属性带来的各节点的权重为：GEO 卫星节点权重为 1，LEO 层卫星各节点权重为 0.8，这样根据上表计算结果，利用 3.3.2 节的计算方法，可以得出本拓扑结构的归一化抗毁性测度值为：0.07，网络拓扑抗毁性非常低。

如果 LEO 层卫星之间具有星间链路，则其网络拓扑结构图如下图所示：

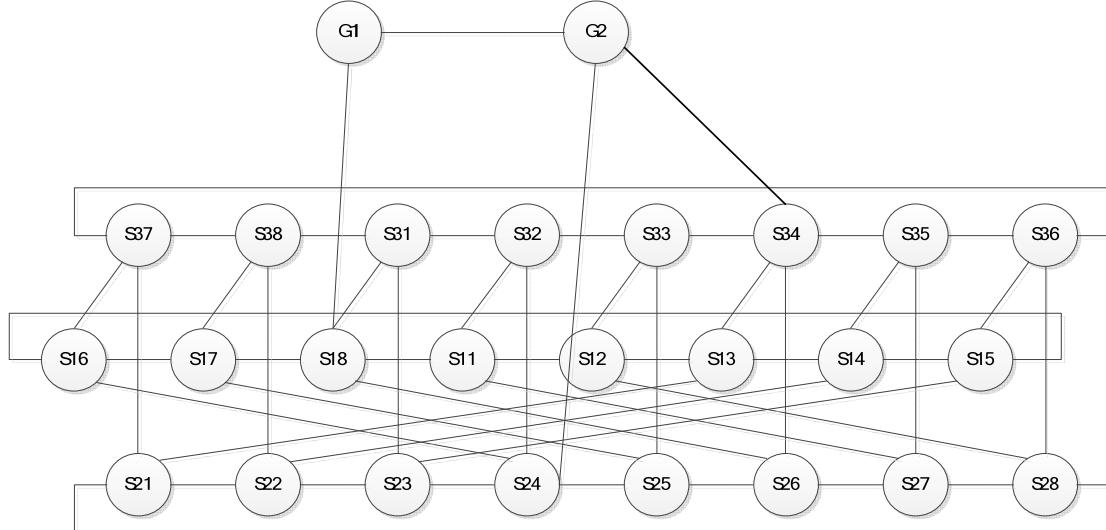


图 3-8 双层卫星网络（LEO 层之间具有星间链路）拓扑结构示意图

首先计算其重要度指标如下所示：

表 3-7 GEO 层卫星节点重要度计算结果

节点号	重要度
GEO 卫星节点 1	0.75
GEO 卫星节点 2	0.833

表 3-8 LEO 层节点重要度计算结果

节点号	重要度	节点号	重要度	节点号	重要度
Sat11	0.875	Sat21	0.875	Sat31	0.875
Sat12	0.875	Sat22	0.875	Sat32	0.875
Sat13	0.875	Sat23	0.875	Sat33	0.875
Sat14	0.875	Sat24	0.9	Sat34	0.9
Sat15	0.875	Sat25	0.875	Sat35	0.875
Sat16	0.875	Sat26	0.875	Sat36	0.875
Sat17	0.875	Sat27	0.875	Sat37	0.875
Sat18	0.9	Sat28	0.875	Sat38	0.875

根据上表计算结果，可以看出采用基于节点重要度的抗毁性评估标准，对于每一个簇中的簇头节点，其重要度计算值高于同簇中其他节点，这是因为在网络拓扑结构

中，簇头节点除了与同簇中其他节点相连之外，还与上层 GEO 节点具有连接关系，具有更大的连接度和凝聚度，由于簇头节点具有管理簇内其他节点以及与上层 GEO 节点通信的任务，因此理论上其重要度要高于簇内其他节点，因此实际计算结果与理论预期相符。但是，GEO 卫星节点重要度计算值低于 LEO 层卫星各节点，因此，在此种情况下，需要引入由节点物理属性所带来的节点重要度的修正。对于图 3-8 所示的网络拓扑结构，GEO 卫星节点、簇头节点、簇内一般节点的权重值分别定义为：[1, 0.8, 0.6]，这样，修正后的 GEO 卫星节点 1、GEO 卫星节点 2、簇头节点、簇内一般节点的重要度分别为：[0.75, 0.833, 0.72, 0.7]，根据上述公式的定义，可以得出本拓扑结构中的归一化抗毁性测度值为：0.20。与图 3-7 所示的无星间链路的拓扑结构相比，抗毁值明显增加，说明虽然增加星间链路增加了网络构建的成本，但总的抗毁情况得到大幅改善。

为了与其他网络的抗毁性进行对比，本文选取了 HSBN 方案的网络拓扑结构（4 颗 GEO 卫星与 8 颗 MEO 卫星、24 颗 LEO 卫星）、24 颗星组成的单层卫星网络拓扑结构（Single-layered Satellite Network，SLSN）作为分析对象，上述两种拓扑结构的网络拓扑示意如下：

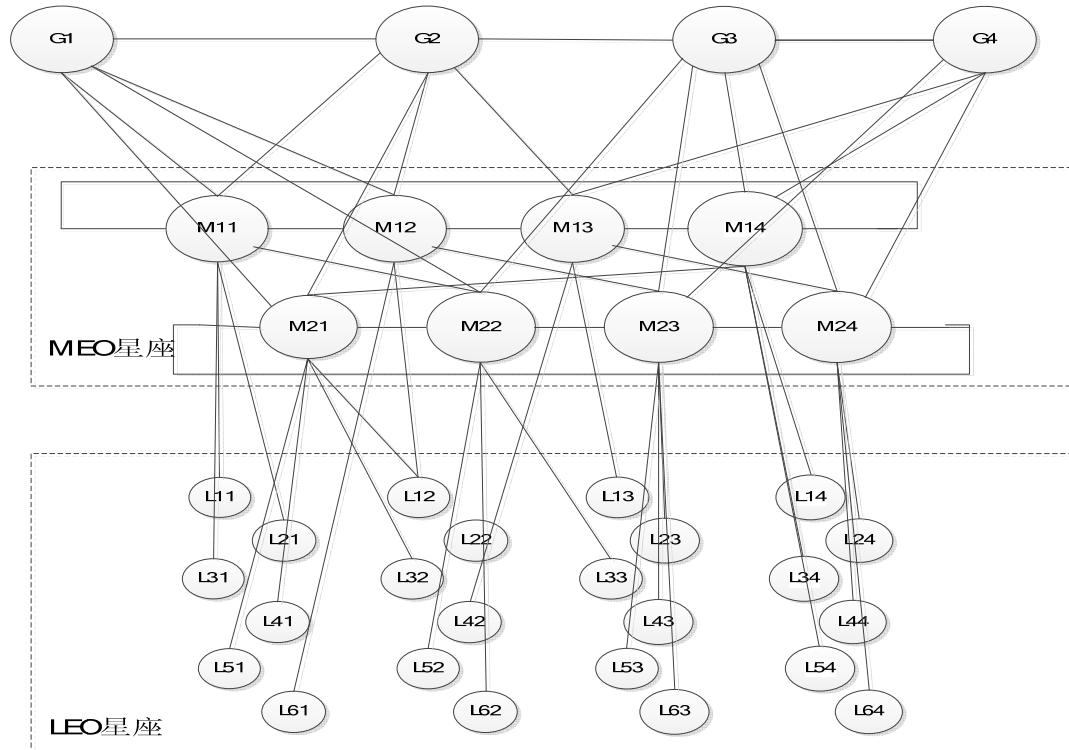


图 3-9 HSBN 方案网络拓扑结构示意图

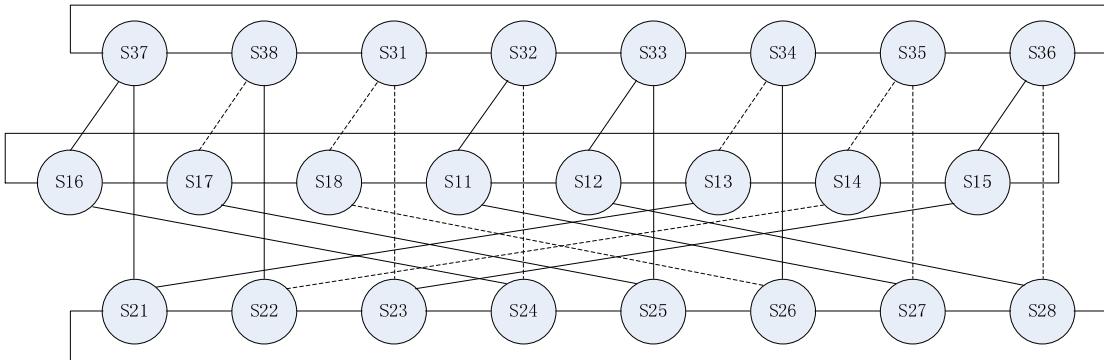


图 3-10 SLSN 方案网络拓扑结构示意图

表 3-9 HSBN 方案的节点重要度计算结果

节点号	重要度	节点号	重要度	节点号	重要度
GE01	0.71	GE02	0.71	GE03	0.71
GE04	0.71	ME011	0.88	ME012	0.88
ME013	0.88	ME014	0.88	ME021	0.88
ME022	0.88	ME023	0.88	ME024	0.88
Sat11	0.5	Sat21	0.5	Sat31	0.5
Sat12	0.5	Sat22	0.5	Sat32	0.5
Sat13	0.5	Sat23	0.5	Sat33	0.5
Sat14	0.5	Sat24	0.5	Sat34	0.5
Sat15	0.5	Sat25	0.5	Sat35	0.5
Sat16	0.5	Sat26	0.5	Sat36	0.5
Sat17	0.5	Sat27	0.5	Sat37	0.5
Sat18	0.5	Sat28	0.5	Sat38	0.5

表 3-10 SLSN 网络拓扑结构下各节点重要度计算结果

节点号	重要度	节点号	重要度	节点号	重要度
Sat11	0.875	Sat21	0.875	Sat31	0.875
Sat12	0.875	Sat22	0.875	Sat32	0.875
Sat13	0.875	Sat23	0.875	Sat33	0.875
Sat14	0.875	Sat24	0.875	Sat34	0.875
Sat15	0.875	Sat25	0.875	Sat35	0.875
Sat16	0.875	Sat26	0.875	Sat36	0.875
Sat17	0.875	Sat27	0.875	Sat37	0.875
Sat18	0.875	Sat28	0.875	Sat38	0.875

同样地, 定义各节点的权重对表 3-9 计算出的各节点的重要度计算结果进行修正,

GEO 卫星节点、MEO 卫星节点、LEO 卫星节点的权重值分别定义为：[1, 0.8, 0.6]，这样，根据上述公式的定义，可以得出多层强连接网络拓扑结构 HSBN 方案和单层卫星网络拓扑结构 SLSN 方案中抗毁性因素的取值分别为：0.21、0.27。经过计算，可以看到三个网络拓扑结构中具有星间链路的单层 LEO 卫星 SLSN 网络拓扑结构抗毁性最优，因为此拓扑结构为对称对等的拓扑结构，网络中每个节点的重要度是相同的，删除任意一个节点后对网络的连通性影响不大。而优化的 OHSN 网络与强连接的三层卫星网络 HSBN 网络相比抗毁性差别不大，说明 OHSN 网络相比 HSBN 网络虽然采用弱连接的方式，但由于低层 LEO 卫星网络具有星间链路，当 GEO 卫星失效时可以独立成网，几乎可以达到与 HSBN 网络相当的抗毁性。

将上述三个不同网络拓扑结构下的抗毁指标列表如下表 3-11 所示：

表 3-11 三种拓扑结构的抗毁度量结果

拓扑结构类型	η_α
OHSN 网络	0.20
单层卫星网络 SLSN	0.27
强连接的多层卫星网络 HSBN 网络	0.21

由上述分析可以看出，本文提出的 OHSN 网络从拓扑结构上来说与单层的 LEO 卫星网络抗毁性相比不相上下，相比强连接的 HSBN 网络几乎可以达到与其相当的抗毁性，但构建网络成本与 HSBN 相比由于节省了 MEO 轨道的投资成本，可以大大减少。

3.5.2 网络业务通信抗毁性测度验证

对于卫星通信网络，某一时间段内卫星网络的拓扑结构是固定的，可以根据此时刻的网络拓扑图，利用前文提出的网络业务通信抗毁性评估标准，对上文提到的几个网络进行网络业务通信抗毁性测度验证。

对于 3.5.1 节提到的三种通信网络即 HSBN 网络、OHSN 网络、SLSN 网络，为了比较其网络通信抗毁度，需要在同样的系统容量的情况下进行比较，并且假设网络中的备份路径均只有一条，当网络总的通信容量固定时，所有节点对之间可以传送的网络通信量与总的通信量的比值即为网络通信的抗毁性指标。

通过式 (3-14)、式 (3-15)、式 (3-16) 来计算基于“最佳搜索”原则的备份路径建立机制下的节点对间抗毁性 C_p ，进而计算出整个网络系统的抗毁性 η_b 。计算时假定网络中只有一个节点故障，故障的概率为 0.05，然后可以计算出网络通信的抗毁性测度值 η_b 。

表 3-12 三种拓扑结构的网络通信抗毁度量结果

拓扑结构类型	η_b

OHSN 网络	0.87
单层卫星网络 SLSN	0.80
三层卫星网络 HSBN 网络	0.85

下图仿真了本文提出的 OHSN 网络通信抗毁值与网络节点故障概率之间的关系。

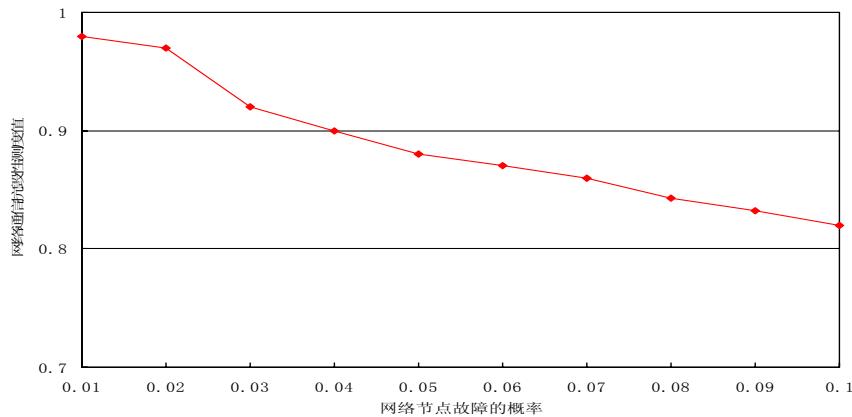


图 3-11 网络通信抗毁性测度值与网络中节点故障概率之间的关系示意图

通过上文的比较可以看出，双层卫星网络中由于上层节点对下层节点的覆盖关系，下层节点或链路的故障不会对网络拓扑结构和路由算法产生很大的影响，网络具有较好的可扩展性和稳定性，双层卫星网络的抗毁性能明显优于单层卫星网络，有着更优的通信性能。而 OHSN 网络的抗毁性能与 HSBN 网络相比，由于路径可替换性更强，性能更优。

从以上分析可以看出，未来的卫星网络既要求网络覆盖的全球性，又要求网络传输的抗毁性，而且还要求高质量的接入服务和提供 QoS 保证等。通过本章构建的卫星网络抗毁性评估模型和度量方法，可以看出本文提出的网络在网络结构设计上采用弱连接的方式，降低了网络设计的复杂度和设计成本，但与强连接的多层卫星网络相比，网络拓扑结构抗毁性与其相当，而网络通信抗毁性更优。

通过建立网络通信的抗毁性评估标准，量化的比较了不同拓扑结构的网络在具有备份路径的情况下抗毁性测度，从理论上更好的对网络的抗毁性进行评估，这对卫星网络拓扑的优化设计、网络评估、抗毁性路由的设计等都有着比较明确的指导意义。

3.5.3 提高抗毁性的方法

网络抗毁性的评估方法，根据上文的分析，主要从两方面入手：一方面对网络拓扑结构进行抗毁性评估，另一方面研究对网络的通信性能进行抗毁性评估，即在网络遭遇攻击或故障后，网络能够快速地收敛并恢复网络使网络不间断地提供服务，前者是后者的基础，只有具备一定的网络拓扑结构冗余，才能构建具有抗毁性的网络通信协议，网络才可能能够快速自愈。

网络拓扑结构的抗毁性评估我们引入了节点重要度评估方法，节点重要度评估可

以帮助我们在网络中发现关键节点，尽可能将关键节点弱化，或者采取保护措施对网络拓扑中重要度高的节点和链路进行相应的保护或升级，因为，一旦重要度高的节点遭受攻击或出现故障或拥塞时，网络性能下降很快，影响网络的可靠运行。

网络通信抗毁性评估标准采用基于业务的量度使得网络抗毁性与网络性能或网络业务传递能力相关联。网络通信抗毁性评估不仅考虑了链路的带宽分配，还考虑了网络资源的连通性分配和容量分配。由于卫星业务分布的不均匀性和突发性，卫星节点的实际业务接入量表现出高度的动态时变特性，即不同节点或不同链路在不同时刻的负载和对于网络稳定性的贡献是不一样的。接入或交换较大业务量的卫星或链路对于网络稳定性的贡献较大，因此在考虑通信抗毁性测度评估时，以重要链路之间的业务备份链路进行建模评估，可以较好的控制网络流量分配的函数。

通过上文的分析，本文提出的双层卫星网络从拓扑结构上由于定义了不同重要度的节点，因此在网络拓扑结构模型上并不是具有最优抗毁性能的拓扑结构，但是与具有强连接的网络拓扑结构相比，其通过消耗最大链路资源达到最优的网络稳定性的方法也并不是最可取的，本文的网络拓扑结构达到了一定的抗毁性能同时又没有过度地消耗系统的链路资源。在通信链路的抗毁性方面可以看出利用不同层卫星覆盖区域的差异，增加了链路选择的范围，可替换路径多，具有较优的抗毁性能。

3.6 本章小结

抗毁性研究的主要目的是为了客观、准确和有效地分析及评估卫星网络的抗毁性，发现网络中的安全隐患和薄弱环节，从而采取有针对性的措施来提高网络的抗毁性。本章通过对网络的抗毁性概念和影响因素进行分析，提出了网络拓扑结构和通信业务两方面的抗毁性测度，用来对某时刻网络的抗毁性进行全面、综合的定量评价。

网络拓扑结构抗毁性测度主要通过分析已有文献提出的网络抗毁性参数之间的相似性和优劣关系，针对现有的一些评估标准存在无法正确评价节点重要度以及不能满足不同节点数的网络间的抗毁性分析与比较等不足，本文通过节点自身的重要性和抗毁性并结合节点的全局和部分位置属性，提出了一种新的基于节点度和节点凝聚度的节点重要度评价方法，建立了全网平均等效抗毁测度模型，改变了原有评估方法只适用于某一种网络模型和相同节点数网络的现状。经过典型拓扑验证，该评估方法正确有效，为具有不同节点个数和不同连接关系的网络抗毁性评估提供了一个简单有效的计算方法和可靠的指标体系。

网络业务通信抗毁性测度主要从网络无备份路径和具有备份路径两种情况下网络节点或链路故障对网络所能传输的通信量受影响的程度进行建模分析。提出了“最佳搜索”原则的备份路径建立机制，建立了网络业务通信抗毁性测度模型，并得到了抗毁性指标的计算方法，并通过典型拓扑进行了验证分析。

本文定量的从网络拓扑结构和通信业务两方面提出了网络的抗毁性评估标准，评

估标准具有通用性，执行计算简单，对上文提到的几个典型的网络进行了测度验证，通过理论分析和验证结果证明，本抗毁评估方法有效可行，能准确地评估网络的抗毁性能。研究成果对卫星网络拓扑优化、网络规划设计、网络调整和网络评估都有着重要的指导意义。

第四章 LEO&GEO 双层卫星网络的动态路由技术

4.1 引言

路由策略是星座网络组网技术的一项重要内容。因为卫星同地面用户不断地相对运动，ISL 长度的不断变化，地面用户分布非均匀，ISL 上业务量差异很大等原因，不论从保证用户 QoS 角度，还是从系统维护者优化网络资源角度，自适应动态路由策略对于 ISL 主干网络来说是必不可少的。

由于构成卫星通信网络的卫星节点置于太空之中，一旦失效，几乎无法修复，特别是在未来的空间攻防中，卫星节点被动失效的概率大大增加，因此研究卫星网络中卫星节点失效对整个卫星网络的影响是专业领域一个十分关注的问题，其中具体表现之一就是对卫星网络中考虑卫星节点失效的路由问题。

综上，星座网络采用的路由策略应对网络实时状态具有自主适应性，同时路由管理应自主地对发生故障后的网络路由作出及时反应。因此本章在上文的双层卫星网络的组网架构和协议体制下，基于上述应用需求，提出了双层卫星网络的自适应的抗毁路由策略。

4.2 卫星网络路由策略概述

4.2.1 路由策略的实现难点

从路由域的角度出发，卫星网络路由可以划分为上/下行链路路由（UDL，Up/Down Link）和空间段路由，如图 4-1 所示。

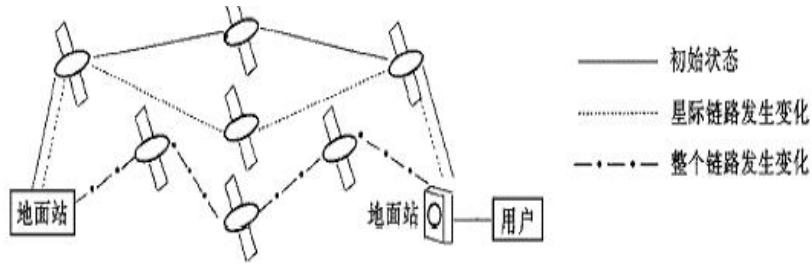


图 4-1 卫星网路由组成

上/下行链路路由（UDL）是卫星与地面信关站或移动用户之间的链路，负责各种用户到卫星网络的接入控制，为用户选择源端卫星和目的端卫星。通常情况下，UDL 路由相对比较简单，可以根据单星覆盖时间长短或信号强弱或链路负荷大小选择服务卫星并进行星间切换。

当前，有关卫星网络路由的研究集中于解决空间段 ISL 网络路由问题，空间段路

由负责在卫星网络内部源端卫星和目的端卫星之间计算满足一定需求的最优路径。

空间段路由属于点到点路由问题，点到点路由问题在地面网络中已经得到了很好的解决，但在由大量卫星组成的空间卫星网络中仍然是一个具有挑战性的问题。主要体现在以下几个方面：

（1）星上存储空间、处理能力以及能源等资源受限

由于受空间自然条件和卫星整星资源限制的影响，星载设备质量、功耗、星上处理资源和存储资源都受到很大的限制，而且卫星一旦发射就很难进行硬件升级，因此完全在星上维护、存储整个网络的链路状态是不现实的，但是如果由地面来维护整个网络的链路状态信息，又会造成信息不是非常精确的（可能是过时的）。因此，适用于卫星网络的路由算法必须具有较低的算法复杂度（包括计算复杂性、存储复杂性和通信开销等），只有这样，才能真正适用于卫星网络。

（2）网络拓扑持续动态变化导致频繁切换

卫星网络拓扑动态变化是卫星网络的一个基本特征。在动态变化的卫星网络中，一个多跳连接可能经过多跳 ISL，卫星的运动可能导致某一条或某几条 ISL 不可用，从而导致波束的切换或卫星的切换。重新选路不仅需要较大的信令开销和处理负载，而且会引起时延发生抖动，可能不能满足某些 QoS 业务的时延需求，导致通信终止，同时，重建路由需要的信令开销和处理负载也浪费资源。因此，要求路由算法具有高稳定性和快速收敛的能力。

（3）承载数据数据流量分布不均衡

地域和时区差异、星座运转及地球自转导致卫星网承载分布不均衡且具有时变特性的流量负载。卫星在沿轨道运行时，用户数目及流量在时刻变化着，这可能导致某些卫星承担流量非常轻，而某些卫星的负载已超出承受能力，进而阻塞呼叫。因此，路由协议应具有动态调整业务流量的能力，根据业务流量进行动态路由更新的能力。

（4）卫星网络分阶段发射，节点或链路存在失效可能

由于卫星建设成本比较高，因此卫星网络一般是分阶段分批发射，并且卫星发射之后存在卫星或链路失效可能，卫星个数可能增减，因此，路由协议应具有可扩展性和抗毁性。

4.2.2 路由策略的评价指标

一种有效的实用的卫星网络路由策略应该具有如下性质：

（1）网络拓扑变化的适应性。路由策略应该能适应卫星网络的动态变化，并应采取措施避免可能出现的路由环，或者在出现路由环时能够及时、有效的消除路由环带来的影响。

（2）抗毁性。当选路时出现卫星节点失效或者链路故障时，路由技术应该能有效避免由此带来的数据丢失。

(3) 低复杂性及高效性。路由技术或协议应尽量降低实施的复杂性，包括算法的计算复杂度、存储复杂度等，以较小的开销获得较大的传输成功率或系统吞吐量。

(4) 网络流量变化的适应性。路由技术应该能采取相应措施支持流量负载均衡以避免网络出现链路拥塞或节点拥塞，或者在出现拥塞时能够及时、有效地消除拥塞带来的不利影响。

因此，衡量卫星网络路由算法性能优劣的参数包括端到端时延、掉包率、时延抖动、复杂性等。选择路由策略的原则是在满足用户需求的基础之上尽量在这几个指标中达到一个平衡。

4.2.3 单层卫星网络路由策略技术

单层卫星网络路由策略根据不同的标准可以划分为不同的路由算法，下面主要介绍根据不同的标准划分的路由策略，以及其各自的优缺点及应用场合。

(1) 单层卫星网络路由策略根据信息是独立查找路径还是事先建立好路径分为类似 ATM 的面向连接的路由策略和基于 IP 的无连接的交换。早期，大多数低轨卫星网 LEO 的路由算法都是假定卫星网络是一个面向连接的网络结构，首先建立一条端到端连接的路径，后续通信一直沿着此路径传输。

Markus 提出 LEO 卫星网络动态拓扑离散状态路由算法^[63] (DT-DVTR: Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing)，此路由算法在通信过程中，源目的端卫星均被认为是 ATM 虚节点，用 VC/VPC 标示出不同路径，在星间链路间使用虚交换方式，是 ATM 技术在 LEO 网络中的应用。文献[64]中提到的 FSA 算法和文献[65]中提到的算法均以 ATM 信元在星间链路网络中进行传递，是属于上面所讲的 DVTR 路由策略的分支。

由于卫星网络拓扑结构动态变化，卫星高速运动，使得初始路径难以从根本上避免链路切换或连接切换，以及由此引起的一系列切换控制和重路由问题，使得基于面向连接的卫星网络路由计算开销大且星上实现困难。另外，由于现在地面网络多为无连接的 IP 网络，为了与 IP 网络的融合，还需要协议和数据格式转换等中间处理过程，这不仅带来了额外的时间和处理开销，而且使得系统实现更为复杂。因此，随着 Internet 的爆炸式增长，无连接的卫星路由算法逐渐成为研究的重点。无连接路由策略的优点有：1) 无连接的路由策略可以与地面 IP 网络很好的交融，可以很好的利用 IP 技术上的一些优点；2) 不用预先计算好路由，而是根据当前网络中流量负载、故障等情况实时地计算，并选择新的路由，具有很强的适应性；3) 在进行路由的过程中需要的存储空间很小，这样可以节省本来就很紧张的资源。

迄今为止，许多基于 IP 的单层卫星网路由算法被提出^[66~68]。其中 Akyildiz 提出分布式数据报路由算法 (DDR: Distributed Datagram Routing)，主要解决 IP 技术与

LEO 卫星网络结合问题，该算法用离散化地理坐标代表网络中每颗卫星，将路由策略分布在网络中单颗卫星上执行，以数据包时延最小为优化目标。

(2) 单层卫星网络路由策略根据计算路由的节点是由单个节点计算完成还是多个节点共同计算完成分为集中式路由策略和分布式路由策略。集中式路由策略由单个节点统一进行路由计算，当路径中某一节点发生意外失效或拥塞时，会遭受掉包，而分布式路由可以避免上述缺点，但如果设计不合理会造成环路以及较长的路由收敛时间。

文献[69]中提出了一种分布式的路由算法 CPDR (Compressed Path Information based Distributed Routing)，此路由算法基于路径信息压缩机制，使用分布式分层链路状态收集策略和简洁的信息编码机制，在不引入额外的信令开销基础之上能提供多路径路由能力，实现卫星网络中的流量负载平衡、优化网络带宽应用、提高星间链路利用率。

文献[70]中提出的分布式路由算法基于虚拟节点策略，每个数据包根据逻辑地址来独立寻路，由于该算法并没有考虑网络负载过高而产生网络节点失效时如何快速有效再寻路的问题，不再具有普适性，而且针对每个数据包进行独立寻路致使网络路由状态变化频繁，整个网络路由状态存在不稳定性。

Darting[71]算法和 LAOR (Location-Assisted On-demand Routing) [72]算法都属于分布式的基于数据驱动的路由算法。没有数据传送时不进行路由更新，数据包的到达触发拓扑更新，路由更新机制包括后继更新和前继更新两种，这种机制的优点是：在正常网络流量的情况下，性能优于普通路由算法。缺点是：当网络流量过大时，由于拓扑更新触发过于频繁，性能低于普通路由算法。

文献[73]提出了集中式路由算法 DSR-LSN 算法，即由源节点发起路由的按需路由算法。该路由算法基于洪泛路由的路由发现机制，利用路由发现、路由维护和地面站中介三个机制并配以路由缓冲区技术在某网络节点或链路失效的情况下能迅速寻找到一条通往目的节点的最短延迟路由，确保寻路过程的高效性。

文献[74]和[75]采用集中式路由策略，在分割好的静态拓扑下采取Dijkstra算法计算路径，算法中以传输时延和队列时延作为衡量链路的代价，因此，网络需要周期性传递各星间链路的状态信息。频繁的网络状态变化导致引入不可接受的花费，同时较高的传播时延带来最佳路径的计算误差。

(3) 单层卫星网络路由策略根据是否使用当前网络状态信息分为静态路由算法和动态路由算法。在静态路由中，无需根据网络状态信息计算最佳路径，相反，使用实时的网络状态计算路径则为自适应型路由算法。相对静态路由，自适应型路由算法能对网络拥塞进行调整，也能根据用户的要求找到合适的路径。

根据所用的网络状态信息范围，自适应型路由算法细分为两类：孤立式和非孤立式算法。仅仅根据本地节点信息调整路径（本地节点链路各信道占用情况等信息）则

为孤立式算法，而使用邻居节点链路状态信息或全网络节点链路状态信息为非孤立式算法。非孤立式算法使用的信息主要包括邻居节点或链路甚至全网节点或链路的故障信息、拥塞信息以及所处的空间环境信息等。非孤立式路由策略更为有效，但需要耗费网络宝贵的信道资源，路由协议开销大，系统较复杂，因此设计路由策略时需要较好地平衡路径的有效性和花费的代价。

上文第(1)节中文献[63][64][65]中提到的面向连接的路由算法均属于离线路由算法，即静态路由算法。均是通过把星座运行周期划分为有限个时间片，所有的路由计算均是在离线的状态下，根据卫星运行的规律提前计算出来的，不能根据当前网络中承载业务的特性进行动态的调整，网络适应性较差。

文献^{[76][77]}提出两种静态路由策略，不考虑业务状态，利用高纬度异轨星间链路距离比低纬度星间链路距离短的特点，在选择路径时首先经由同轨链路到达目的卫星所在的纬度圈，然后再通过异轨链路到达目的卫星；或者先经由同轨链路到达纬度最高的卫星节点，再经由平行圈异轨链路到达目的卫星所在轨道面，最后经过同轨链路到达目的卫星。这两种算法仅仅根据地理位置计算路径，不考虑链路当前的状态，容易导致拥塞，抗毁性较差。

Yun-Sik^{[78][79]}提出自适应型路由算法AR(Adaptive Routing)。AR算法目的在于解决LEO卫星网络ISL流量不均衡问题。AR算法以所有ISL的剩余容量差值最小化为优化目标。AR算法优点在于对LEO卫星网络ISL流量的高效利用，其缺点在于算法计算复杂性比较高，频繁的链路切换不利于路由时延指标的保证。

文献[80]提出的Destruction-resistant 路由算法，将星座网络进行分簇，各卫星节点仅仅了解本簇内的各星间链路的状态，全网链路状态信息通过各簇头传递。此算法通过分簇管理使路由高效化，但增加了簇维持带来的信令开销，算法执行的复杂度依赖于卫星网络的规模。

文献[81]假设单层LEO星座为双层星座，根据星间链路动态特征和流量分布，在各轨道面选择某卫星节点作为此轨道面的管理中心，由此管理中心实时更新链路状态和流量特征实现动态路由计算。

(4) 单层卫星网络路由策略根据在选路过程中依据时延选择路径或者掉包率最低或者吞吐量最大等单一某一个指标选择路径，还是综合考虑时延、掉包率、吞吐量等权值因素综合考虑选路分为单一权值选路和优化参数选路。其中优化参数选路的路由算法又被称为 QoS 路由算法。

比较多的文献针对某一项 QoS 指标的优化提出了相应的解决方案。如文献 [18] 从流量切换的角度针对卫星网络的时延抖动进行了相应的改进。通过位置管理和切换管理来降低因流量切换而导致的时延抖动。与文献[82]类似，文献[83]也从链路切换的角度改进卫星网络的时延抖动，通过在卫星网络节点之间选择一个含 k 条优化路径

的集合来最小化切换时延抖动并减少链路切换率。

文献[84]提出了一种预测路由协议为卫星网络用户提供 QoS 保证。协议利用了 LEO 卫星网络拓扑的可预测特性预测 ISL 在未来的一个短时间段内的流量。其选路目标为最大化最小剩余链路带宽，从而减少链路变化并平衡用户流量。文献[85]讨论了在业务均匀分布情况下的概率路由协议（PRP）。PRP 将到达卫星节点的呼叫分为新呼叫、小区切换和卫星切换带来的呼叫申请，PRP 的思路是在新呼叫到达和小区切换时，使得新建立的路由发生星间链路路由重建和切换的概率最小为优化目标。

还有一些算法是针对 ISL 利用率优化的，比较有代表性的有 Chang 等人提出的 FSA 算法^{[86][87]}。FSA 路由算法从链路分配的角度根据卫星网络拓扑结构和网络流量特征来解决路由问题。FSA 算法以 ISL 利用率为唯一优化目标，使得其路由计算结果的端到端时延性能不能被保证。

以上的路由算法或以时延为优化目标，或以时延抖动为优化目标，或以 ISL 链路利用率为优化目标，都做了大量的研究。然而随着业务的多样化发展，不同业务对 QoS 的需求不尽相同，只针对某一个 QoS 参数进行优化已经不能满足用户的需求。为了满足用户的需求，必须根据用户的需求对多个 QoS 参数进行联合优化。为了解决卫星网络中的多 QoS 目标优化路由问题，一般采用启发式算法和目标优化算法。

文献[88]在低轨卫星网络中应用改进的遗传算法，建立优化函数选择路径，此算法复杂度较大。文献[89]提出了一种分布式的 QoS 路由策略（DQA），该算法是对启发式蚂蚁算法的改进，实际上这里的 ant 即移动 agent，该策略充分考虑了切换对 QoS 的影响，根据每个节点的本地信息作路由判决，产生的路径是无环的，能够满足延时限制，同时避免链路拥塞。

(5) 单层卫星网络路由策略又可以根据网络的拓扑结构分为虚拟拓扑路由算法和基于覆盖域划分的路由算法两类。

虚拟拓扑路由算法根据卫星运行的周期性和可预测性，把整个的卫星运行周期分成 K 个等间隔 Δt , $\Delta t=T/K$. 假定星座状态的变化都发生在每个 Δt 开始的时刻，这样，在 $t=k\Delta t$ 时刻， $k=\{0, 1, \dots, k-1\}$ ，卫星星座运行的状态是固定不变的。对应每个状态，可以事先为每对源目的卫星节点按照 DSPA 算法计算出若干个具有最小路径耗费的路径，也就是按照一定的准则最好的路径，将这些路径存储在每个卫星交换节点中。这样，卫星就不再需要具有复杂的计算功能，但是需要较大的存储空间来存储路由表。这种路由算法通常对应上面所述的静态路由算法，不能及时对网络状态的变化（如网络拥塞、节点失效等）做出调整，适应性较差。

基于覆盖域划分的路由算法，将地球表面区域划分成不同的区域，给每个区域分配一个固定的逻辑地址，最靠近该区域的卫星的逻辑地址即是该区域的逻辑地址。卫星的节点所在的区域是周期性发生变化的，其逻辑地址也动态变化。路由策略就是基

于这样的逻辑拓扑结构考虑的，而不用考虑卫星的移动性。这种路由策略无需预先进行路由计算，能够根据流量的负载、故障等情况实时选择新的路由，算法的适应性较强，要求星上的存储空间较小。

基于虚拟节点的路由算法属于基于覆盖域划分的路由算法的改进方法。将卫星网络模型化为一个由虚拟卫星节点组成的网络，分配固定的地理坐标，将真实的卫星节点与虚拟节点相映射，屏蔽了卫星的移动性，将卫星网络的路由策略转化为在一个由虚拟的静态地理坐标构成的逻辑平面内计算最短路由的问题。这种路由策略健壮性及抗毁性较差，一旦网络中出现卫星节点失效或星间链路失效，算法性能急剧下降，并且其只适用于极地轨道的极轨星座，不适用于倾斜轨道星座。

上文第一节提到的文献[63]中的 DT-DVTR 算法是基于 ATM 机制的面向连接的路由算法，也是最早提出的基于虚拟拓扑的卫星网路由算法。它最早提出把卫星网络拓扑离散化为一系列静态拓扑的思想，然而它并没有能够有效解决链路切换或连接切换引起的重路由问题。

文献[90]中提到的 CEMR 算法（Compact Explicit Multi-path Routing）是基于虚拟拓扑的一种紧凑的显式多路径路由算法，使用全局路径标识 PathID 的思想，路径上的中间节点按照 PathID 描述的信息对分组进行转发，具有较小的信令开销，能够支持卫星网络中的流量负载平衡，特别适合高流量负载的数据传输，是解决卫星网络中多径路由问题的典型算法。

文献[91]提出的覆盖区域切换重路由协议 FHRP (Footprint Handover Rerouting Protocol) 和上文第(4)节文献[66]提出的概率路由协议 PRP 均是比较典型的基于覆盖域划分的路由协议。FHRP 由路径增量更新和路径重建算法两部分组成，将简单的路径部分重选和优化的路径完全重建相结合而达到切换后路径综合性能的最优化。这种算法的优点是切换发生后不需要使用复杂的算法，而根据卫星的覆盖域特性计算出新的路径。但它需要端用户的参与，并且不能保证重路由之后的路由的最优性。

文献[92]提出的数据报路由算法（DRA 算法）是一种基于虚拟节点的路由算法。该路由算法为每个数据包独立作出路由选择，通过方向估计、方向改进和拥塞避免及卫星失败时的重新路由三个阶段进行选路，生成的路径无环路，而且卫星运动对路径最优性的影响可以忽略。算法抗毁性较强。

其他的路由策略：

移动 Agent 路由策略

Agent 是指信息世界中具有一定程度智能、能够代表用户自治地完成特定任务的软件实体，而移动 agent 指具有跨地址空间持续运行机制的 Agent，它指能够自行决定在网络中的各个节点之间移动，可以根据具体情况，中断当前的执行，移动到另一设备上恢复运行，并及时地返回执行结果。Agent 具有自治性、社会能力、主动性以

及快速反应能力的特点。在需要处理的数据量大、网络传输频繁、带宽不足的情况下，使用移动 agent 技术可以有效地节省网络负载、克服网络延迟^[93]。

随着移动 Agent 在计算机领域的应用和发展，近年来，也有不少研究将移动 agent 技术用于卫星网络动态路由中。

文献[94] [95]针对单层卫星网络负载分布不均匀的特点，提出了一种适用于单层卫星网的基于移动 Agent 的动态路由算法 (SDRA-MA)。基于移动 Agent 的路由技术天生具有多路由的特点，通过移动 Agent 在卫星节点间迁移，收集星间链路时延、卫星纬度等信息，当条件满足时，移动 Agent 往回迁移，并在每个中间卫星节点基于卫星地理位置计算所探测路径的代价、更新路由表。仿真结果表明，SDRA-MA 实现了负载平衡，重负载情况下端到端时延、丢包率等指标均优于传统的卫星路由算法，对链路拥塞具有较好的自适应能力。同时，由于该算法中各卫星节点不需要知道全网结构，通信开销、节点存储和计算开销均较低。

Antnet 路由算法受蚁群系统 (ACS: Ant Colony Systems) 的启发而来，是一种基于移动 agent 的分布式自适应路由算法并成为后来众多移动 agent 路由算法的基础。文献[96]中提出基于 antnet 的路由策略，收集各链路状态信息，在建立路由表时根据链路的状态计算在路径中被选链路的概率，当建立路径后，利用 Forward-Ant 和 Back-Ant 更新链路状态。此算法需要经过多次迭代才能建立稳定的路由表。

以上从不同角度介绍了单层卫星网络的各种路由算法，在实际使用过程中，并不会依据某一种标准采用单一的路由算法，通常会将根据业务的 QoS 需求以及网络的状态将几种路由算法结合起来使用。

4.2.4 多层卫星网络路由策略技术

对于双层卫星网络路由技术的研究在针对上文所提出的几个典型卫星网络的基础上相关文献进行了相应地研究。在文献[6]中针对 SoS 结构提出了对应的分层路由协议 HQRP (Hierarchical QoS Routing Protocol)。HQRP 路由协议的核心思想是上层卫星实现对下层卫星路由信息的汇聚并为下层卫星提供路由计算支持。下层卫星节点按照 QoS 指标要求和节点跳数限制选择最优路径。协议首先根据用户等级确定网络中的流量模型，其 QoS 性能主要体现在支持的用户等级数以及端到端的通信时延大小。

在文献[97]和[98] [99]中提出了双层卫星网络路由协议 TLSR。该协议采用了 ATM 快速分组交换技术，每一颗 MEO 卫星均为一个网络交换节点，组成骨干交换网络，而 LEO 卫星为一个具有交换功能的用户接入点，与低速的移动用户和高速的固定用户连接。TLSR 算法采用离线方式和星座周期划分方法将系统运行周期划分为有限个时间片，提前将路由表计算好，存储在卫星上。星座周期的划分由网络的拓扑结构的变化

来决定，降低对星上存储设备的要求，时间段的更新与子网拓扑结构变化同步进行；路由表的计算准则与接入控制统一综合考虑，接入时选择“通信时间最长”卫星，路由路径的建立根据“信息传播时延最短”或“传播时延抖动最小”的优化准则，为两颗 LEO 卫星之间建立一条虚通路。

HQRP 和 TLSR 这两种路由协议都是采用基于面向连接的路由机制，与单层卫星网络中基于面向连接的路由机制具有同样的不足，即在通信建立前先建立一条虚路径，在通信结束时拆除，路径的建立需要大量的信令信息的支持、网络拓扑的动态变化导致算法频繁进行切换处理，从而导致网络的路由信息更新频繁，使卫星网络稳定性较差。基于此，基于 IP 路由的包交换路由策略逐渐应用到多层卫星网络中。

MLSR 路由算法是基于 IP 的多层卫星网络路由算法^[8]，该算法适用于由 GEO、MEO 和 LEO 卫星组成的的三层卫星网络，其中各层卫星之间以及层内卫星之间均具有层间星间链路，从而形成一个强互联的立体网络结构。MLSR 首次对虚拟拓扑策略向三层卫星网络的拓展作了相应地研究。基于分层路由思想，MLSR 算法根据高层卫星的覆盖域对低层卫星进行分组，低轨组被抽象成节点，只有连接的总延时被发送给上层卫星，路由表的计算在卫星组成员关系变化或者周期性地由上层卫星为低层卫星计算路由表，周期性路由表计算目的在于反映连接延时的变化，路由表重新计算时间必须小于卫星组成员关系变化的时间，由高层卫星计算之后再分发给下层卫星。

MLSR 路由算法将路由计算分担给了多颗卫星，路由计算开销比较小。MLSR 路由算法除了当跳转转向高层卫星的一小段摆动阶段外，其它时刻的算法性能与最短路径算法的性能相同，当网络负载较高时，MLSR 算法比单层卫星网络的算法具有更好的性能。但是由于在 MLSR 算法中路由计算度量仅为链路传输时延并在组成员关系改变时(即层间覆盖关系改变)或周期性地更新路由表，因此算法缺乏对网络中流量突发性变化的适应能力。

苑喆等在 MLSR 的基础之上提出了用于 LEO&GEO 双层卫星网络的路由协议 DLRA^[100]，DLRA 算法的基本原则是：短距通信业务的数据包尽可能只通过 LEO 层进行传输；长距通信业务的数据包由 LEO 卫星负责接入，中间的多条转发由 GEO 层完成。在 DLRA 算法中，LEO 路由节点只需要掌握节点范围在 N 跳内的局部拓扑，这可以通过在链路状态通告中增加一个跳数限制字段以控制通告只在 N 跳范围内进行洪泛来实现。这样可以明显地减少路由协议的开销，加快路由的收敛速度。DLRA 算法包括链路状态洪泛、动态路由计算、业务数据包选路以及卫星路由器失效情况下的处理等 4 个部分的内容。

C. Chen 等在 MLSR 的基础之上提出了用于 LEO&GEO 双层卫星网络的路由协议 SGRP，SGRP 路由算法的主要思想是在最小时延路径上传输数据包，SGRP 路由协议为了实现流量自适应能力，采取了拥塞发现机制，通过让各卫星自主监测队列缓冲状态

以实现避免网络发生拥塞的情况。

SGRP 路由协议虽然解决了 MLSR 对于拥塞处理的低效问题，完善了 MLSR 提出的 LEO 层卫星分组路由机制，减轻了 LEO 卫星路由计算的负担，却存在着如下问题：将 LEO 分组的变化与 LEO 逻辑位置变化绑定，降低了整个系统的寿命、鲁棒性和抗毁性。

上述提出的几种路由算法大都建立在网络强连接模型之上，根据卫星分组原理将低层卫星的路由问题转化为在高层卫星实现集中式路由，优点是实现简单，但由于每对卫星之间存在多种路由选择，每次网络结构变化都将引起路由表的大范围更新，导致高层卫星路由汇聚任务异常繁重。文献[101]对网络模型进行了改进，提出了由 GEO 卫星与 LEO 卫星组成的间断性连接的网络模型，提出了一种基于卫星分簇的路由算法 CDSNR(Cluster based Double-layer Satellite Network Routing algorithm)。该算法同样基于分布式分层路由思想，根据 LEO 卫星所处轨道面和 GEO 卫星覆盖域将 LEO 卫星分簇，由 GEO 卫星为 LEO 卫星计算路由表。与其它多层卫星网络路由算法相比，CDSNR 算法不仅简化了 GEO 卫星与 LEO 卫星之间的连接关系，而且有效降低了网络中 LEO 卫星的星上处理开销和星间通信开销。

CDSNR 路由算法与其他两种典型的多层卫星网络路由算法 SGRP、MLSR 等路由算法在层间星间链路连接度、星上计算开销、星上存储开销、星间通信开销等方面进行了比较，比较结果如下：

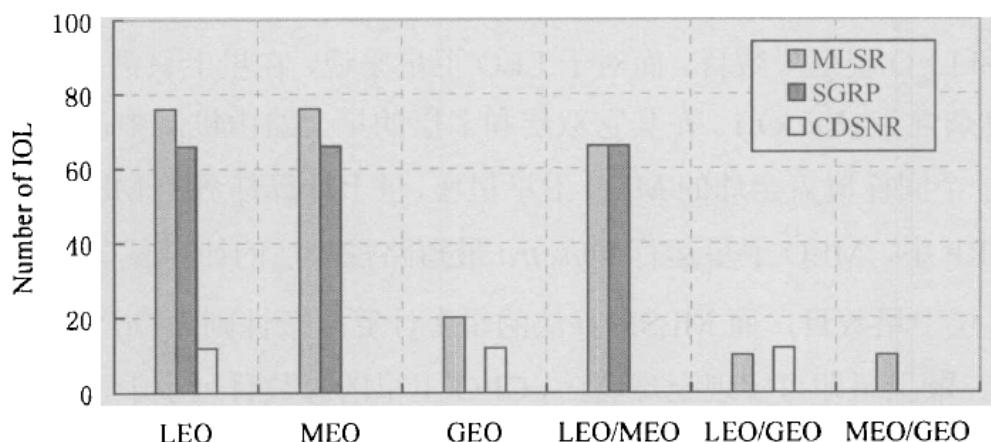


图 4-2 层间星间链路连接度对比

表 4-1 三种路由机制星上计算开销和存储开销对比

路由算法	计算开销			存储开销		
	LEO	MEO	GEO	LEO	MEO	GEO
SGRP	$O(l \times n)$	$O(l^2 \times n^2)$	—	$O(l \times n)$	$O(l^2 \times n^2)$	—
CDSNR	$O(m \times n)$	—	$O(m^2 \times n^2)$	$O(m \times n)$	—	$O(m^2 \times n^2)$
MLSR	$O(m \times n \times l)$	$O(m^2 \times n^2 \times l^2)$	$O(m^2 \times n^2 \times l^2)$	$O(m \times n \times l)$	$O(m^2 \times n^2 \times l^2)$	$O(m^2 \times n^2 \times l^2)$

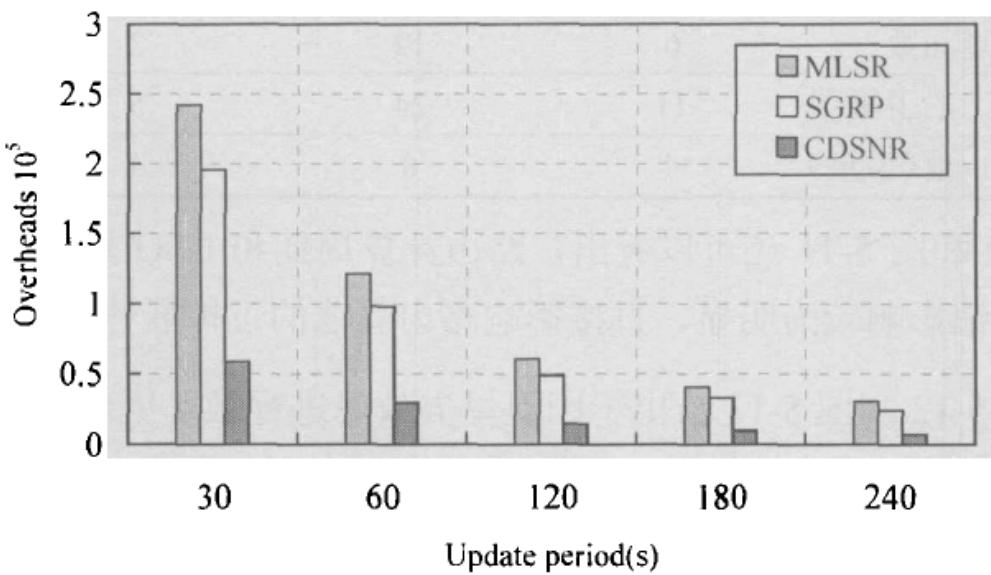


图 4-3 周期性链路状态更新星间通信开销对比

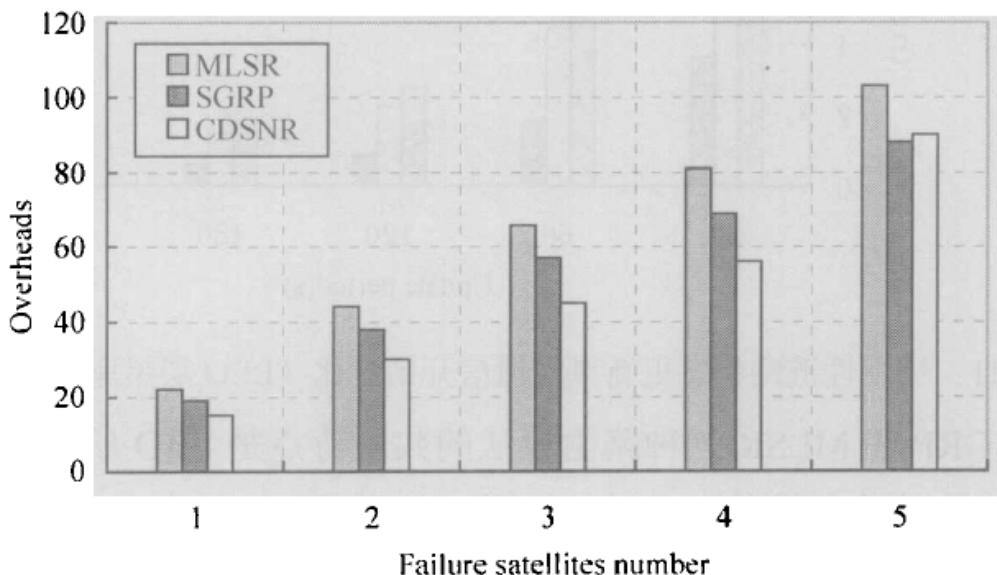


图 4-4 触发更新星间通信开销对比

通过上述分析比较可以看出，CDSNR 算法的星上计算开销和星上存储开销明显低于其他类型星上路由机制的星上计算开销和星上存储开销，同时，其星间通信开销也低于其他多层卫星网络的星间通信开销。

上述文献主要是针对多层卫星网络模型提出了相对应的路由协议，但是因为卫星与地面用户不断地相对运动、业务分布的不均匀和通信时段的突发性导致卫星网的流量负载不均衡并且具有时变特性，不论从保证用户 QoS 角度，还是从系统维护优化网络资源角度，都需要对系统中的网络业务考虑负载均衡，采用自适应的路由策略^[102~105]对于卫星网络来说是必须考虑的。

文献[102]对单层 LEO 卫星网络中的负载均衡问题进行了研究，提出了网络拥塞的预测机制，在地理上人口多经济发达的地区意味着网络负载业务比较多，相反的，人口稀少经济落后的地区则意味着网络业务负载量比较少，基于此，可以对网络中的负载业务进行提前预测并进行规划，从而达到对网络中业务进行负载均衡传输的目的。文献[103]和[104][105]在文献[102]的基础上，对双层卫星网络中的负载均衡算法进行了研究，在网络业务拥塞时，不仅要考虑把业务转移到相邻的 LEO 卫星进行传输，而且根据业务类型，可以把业务中转到上层的 GEO 卫星进行传输。

由于多层卫星网络区别于单层卫星网络最主要的性能优势是信息的时效性和信息传输的可靠性，尽管上述文献已经对卫星网络中的路由控制以及负载均衡机制有所研究，但是综合考虑卫星业务分布的不均匀性以及 LEO/GEO 卫星网络不同延迟特点对不同业务实现其 QoS 特性并没有被重点考虑，本文从减少拓扑信息交互、减少路由信息的计算量的角度，提出一种新的基于负载均衡的双层卫星网络自适应动态抗毁路由算法，并对其进行了仿真分析。

4.3 基于负载均衡的双层卫星网络动态抗毁路由技术

上文提到，CDSNR 算法不仅简化了 GEO 卫星与 LEO 卫星之间的连接关系，而且有效降低了网络中 LEO 卫星的星上处理开销和星间通信开销。但是，CDSNR 路由算法并未对算法的自适应性和抗毁技术给出相应的解决方法。在此网络模型下，如何利用网络结构的特性以及 LEO 卫星和 GEO 卫星各自的优势，建立一种简化的并且能对网络流量进行自适应的调整的抗毁路由算法是论文考虑的重点。

在介绍本文所提出的双层卫星网络路由算法之前，首先对本网络模型下的用户接入控制和相关协议进行约定：

- ✓ 地面用户只与 LEO 卫星建立直接链路，与 GEO 卫星之间无直接链路；
- ✓ 地面信关站与 GEO 卫星之间有直接链路；
- ✓ 地面用户通过最小仰角原则选择接入 LEO 卫星。

本文所提出的路由算法的基本原则是：不同种类业务区分处理机制、路径资源及路由跳数决定路由中转层数机制，具体描述如下：

对于源目的用户卫星处于同一个 LEO 卫星簇内的通信业务，采用在单层卫星内传输，即通过簇内卫星的中转即可完成传输；而对于源目的用户卫星处于不同 LEO 卫星分簇的卫星，若是语音业务，则只通过 LEO 层卫星进行传输；如果为数据业务，或对时延不敏感的业务，则可以通过上层 GEO 卫星的中转进行传输。即语音业务只通过 LEO 层卫星完成，而短距通信数据业务只在 LEO 单层同簇卫星内完成，而对于长距数据通信业务的数据包则由 LEO 卫星负责接入，根据网络负载的变化情况和路由跳数是否超过门限值来决定中间的多余转发由 GEO 层完成还是在 LEO 层传输。

本文根据已有的双层卫星网络路由算法提出了一种新的基于负载均衡的双层卫

星网络自适应动态抗毁路由算法。本路由算法首先要根据网络拓扑特征进行分层分簇的设计，然后完成的是原始路由表的计算。

4.3.1 相关定义

在讨论路由算法的实现之前，先对算法中涉及到的一些名词进行定义。

首先介绍综合链路代价（Total Link Weight）的基本概念：网络中的每颗卫星按照下面的公式计算与其他卫星之间的链路的综合链路代价。考虑到卫星网络中的拓扑结构和流量负载的持续变化，选择合适的路由计算代价度量对路由算法性能影响很大。传统的卫星网络路由算法通常使用 ISL 传输时延作为链路代价，单一的传输时延只能反应网络拓扑的物理连接变化而不能反映网络中流量负载的变化情况。为此，本文考虑采用路径的综合链路代价作为路由计算的依据，TLW 由三部分组成：传输时延 T_D ，排队时延 T_Q 和处理时延 T_P 。

传输时延 T_D 是由链路距离即星间链路长度所决定的，设 $D_{A \rightarrow B}$ 表示卫星 A 与卫星 B 之间的星间链路距离，则 A 到 B 之间的传输时延可以由下式计算：

$$T_D = D_{(A \rightarrow B)} = \begin{cases} \frac{Dist(A \rightarrow B)}{c}, & \exists ISL \text{ or } IOL_{A \rightarrow B} \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{式 4- 1})$$

在上面公式中， $Dist_{A \rightarrow B}$ 表示卫星 A 与卫星 B 之间的物理距离，当卫星 A 与卫星 B 之间满足可见性条件可以建立星间链路时，根据其物理连接关系可以实际计算得出， c 为光速，表示无线信号或激光信号传输速率；当卫星 A 与卫星 B 之间不可见或出现链路或节点故障，则它们之间的传输时延被设置为无穷大。

排队时延 T_Q 和处理时延 T_P 用来描述卫星网络中承载的流量负载变化。排队时延 T_Q 指业务分组被交换到输出端口缓存区进行等候直至被输出的时延。处理时延 T_P 是指根据卫星网络拓扑表和分组头部信息查找路由的时延。排队时延和处理时延与各卫星节点缓存区队列长度、分配的带宽、所采用的分组调度算法以及分组长度相关。

$$T_Q = \sum_{j=1}^H \left(\frac{L_{i,j}}{\phi_{i,j}} + \sum_{k=1}^K \frac{L_{k,j}}{\phi_{k,j}} \right) \quad (\text{式 4- 2})$$

在上面公式中， $L_{i,j}$ 表示节点 i 到节点 j 的分组包的长度， $\phi_{i,j}$ 表示节点 i 到节点 j 的信道中的可用的带宽。

$$TLW = T_D + T_Q + T_P \quad (\text{式 4- 3})$$

其中， T_D 表示传输时延， T_Q 表示排队时延， w 表示信息量权重参数。文献[106]对业务到达的情况和执行的情况通过物理建模进行分析可以得出：在一个卫星节点最

大的等待时延约为 25ms 左右，相当于卫星与卫星之间一跳的时延值。在本文中，通过理论上估算出各时延，以及总的链路综合代价，指导我们设计后面的路由算法。

定义 3-1 LEO 卫星簇 (LEO Cluster LC)

定义 LEO 卫星层同一个轨道面的所有卫星组成一个 LEO 卫星簇，簇内卫星的连接关系是固定不变的。在一个簇内，每个卫星用 Sat_{ij} 来表示， i 表示其所在的轨道面， j 表示在轨道面上的卫星节点编号。

定义 3-2 主簇头 (Main Cluster Head MCH)

在一个 LEO 卫星簇内，定义与上层 GEO 卫星具有最长连接时间的卫星为本簇的管理者，即主簇头。由于 LEO 星座的运转，簇头与 GEO 卫星的连接关系是变化的，因此选取的主簇头卫星是会变化的。

定义 3-3 备份簇头 (Backup Cluster Head BCH)

为了防止主簇头失效，定义在一个 LEO 卫星簇内，与上层 GEO 卫星具有次长连接时间的卫星为备份簇头，在主簇头失效时可以接替主簇头的工作。

定义 3-4 卫星链路状态通告 (Satellite Link State Advertisement SLSA)

LEO 卫星层内的每颗 LEO 卫星根据上述公式 4-3 中的定义计算其综合链路代价。每颗卫星收集完其同轨面和异轨面星间链路的综合链路代价之后，首先汇总到每个簇的簇头，形成簇汇总链路状态通告，然后由本簇头再通过星间链路传递给另一个簇头。卫星 A 的链路状态通告 (Satellite Link State Advertisement) 的定义如下：

$$\text{SLSA}(A)=\{\text{TLW}(\text{ISL}_{A \rightarrow B}) | B \text{ is a neighbour satellite of satellite } A\}$$

在上面描述中，B 表示卫星 A 的其中一个邻居卫星节点。

定义 3-5 失效卫星通告 (Failure Satellite State Notification FSSN)

在卫星网络运行过程中，如果卫星本身出现故障（如链路收发设备故障），则该卫星将被认为已经失效。失效卫星由与其直接相邻的同轨道卫星最先获知，若某颗卫星被认为失效，则最先获知该卫星失效的邻居卫星创建失效卫星通告，并广播给其他卫星。失效卫星通告的定义如下：

$$\text{FSSN}(\text{Sat}_{ij})=\{\text{Sat}_{ij} | \text{Sat}_{ij} \text{ is a failure LEO satellite}\}$$

$$\text{FSSN}(G_i)=\{G_i | G_i \text{ is a failure GEO satellite}\}$$

定义 3-6 链路拥塞通告 (Link Congestion Advertisement LCA)

若当前卫星的某条星间链路出现了拥塞，当前卫星把该链路对应的综合链路代价设为无穷大并按如下定义创建链路拥塞通告 (Link Congestion Advertisement, LCA)：

$$\text{LCA}_{\text{ISL}}=\{\text{TLW}(\text{ISL}_{A \rightarrow B}) = \infty | A \text{ and } B \text{ are both LEO satellites or GEO satellites}\}$$

$$\text{LCA}_{\text{IOL}}=\{\text{TLW}(\text{IOL}_{A \rightarrow B}) = \infty | A \text{ and } B \text{ are different type of satellites}\}$$

定义 3-7 卫星链路状态信息库 (Satellite Link State Information Base SLSIB)

卫星链路状态信息库指经过簇头收集本簇的链路状态通告，以及簇头与上层 GEO 卫星之间交互本簇的链路状态信息之后形成的任意两颗卫星之间的链路状态信

息的数据库，此卫星链路状态信息库反映了当前的网络拓扑结构和当前的链路的连接的状态，路由算法可以依据此信息库进行节点之间的路由计算。卫星链路状态信息库包含三类表项：LEO 卫星层各卫星之间、LEO 卫星与 GEO 卫星之间以及 GEO 卫星之间的连接关系，表项结构如下：

表项类型 1：SLSIB (1): $\langle \text{Sat}_{ij}, \text{Sat}_{i'j'}, (i \neq i', j \neq j'), \text{TLW} (\text{ISL}_{\text{Sat}_{ij} \rightarrow \text{Sat}_{i'j'}}) \rangle$, 其中 $\text{Sat}_{ij}, \text{Sat}_{i'j'}$ 分别为直接相邻的两颗 LEO 卫星；

表项类型 2：SLSIB (2): $\langle A, B, \text{TLW} (\text{ISL}_{A \rightarrow B}) \rangle$, 其中 A 和 B 分别直接相邻的两颗 GEO 卫星；

表项类型 3：SLSIB (3): $\langle \text{Sat}_{ij}, B, \text{TLW} (\text{IOL}_{\text{Sat}_{ij} \rightarrow B}) \rangle$, 其中 Sat_{ij} 为低轨卫星，B 为与其相连的 GEO 卫星。

表 4-2 给出了表项类型 1 中一组卫星的链路状态信息的示意。

表 4-2 卫星链路状态信息库

卫星节点 综合链路代价	Sat_{11}	Sat_{12}	Sat_{1j}	Sat_{1N}
Sat_{21}	TLW_{11}	TLW_{12}	TLW_{1i}	TLW_{1N}
Sat_{22}	TLW_{21}	TLW_{22}	TLW_{2i}	TLW_{2N}
Sat_{23}	TLW_{31}	TLW_{32}	TLW_{3i}	TLW_{3N}
Sat_{24}	TLW_{41}	TLW_{42}	TLW_{4i}	TLW_{4N}

表 4-2 给出了轨道面 1 上的各卫星与轨道面 2 上的各卫星之间的综合链路代价，同样地，我们可以得出轨道面 1 的各卫星与轨道面 3 的各卫星以及轨道面 2 上的各卫星与轨道面 3 上的各卫星之间的综合链路代价，由同样形式的另两个表结合表 4-2 即构成了路由表项 1 中所有卫星的链路状态信息库。

定义 3-8 路由表 (Routing Table RT)

其路由表项包含如下内容：

\langle 目的卫星，类型，首选下一跳，备选下一跳 \rangle

其中，类型指明下一跳卫星节点是 LEO 卫星还是 GEO 卫星。

4.3.2 分层分簇的管理方法

卫星通信目标的实现有赖于先进有效的网络管理。双层卫星网络有利于网络管理信息与业务数据信息的天然分离，GEO 卫星覆盖面积大，能够对 LEO 卫星提供集中式管理，有利于克服分布式管理对故障反应不够快捷的缺陷，同时多颗 GEO 卫星又可以提供适当的冗余。本节提出高低轨道结合的多层卫星网络分层分簇的管理方法，由低层卫星簇头实现对簇内卫星进行管理，GEO 卫星与簇头进行信息交互，实现管理子网和业务传输子网在物理上的分离，通过冗余配置和主备用路由策略克服集中式

管理的缺陷，充分体现分布与集中相结合管理的准确、高效的优势。

传统的双层卫星网络通常要求下层每颗卫星均与上层卫星保持连接，即一直维持强连接模型，本文为了降低 GEO/LEO 卫星之间互联关系的复杂性，采取分层分簇的分布式管理方法。首先按照轨道平面对卫星网络划分为 3 个簇，即在同一个轨道平面的卫星构成一个簇，在每一个簇内定义一个簇头对簇内的卫星进行管理。在每一个簇内，由于 GEO 卫星相对于 LEO 卫星间距离较远，且变化率比较大，对于 GEO-LEO ISL，GEO 卫星只与每一簇的簇头进行通信，这样简化了卫星管理和路由。由上述仿真可知，GEO 卫星对 LEO 卫星的覆盖是不连续的，但是在一个回归周期内，每个簇内只需要选取两颗 LEO 卫星即可实现与 GEO 卫星的接续传输，因此，为了实现数据的实时传输，在一个簇内设定两个簇头：主簇头和备份簇头，当主簇头与 GEO 卫星无法建立连接时，由备份簇头接续进行服务。簇头在一个 LEO 卫星簇内，定义与 GEO 卫星具有最长连接时间的 LEO 卫星为本簇的主簇头，具有次长连接时间的 LEO 卫星为备份簇头，这样可以减少网络中簇头与 GEO 卫星切换的次数。

针对本文所提出的卫星网络模型，每一个簇分别定义上层的一个 GEO 卫星为其管理者，应选取与主份簇头具有最长连接时间的 GEO 卫星作为其簇管理者。双层卫星网络分层分簇划分示意图如图 4-5 所示。

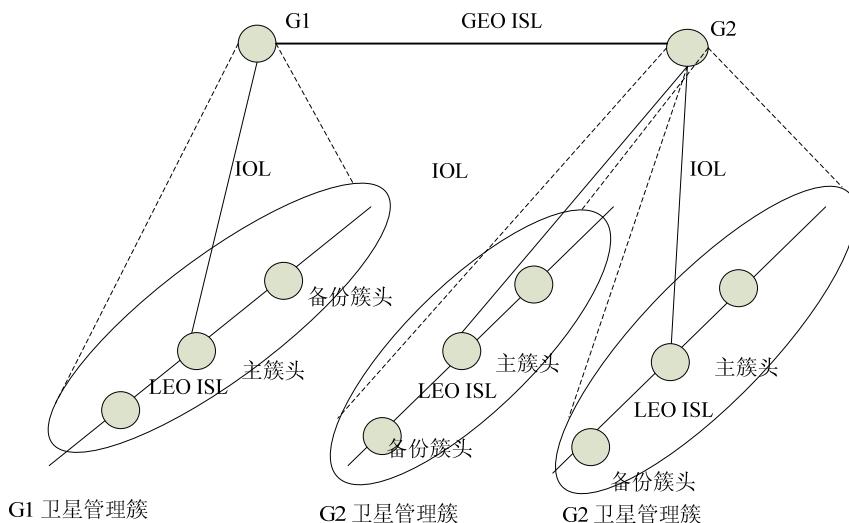


图 4-5 双层卫星网络分层分簇划分示意图

基于这种分簇策略，GEO 卫星与 LEO 卫星之间覆盖关系变化主要体现在 LEO 卫星簇头的变化之上。由于 GEO 卫星相对地面静止不动，而 LEO 卫星所属轨道面连接关系不变，因此我们可以从 LEO 卫星飞行导致的 LEO 卫星与 GEO 卫星连接关系的变化来分析双层卫星网络拓扑关系的改变。

在运行过程中一个簇内的某颗卫星失效，则本簇所处的圆轨道面被分割为两部分，其余卫星仍然可以维持一个局部连通的路由域，但是如果有两颗卫星失效，则再

继续维持一个连通的路由域则非常困难，因此卫星失效将作为特殊触发条件来反映双层卫星网络拓扑关系变化，并应用到路由更新过程中。

根据 LEO 卫星星座运行的规律性和可预测性，除了失效卫星和其他特殊情况外（如链路拥塞引起的触发更新），由 LEO 卫星飞行引起的簇头与 GEO 卫星连接关系变化都可以根据星座参数以及 GEO 卫星和 LEO 卫星之间的覆盖关系提前计算出来。

4.3.3 路由算法的工作原理

为了充分利用星座网络拓扑结构动态变化的周期性和可预测性，同时提高星座网络路由的实时性和抗毁性，我们以原始路由表和动态真实路由表两种路由表的计算和更新作为基于负载均衡的双层卫星网络的动态抗毁路由算法的核心。

路由算法概要原理图如图 4-6 所示。首先根据卫星网络的运行特征将整个卫星网络离散化为 N 个拓扑快照周期，快照周期的个数取决于 LEO 层异轨链路的连接和 GEO 卫星与 LEO 层主簇头和备份簇头的连接关系，在每个快照周期内首先为每个路径计算原始路由表，并预先存储在每个卫星网络节点中。如果在两次快照周期之间，无通信节点或链路失效，各通信节点之间的互联关系不变，则在原始路由表的基础之上，启动周期性链路状态更新机制，进行周期性的路由计算，达到均衡链路负载的目的；如果星座网络运行过程中出现链路拥塞或节点失效时，则需启动突发事件触发更新处理机制，修正链路状态信息数据库，以建立满足卫星网络实际运行情况的动态真实路由表。

算法的抗毁性能体现在突发事件触发链路状态更新处理机制中。前者能适用链路延时和流量负载的变化；而后者，一旦链路拥塞、卫星失效等突发的、不可预测的事件发生，立即触发链路状态更新，进行路由重新计算。

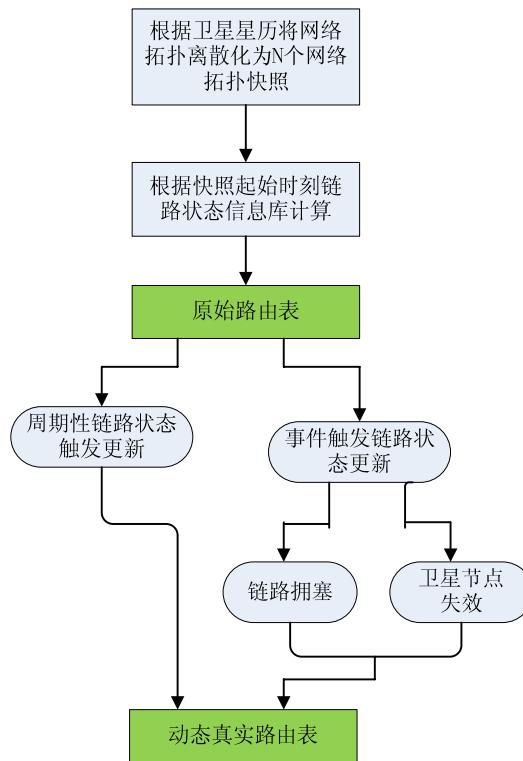


图 4-6 基于负载均衡的双层卫星网络自适应动态抗毁路由算法概要原理图

4.3.4 原始路由表的计算

由于 LEO 层卫星的星间连接关系是固定的，重点是 LEO 层卫星的分簇簇头与 GEO 卫星之间的连接关系是可变的，但是根据卫星运行的规律性，在某个时间段内，GEO 卫星与每一簇内根据最长连接时间原则选择的 LEO 卫星簇头的连接关系是固定的，是可以事先计算的。因此，我们可以根据二颗 GEO 卫星对下层 LEO 卫星的连接关系，以及下层 LEO 卫星异轨链路的互联关系，将卫星运行的周期离散化为 N 个时间间隔，在每个时间间隔内不管是同层卫星还是异轨链路卫星的连接关系都是固定的，即卫星网络拓扑结构是固定的，然后在每个时间间隔内计算出最佳的 LEO&GEO 卫星网络路由，实现卫星网络原始路由表的计算。时间间隔的划分根据每个簇簇头与上层 GEO 卫星的连接时间以及各异轨链路的连接时间所决定。

2 颗 GEO 卫星与下层 LEO 卫星之间的拓扑连接关系如下：

表 4-3 2 颗 GEO 卫星与下层 LEO 的连接情况

LEO 轨道面 1—GEO 卫星 G1	LEO 轨道面 2—GEO 卫星 G2	LEO 轨道面 2—GEO 卫星 G2
◎ Sat11—G1	◎ Sat21—G2	◎ Sat31—G2
◇ Sat15—G1	◇ Sat25—G2	◇ Sat35—G2

注：◎代表为本簇的主簇头，◇代表为本簇的备份簇头。

一个轨道周期内 2 颗 GEO 卫星与下层连接的时段如图 4-7 所示，该图与本文第 2 章中表 2-3 是一致的。

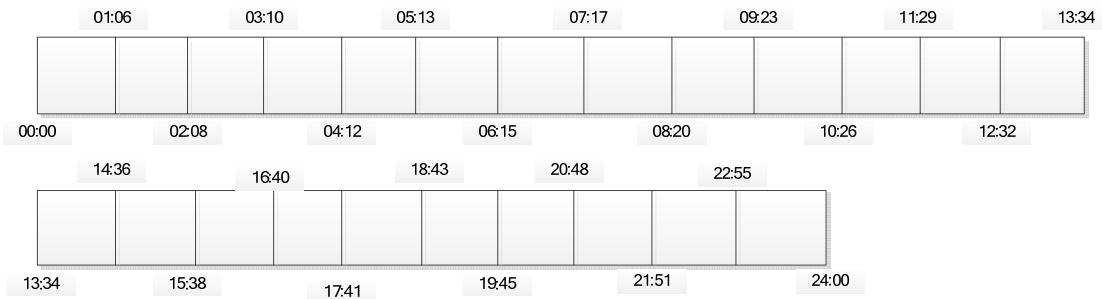


图 4-7 上层卫星与下层卫星连接时段分布图

由上述 STK 仿真结果可以看出，根据主簇头和备份簇头的定义，经过 STK 仿真，在 24 小时的仿真时间，考虑建立链路的时间段设置网络拓扑图以及更新时刻，总共需要 23 张拓扑表，当其中一个 GEO 卫星与下层卫星簇头连接关系改变时即为拓扑更新时刻，最大拓扑持续时间为 3900s，最小拓扑持续时间为 3660s。层间拓扑连接关系表反映了 GEO 卫星与下层 LEO 卫星的连接关系，层间拓扑连接关系表的个数由上述仿真图 4-7 可以确定。

图 4-8 对异轨链路连接关系发生改变的时刻进行了仿真，周期约为 114min，在图 4-8 的时间点上都发生了星间链路的变化，所以都会产生新的快照。从图 4-8 可以看出，在一个轨道周期内，总共要产生 48 个拓扑快照。其中有 12 个快照持续 4 分钟，12 个快照持续 3 分钟，6 个持续 2 分钟，18 个快照持续 1 分钟。

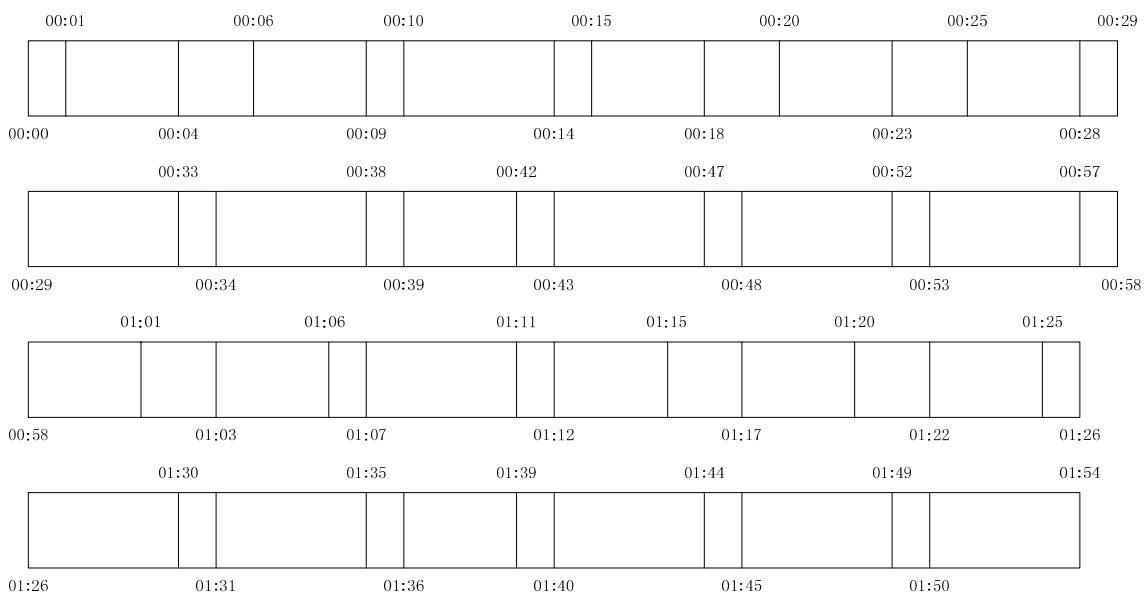


图 4-8 LEO 层卫星异轨星间链路连接时段分布图

因为考虑到地球自转，当一颗卫星回到地面上空的同一位置需经历一个卫星周期，该周期大概为 2 天，即 25 个轨道周期。所以，一个卫星周期的拓扑快照就是上面的一个轨道周期的拓扑快照的循环，总共需要 $25 \times 48 = 1200$ 个拓扑快照。

综合考虑低层 LEO 卫星与 GEO 卫星的连接关系的改变，在 2 天回归周期内，将

4-7 的上下层间链路拓扑更新更新时刻插入进去，拓扑快照的总个数为：1200 个拓扑快照。

在每个时间间隔内，由 LEO 卫星簇头收集本簇内各卫星的链路状态通告，然后报告给上层 GEO 卫星，GEO 卫星之间相互交互之后，形成卫星链路状态信息库，并下传给各 LEO 卫星簇头，以便其进行簇内路由表、簇间路由表以及层间路由表的计算。

4.3.4.1 簇内路由表的计算

由于 LEO 同簇卫星之间的连接关系是固定的，因此簇内卫星的路由表是可以事先计算的，由 LEO 卫星簇头根据计算每颗卫星的路由表，基于冗余备份规则，簇头为每颗卫星计算两条到所有其他端卫星的无环最短跳数路径。

簇内同轨卫星对之间的路径只有两条，上游或者下游，如图 4-9 表示其中的一个轨道面-轨道面 1，卫星运行方向为顺时针。假如源卫星为 Sat11，目的卫星为 Sat13，源一目的路径如下示：

上游方向：Sat11 → Sat12 → Sat13

下游方向：Sat11 → Sat18 → Sat17 → Sat16 → Sat15 → Sat14 → Sat13

源卫星 Sat11 到目的卫星 Sat13 的路径分别为 2 跳或 6 跳，由图 4-3 可知，在同一个轨道面内，源卫星和目的卫星之间的路由跳数分别为 1 或 $N-1$ 、2 或 $N-2$ 、3 或 $N-3$ 、4 或 $N-4$ (N 为每个轨道面上卫星的个数)，此处 N 为 8，所以计算得出同轨道各卫星对之间的路由跳数相差分别为 0、2、4、6 跳不等。

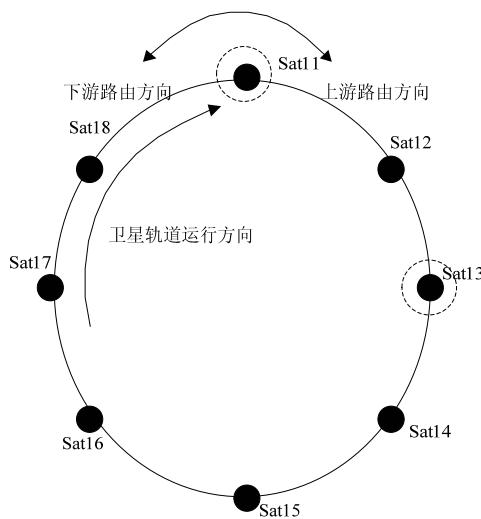


图 4-9 簇内同轨路由示意图

在簇内路由时，由于源目的之间只有两条路径，并且两条路径的路由跳数相差分别为 0、2、4、6 跳，在计算时，簇头判断两条路径的路由跳数差值，如果为 6，则按照最小跳数准则选择最小跳数路径，

4.3.4.2 簇间路由表的计算

对于簇间路由表的计算，由于不同簇之间是通过异轨星间链路连接的，而异轨星间链路的连接关系是时变的，在语音通信的过程中，星间链路的切换会导致分组到达目的端的路径引起切换，进而引起时延抖动，因此，为了避免切换带来的时延抖动的影响，在簇间路由过程中应尽量减少异轨星间链路的使用，以减少分组业务的时延抖动，因此在簇间路由选路时按照尽量少异轨链路的原则计算传输路径。

簇间路由时，分属于两个簇的卫星两两之间互相具有异轨星间链路，有多条经过一跳异轨链路到达目的卫星的路径。在选择路径时，首先根据最小跳数准则选择经过最优路径，在相同跳数的情况下，选择经过异轨链路最少的路径。

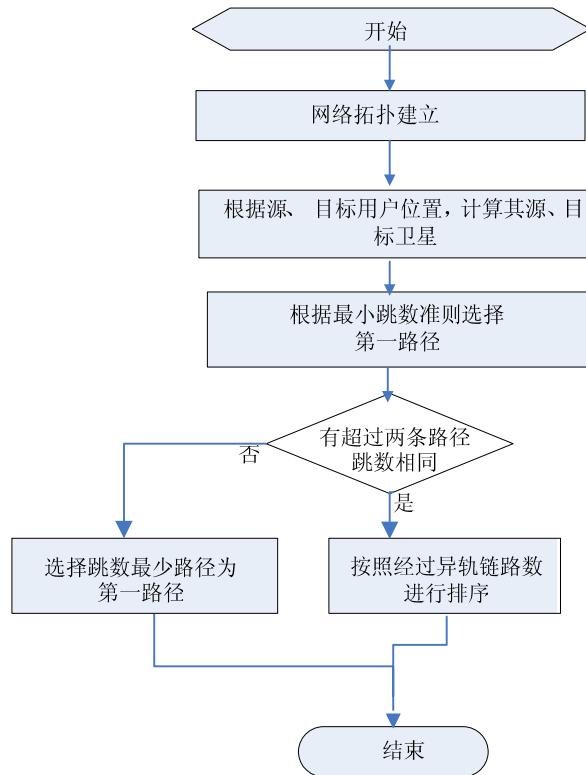


图 4-10 簇间路由表计算流程示意图

如下图 4-11 所示，将轨道面 1 和轨道面 2 展开，假如源卫星为 Sat11，目的卫星为 Sat23，从源卫星到达目的卫星的路径根据最小跳数准则选择，有六条路径均是共 6 跳，分别是：

- 路径 1: Sat11 → Sat26 → Sat27 → Sat28 → Sat21 → Sat22 → Sat23
- 路径 2: Sat11 → Sat12 → Sat27 → Sat28 → Sat21 → Sat22 → Sat23
- 路径 3: Sat11 → Sat12 → Sat13 → Sat28 → Sat21 → Sat22 → Sat23
- 路径 4: Sat11 → Sat12 → Sat13 → Sat14 → Sat21 → Sat22 → Sat23
- 路径 5: Sat11 → Sat12 → Sat13 → Sat14 → Sat15 → Sat22 → Sat23
- 路径 6: Sat11 → Sat12 → Sat13 → Sat14 → Sat15 → Sat16 → Sat23

在选择路径时，选择所包含的异轨链路最少的路径作为优选第一路径，即

$$\min \{ \text{TLW}_{\text{Sat}11 \rightarrow \text{Sat}26}, \text{TLW}_{\text{Sat}12 \rightarrow \text{Sat}27}, \text{TLW}_{\text{Sat}13 \rightarrow \text{Sat}28}, \text{TLW}_{\text{Sat}14 \rightarrow \text{Sat}21}, \text{TLW}_{\text{Sat}15 \rightarrow \text{Sat}22}, \\ \text{TLW}_{\text{Sat}16 \rightarrow \text{Sat}23} \}, \text{以此类推，选出次优路径和备选路径。}$$

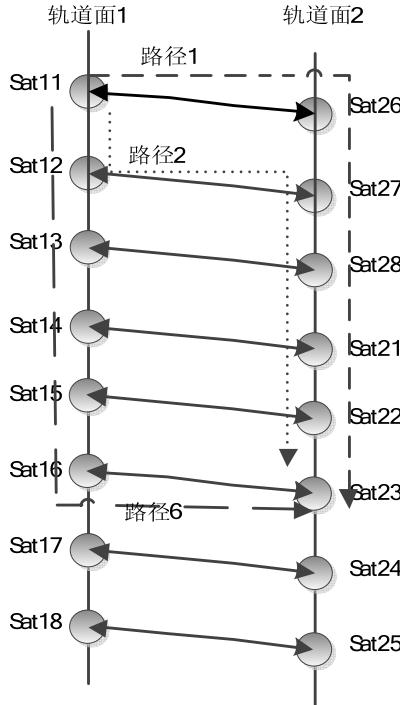


图 4-11 簇间路由示意图

4.3.4.3 层间路由的计算

GEO 卫星根据在每个时间间隔内与下面 LEO 层卫星之间的连接关系，建立 LEO&GEO 卫星层间拓扑表；若源用户卫星和目的用户卫星分属于不同的簇，并且由于网络拥塞导致在低层卫星的排队和交换时延增加，对于数据业务或者对时延不敏感的业务，则首先在 LEO 层簇内将数据包传递到簇头卫星，然后通过层间路由将数据包传递到 GEO 卫星，然后通过 GEO 卫星层间拓扑表的查找，找到需要中继的下层卫星的簇头，将数据传递到另一颗 GEO 卫星，然后通过层间链路将数据下传到目的卫星所在的簇头。

4.3.4.4 路由计算步骤

1) LEO 簇内路由表的计算

根据上述 4.3.4.1 节中介绍的准则对簇内路由表进行计算；

2) LEO 卫星簇内路由表的发送

簇头将路由表计算好之后，通过洪泛技术，将路由表分发到簇内各颗卫星；

3) LEO 簇间路由表的计算

簇间路由表根据简化设计的准则，假定簇间只通过一跳异轨链路，根据簇间链路状态通告计算出 LEO 卫星簇间路由表然后发给各卫星；

4) GEO 与 LEO 卫星簇头连接关系的建立

GEO 卫星根据在每个时间间隔内与下面 LEO 层卫星之间的连接关系, 建立 LEO&GEO 卫星层间拓扑表;

5) GEO 卫星层间拓扑表的查找

当簇头与上层 GEO 卫星层间连接关系改变时, 发送“通知”信息告知上层 GEO 卫星, 由接续的备份簇头与上层 GEO 卫星发送“告知”信息, 由 GEO 卫星建立 LEO&GEO 层间拓扑连接关系表。

通过上述计算步骤, 在数据传输时, 分为三种情况: 簇内路由、簇间路由和不同层间的层间路由。

簇内路由

在一个簇内, 若是源目的用户所接入的源目的用户卫星位于同一个 LEO 卫星簇内, 则接入后源卫星通过查找路由表可以快速将数据送达目的卫星;

簇间路由

若源用户卫星和目的用户卫星分属于不同的簇, 则根据 QoS 需要和网络状态选择传输该业务的卫星层, 如果业务为语音业务, 则通过查找簇间路由表完成数据传输; 如果业务为数据业务, 且路由跳数小于门限值, 则通过查找簇间路由表实现业务的传输。

层间路由

如果源用户卫星和目的用户卫星分属于不同的簇, 且业务为数据业务, 但 LEO 层网络资源不能满足该业务要求, 或者 LEO 层路径跳数超过门限值, 则将业务转至 GEO 层传输。首先将业务汇聚到每个簇的簇头, 然后通过簇头与上层 GEO 卫星的连接将业务中转到 GEO 卫星, 然后通过查找层间拓扑连接关系表决定下一跳是通过 GEO 层间链路传输到另一个 GEO 卫星还是下传到下层的 LEO 卫星。

即首先在 LEO 层簇内将数据包传递到簇头卫星, 然后通过层间路由将数据包传递到 GEO 卫星, 然后通过 GEO 卫星层间拓扑表的查找, 找到需要中继的下层卫星的簇头, 将数据传递到另一颗 GEO 卫星, 然后通过层间链路将数据下传到目的卫星所在的簇头。

综上所述, 对上述三种不同的情况, 其路由策略示意图如图 4-12 所示:

此路由策略具有如下特征: 对网络中的业务进行区分处理, 根据 QoS 需要和网络状态选择传输该业务的卫星层, 对于对时延要求高的语音业务通过低层 LEO 卫星传输, 对于数据业务, 如果不在同一个 LEO 簇范围或 LEO 层网络资源(即出现链路拥塞或节点失效时)不能满足该业务要求或者 LEO 层路由跳数大于门限值时, 就将该业务转到 GEO 层传输。该策略考虑时延指标和 ISL 带宽占用状况, 最优路径选择兼顾卫星系统有效性和可靠性。其计算步骤如图 4-13 所示:

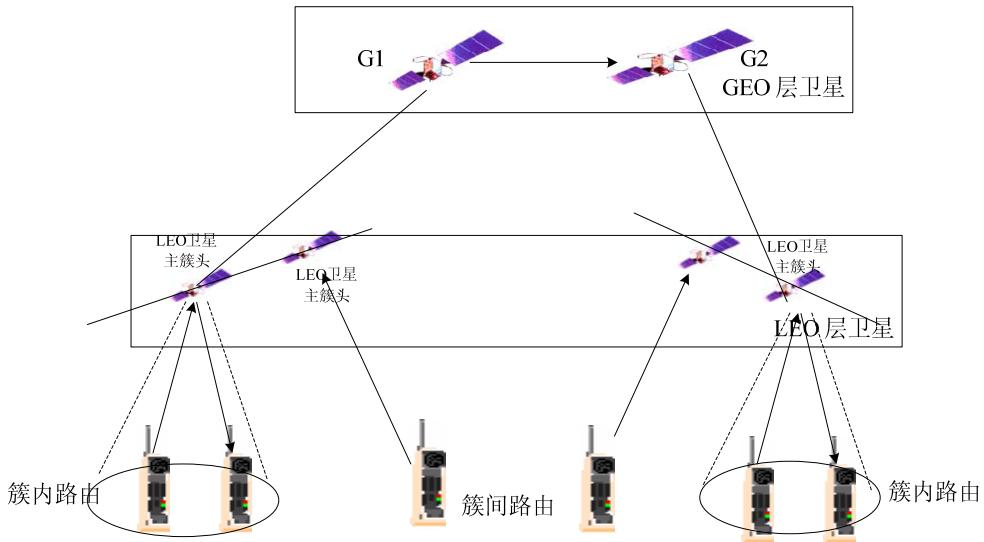


图 4-12 LEO&GEO 双层卫星网络结构的路由策略示意图

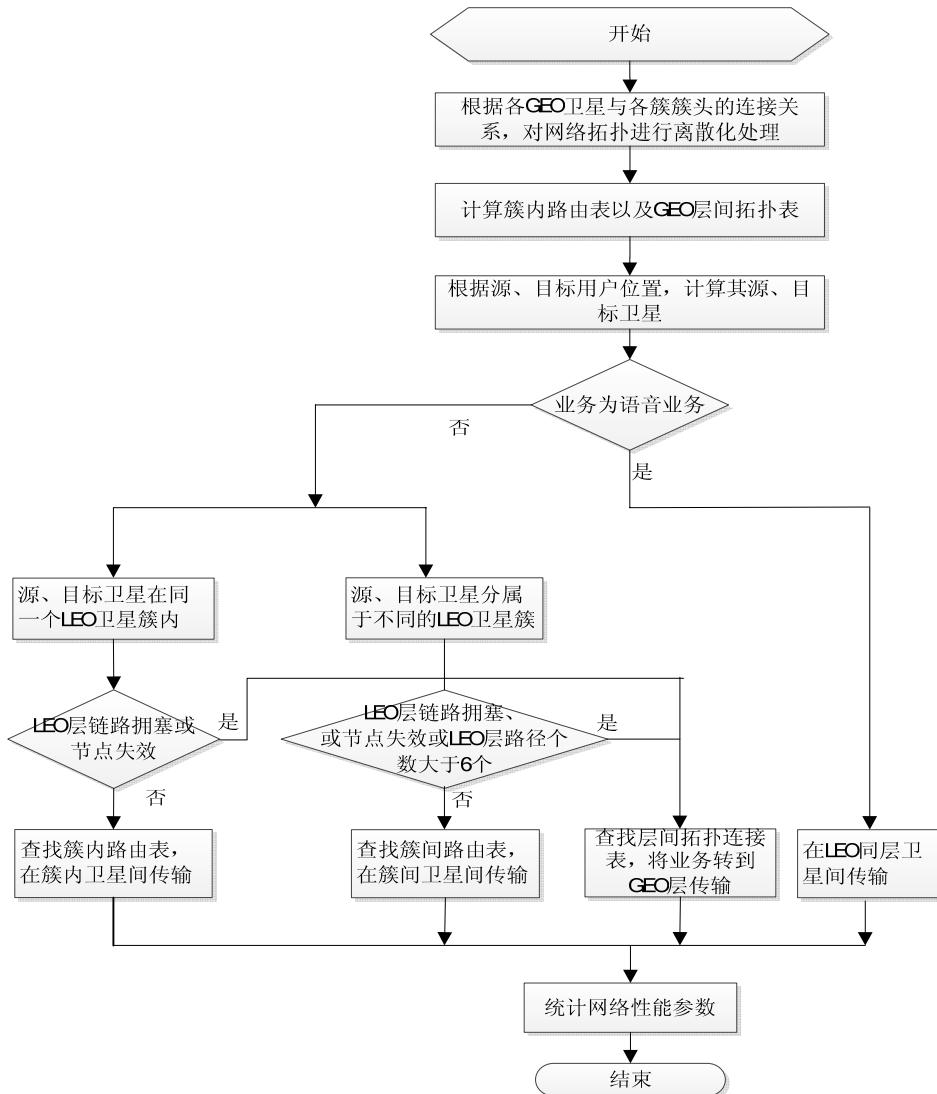


图 4-13 双层卫星网络路由策略计算步骤示意图

4.3.5 动态真实路由表的计算

原始路由表计算之后，由于流量负载的变化，可能引发 ISL 链路拥塞，则路由决策就不能及时反映网络中链路的实际情况，因此，在数据转发的过程中需要引入周期性链路状态更新机制和突发事件链路状态更新机制：

4.3.5.1 周期性链路状态更新机制

在卫星网络两个快照周期之间，如果没有通信节点或链路失效，各通信节点间的互连关系保持不变，但链路流量负载的变化和卫星的移动将导致链路状态的动态变化，尤其是对于簇间路由表的路径计算，由于不同簇的任意两个节点之间均有异轨链路，因此，簇间原始路由表的计算可以计算出多条满足要求的路径，这样尤其在语音业务的传输时，由于其对时延要求比较敏感，因此需要启动周期性的链路状态更新机制对原始路由表中的路径进行修正，以达到对卫星网络状态的自适应调整。周期性链路状态更新机制的计算过程如下：

- 1) 计算 SLSA：簇内每颗 LEO 卫星计算自己的链路状态通告 SLSA，并沿着轨道面报告给簇头卫星；
- 2) 簇头卫星收到簇内每颗卫星的 SLSA 后，形成本簇的链路状态信息库表项 1: SLSIB (1)；
- 3) 每个簇的簇头卫星依据本簇的链路状态信息库启动对簇间原始路由表的更新，将原始路由表计算的 n 条原始路径进行重新排序，以形成簇间真实的路由表。

4.3.5.2 链路拥塞触发更新机制

1) 拥塞发现

可以在数据转发过程中让各卫星实时监测其所有链路的出口分组交换队列缓存占用情况以预防可能出现的链路拥塞。在某一时刻，如果在卫星的分组交换队列中等待处理的分组超出一定的门限，则会导致分组排队和处理时延大幅增加，则认为该链路即将发生拥塞，此时，需要启动链路拥塞事件触发更新机制，将分组转发至备选下一跳方向。备选下一跳可以是同层的卫星，也可以是不同层的卫星。如果备选下一跳方向的出口队列缓冲也超过了设置的拥塞门槛，则触发新一轮的路由更新。

2) 触发更新

若当前卫星为 GEO 卫星，设为 G_i ，假设与之相连的同层内轨间链路或与下层的 LEO 卫星出现链路拥塞，则 G_i 将创建链路拥塞通告，通过 GEO-ISL 发送至 GEO 层内其它卫星，所有 GEO 卫星收到该通告后对层间拓扑连接关系表进行更新，并下发给所属的下层的管理簇的簇头卫星。

若当前卫星为 LEO 卫星，设为 Sat_{ij} ，如果是轨内链路出现拥塞，则由 Sat_{ij} 创建链路拥塞通告，传递给簇头卫星，簇头卫星据此启动触发更新，将簇内路由表的备选路径作为第一路径；若是轨间链路出现拥塞，则由 Sat_{ij} 创建链路拥塞通告，传递给簇头卫星，并由簇头卫星在簇间广播，重新启动对簇间路由表的计算。若是层间链路出

现拥塞，则由 Sat_{ij} 创建链路拥塞通告，由簇头卫星报告给上层 GEO 卫星，由 GEO 卫星重新启动对层间拓扑关系表的计算。

4.3.5.3 节点故障或链路故障时的处理

卫星网络中节点失效的原因有很多，如维护或者测试，临时或永久性故障，穿越极区或者海洋时为了节省能源而关闭天线。当一颗卫星失效时，所有经过这颗卫星的路径必须被重路由，以确保原先此通路上的数据包不会丢失。在此卫星网络中，采用了下述有效的措施来保证算法的抗毁性能：①卫星网络中通信节点间链路冗余设计方案；②LEO 星座分簇簇头失效时采用簇头选择备份机制；③卫星网络中簇头管理者失效时采用簇头兼容簇管理者功能的角色扩充机制。

(1) GEO 层：若一颗 GEO 卫星失效，则此时只剩下一颗 GEO 卫星，那么它就成为所有 LEO 卫星的上层管理卫星，此时需启动应急处理机制，需将 GEO 卫星上存储的层间拓扑关系表进行更新，计算每个簇内与此 GEO 卫星具有最长连接时间和次长连接时间的 LEO 卫星作为主簇头和备份簇头，并按照连接关系将卫星运行周期划分为 N 个离散时间间隔，路由处理步骤同前。

若二颗 GEO 卫星失效，则此时双层卫星网络退化为 LEO 单层卫星网络，仍可实现业务的通信和传输，但业务的 QoS 特性会受到比较大的影响。

(2) LEO 层：设 LEO 卫星簇内的卫星 Sat_{ij} 在某一时刻失效。无论失效卫星 Sat_{ij} 是否是簇头，簇的圆轨道面都被分割为带缺口的圆，簇内成员的连接关系被打破。针对这种情况，算法按以下步骤进行处理：最先发现失效卫星的邻居卫星，设为 Sat_{ij} ，创建失效卫星通告，发送至其他簇内卫星，簇内卫星据此更新自己的路由表。同时若失效卫星为簇头，则由备份簇头接替主簇头与上层 GEO 卫星通信，同时再选出另一个 LEO 卫星作为备份簇头。

4.4 算法分析和仿真评价

4.4.1 算法的创新性和算法的开销

算法相对 CDSNR 路由算法主要的改进有：(1) 自适应性主要基于：①不同种类业务区分处理机制；②路径资源以及路由跳数决定路由中转层数机制；③基于状态更新的链路拥塞触发更新机制。(2) 抗毁性主要基于：①卫星网络中通信节点间链路冗余设计方案；②LEO 星座分簇簇头失效时采用簇头选择备份机制；③卫星网络中簇头管理者失效时采用簇头兼容簇管理者功能的角色扩充机制。

算法的开销：

(1) 星上计算开销：LEO 层卫星只在主份簇头和备份簇头在卫星组网起始时需要对簇内路由和簇间路由进行计算，其他 LEO 卫星只需要查找路由表项即可，簇头卫星的计算开销为 $O(m \times n)$ ，其它 LEO 卫星无计算开销，所需的星上处理时间仅为查找

路由表的时间，为 $O(m)$ ；GEO 卫星只需计算层间拓扑连接表即可，计算开销为 $O(m)$ ，其中 m 为 LEO 层卫星数目， n 为 GEO 层卫星数目；因此此种算法具有非常小的星上计算开销；而对于 CDSNR 算法，其星上计算开销主要是网络中 GEO 卫星承担路由计算任务的代价，其计算复杂性为 $O(m^2 \times n^2)$ ，而对于 LEO 卫星来说，在星上只需要执行查表和数据转发工作，计算复杂性为 $O(m \times n)$ 。

(2) 星上存储开销：通常情况下，路由算法的存储开销主要是存储整个网络的路由表还有网络间的连接状态信息。对于本算法来说，由于利用此网络拓扑结构的特殊性，只需要在 GEO 卫星上存储层间拓扑状态信息，在每个拓扑快照周期内，每个 GEO 卫星只需存储与下层每个轨道卫星的连接关系，存储开销为 $O(m \times n)$ 。对于 LEO 卫星，在卫星节点无失效或故障时，其路由表是固定的，只需存储簇内路由表和簇间路由表即可，然后在每个快照起始时刻进行更新，对 LEO 卫星来说节省了一部分空间。对于 CDSNR 算法，在 GEO 卫星上需要存储大小为 $O(m^2 \times n^2)$ 的路由状态信息库和组内所有 LEO 卫星的路由表和自己的路由表，大小为 $O(m \times n)$ ，而 LEO 卫星只需存储大小为 $O(m \times n)$ 的路由表。

表 4-4 给出了上述星上计算开销、星上存储开销与 CDSNR 算法的性能对比。

表 4-4 两种路由机制星上计算开销、存储开销、星间通信开销对比

路由算法	计算开销		存储开销	
	LEO	GEO	LEO	GEO
CDSNR 算法	$O(m \times n)$	$O(m^2 \times n^2)$	$O(m \times n)$	$O(m^2 \times n^2)$ $O(m \times n)$
本文算法	$O(m \times n)$ (簇头卫星) $O(m)$ (其它非簇头卫星)	$O(m \times n)$	$O(m \times n)$	$O(m \times n)$

总体上来看，本文所提出的路由算法星上计算和星上存储能力的需求比较低，尤其是 LEO 卫星的星上计算开销与 CDSNR 算法相比有所降低。

4.4.2 仿真模型设计和仿真结果

在进行路由算法的仿真时，需要设定的参数如下：

表 4-5 仿真参数设定

仿真参数	数值
ISL 信道容量/kbit/s	1000
网络总通信量/ kbit/s	5000~100000
语音业务包平均长度/byte	200
数据业务包平均长度/byte	600
仿真时间/min	114/360
ISL 缓冲区/kbits	120

如图 4-13, 对双层卫星网络和单层卫星网络的平均传输时延进行了仿真对比, 通过仿真可以看到: 在网络总通信量较低时, 双层卫星网络传输时延明显大于单层卫星网络, 在链路利用率大于一定阈值情况下, 双层星座的平均传输延迟性能比较好, 其高带宽、多通路、处理能力强和可靠性高的优势开始显示, 使得其性能优于单层结构。

假设单层 LEO 卫星网络的传输时延定义为 T_{total} , 通过双层卫星网络传输时的时延定义为 T'_{total} , 下面通过一定的论证分析试图得出链路利用率以及低层卫星网络 ISL 跳数的阈值。

路径中的总的时延 T_{total} 由四部分组成: 上下行链路时延 D_{UDL} 、路径上每个 ISL 的传输时延 D_{ISL} 、排队时延 D_Q 、处理时延 D_P 。

$$T_{total} = D_{UDL} + \sum_{i=1}^N (D_{ISL} + D_Q + D_P) \quad (\text{式 4- 4})$$

在上述公式中, N 表示路径中经历的卫星节点总数。 D_{UDL} 和 D_{ISL} 的计算比较简单, 可以通过计算 UDL 长度和 ISL 长度, 除以传输速度即可。

下面通过一定的推导得出平均星上处理和排队时延。根据 Jackson 原理^[9], 每条 ISL 的数据包业务排队模型为 M/M/1/m 单服务窗混合制排队模型, 其中 M 表示服从负指数分布, m 表示每条 ISL 的数据包排队容量。数据包到来的间隔时间和服务时间均服从负指数分布, 参数分别为 μ 和 ν 。当系统中已有超过 λ % 的分组等待处理数据包时, 认为网络链路即将拥塞, 不再接收新的数据包, 数据包被转移到备选路径的下一跳链路。有:

$$\rho = \frac{\mu}{\nu} \quad (\text{式 4- 5})$$

数据包的平均处理和交换时延为:

$$W = \frac{1}{\nu(1-\rho)} - \frac{m\rho^m}{\nu(1-\rho^m)} \quad (\text{式 4- 6})$$

根据上述的计算以及文献[83]中的推导和分析, 我们粗略估计在一个卫星节点平均的排队和处理时延约为 25ms 左右, 相当于在卫星与卫星之间一跳的时延值。

双层卫星网络的传输时延 T'_{total} 由五部分组成: 上下行链路时延 D_{UDL} 、路径上每个 ISL 的传输时延 D_{ISL} 、排队时延 D_Q 、处理时延 D_P 以及 LEO 卫星与 GEO 卫星之间的层间链路 IOL 时延 D_{IOL} 。

$$T'_{total} = D_{UDL} + \sum_{i=1}^N (D_{ISL} + D_Q + D_P) + D_{IOL} \quad (\text{式 4- 7})$$

当 LEO 单层卫星网络容量过大导致 ISL 链路拥塞时，可以考虑将业务中转到 GEO 层卫星进行传输，拥塞的判决条件如前面 4.3 章节所述，链路出口队列的分组数超出了一定的门限值即认为拥塞，在仿真中我们认为链路利用率达到 80% 即认为链路发生拥塞，而此时：

$$T_{total} > T'_{total} \quad (式 4-8)$$

将公式 4-1 和公式 4-4 分别代入 4-5，并近似认为 ISL 星间链路传输时延为 25ms，排队和等待时延也为一条星间链路的时延即 25ms，不同层间的星间链路 IOL 传输时延近似认为 130ms 左右，通过计算可以得出，当低层 LEO 卫星网络中的业务过载，或者低层 LEO 卫星的路径跳数超过 6 跳时，通过 GEO 卫星进行中转传输，可以缓解链路拥塞，并降低业务的总的传输延迟。

原因在于：在链路利用率大于一定阈值情况下，链路可能造成拥塞，这样排队和等待的延时成为决定链路延迟性能的关键因素，会造成链路延迟大大增加，而如果此时有 GEO 卫星进行中转，虽然 LEO 到 GEO 卫星路径距离比较远，但可能两跳 IOL 即可完成数据传输，这时双层卫星网络的优势开始显现。

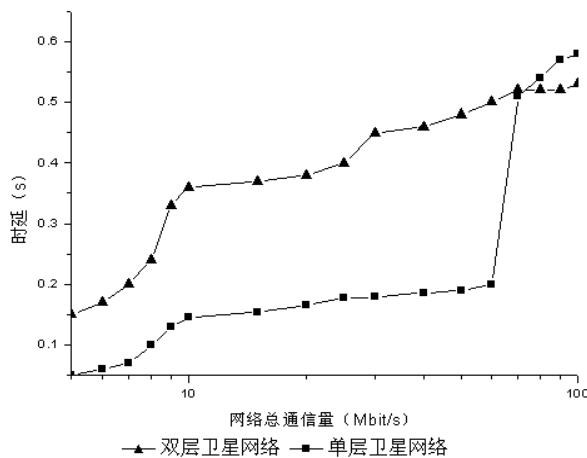


图 4-14 数据业务的平均端到端延迟

下图仿真了丢包率性能在单层 LEO 卫星网络与双层卫星网络下的性能对比。图 4-15 中设定网络总通信量为 50000kbit/s，图 4-16 中设定 ISL 信道容量 3000kbit/s。

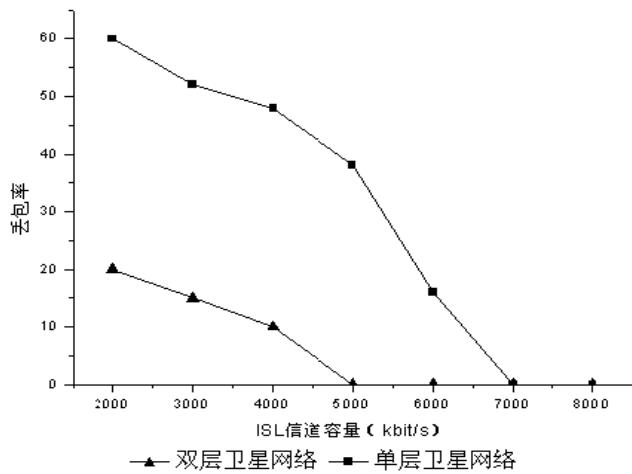


图 4-15 丢包率随 ISL 信道链路容量变化情况

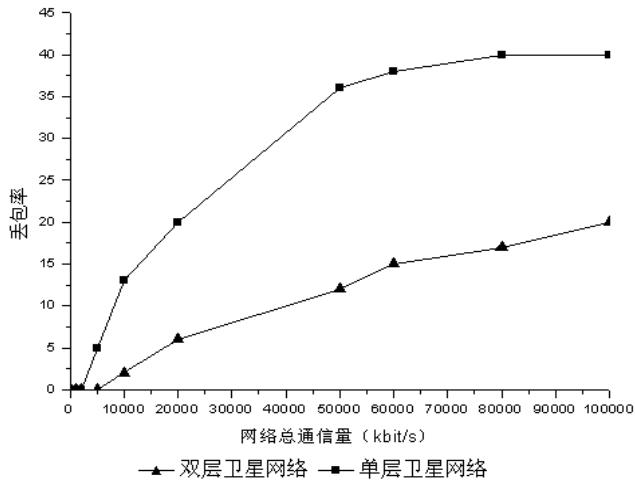


图 4-16 丢包率随网络通信量变化情况

由图 4-15、图 4-16 可以看出，在双层卫星网络下，平均丢包率性能远远低于单层 LEO 卫星网络。

归一化链路负载变化情况：图 4-17、图 4-18 仿真了归一化链路负载随时间变化的情况。在 ISL 信道容量和网络总通信量一定的情况下分别对 LEO 卫星网络和双层卫星网络的归一化链路负载进行仿真。其中 ISL 信道容量为 3000kbit/s，网络通信量为 50000kbit/s，以 LEO 卫星网络卫星 11 为例进行仿真，图 4-17 仿真了在 LEO 单层卫星网络下，与 LEO 卫星 11 相连的 4 颗卫星的 4 条星间链路以及 LEO 卫星层平均的负载变化情况；图 4-18 仿真了同样的四条链路在双层卫星网络下的星间链路的负载变化情况，以及 LEO 层、GEO 层的平均归一化链路负载变化情况，通过比较，可知采用动态路由策略的双层卫星通信网络中的 ISL 的通信负载分配较单层卫星网络平均，对网络负载起到了很好的均衡的作用。

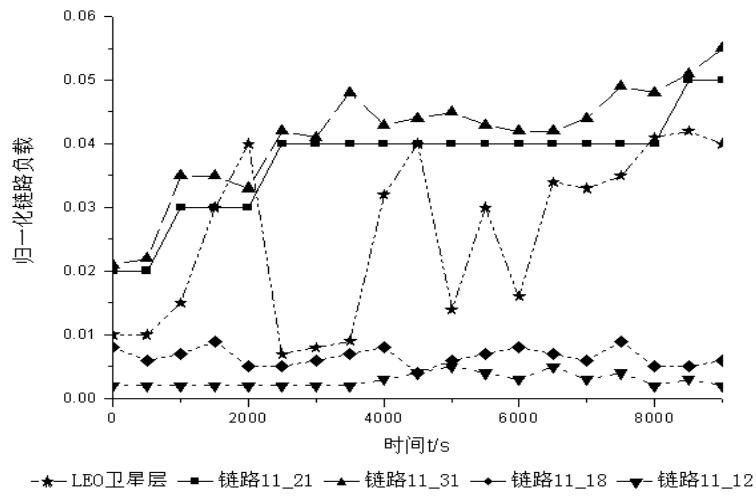


图 4-17 LEO 卫星 11、LEO 卫星层归一化链路负载随时间变化情况示意图

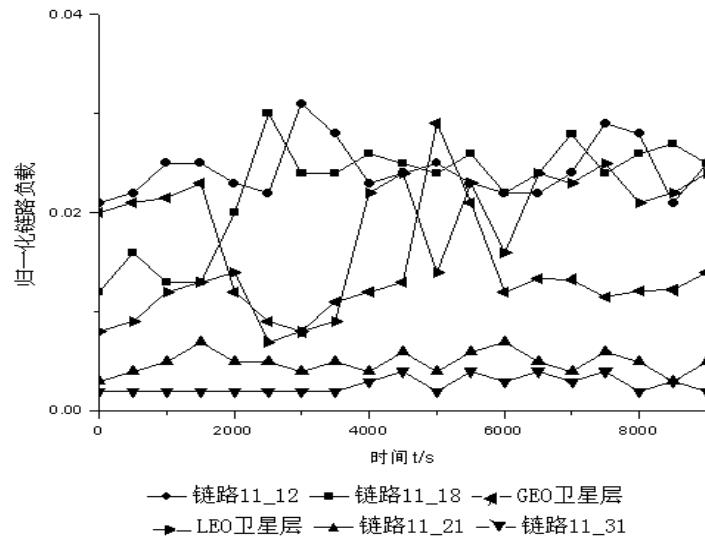


图 4-18 LEO 卫星 11、LEO 卫星层、GEO 卫星层归一化链路负载随时间变化情况示意图

通过上文仿真比较可以看出，结合了 LEO 卫星网络和 GEO 卫星优点的双层 LEO&GEO 双层卫星网络相比 LEO 卫星网络具有更好的覆盖特性，扩充了卫星的容量。而且与单层卫星网络相比具有更优的鲁棒性和抗毁性，在卫星节点或通信链路损毁的情况下，具有更多的可替换的备选路径，路径选择更加灵活，业务 QoS 可以得到保证。在此双层卫星网络模型下，综合考虑了链路时延和 ISL、IOL 链路负载，提出了一种能够负载均衡的动态路由算法，能够均衡整个网络的负载，更加均匀地分配网络流量，具有较小的丢包率、端到端链路时延、网络归一化链路负载。

4.5 本章小结

针对本文所提出的“间断性强连接”模型的双层卫星网络，通过分析此网络拓扑结构的特性，简化了星上路由策略的设计，提出了一种新的基于 LEO&GEO 双层卫

星网络的自适应动态抗毁路由算法。算法相对 CDSNR 路由算法主要的改进有：(1) 自适应性主要基于：①不同种类业务区分处理机制；②路径资源以及路由跳数决定路由中转层数机制；③基于状态更新的链路拥塞触发更新机制。(2) 抗毁性主要基于：①卫星网络中通信节点间链路冗余设计方案；②LEO 星座分簇簇头失效时采用簇头选择备份机制；③卫星网络中簇头管理者失效时采用簇头兼容簇管理者功能的角色扩充机制。(3) 计算复杂度和存储复杂度主要基于：①基于 GEO 通信覆盖域的 LEO 星座分簇管理机制；②通过分簇来实现分布与集中相结合的路由更新策略。

最后对算法进行了仿真验证，仿真结果显示，该路由策略考虑了网络中 ISL 的信息负载变化情况，自适应地选择最优路径，相对于 CDSNR 路由算法能够更加均匀地分配网络通信量，具有较小的丢包率、网络平均归一化链路负载和特定路径的综合路径权重，以及较低的平均阻塞概率和特定路径的阻塞概率。

第五章 LEO&GEO 双层卫星网络的分组调度技术

5.1 引言

星载交换结构和调度算法是影响交换性能的两个主要因素。基于 Crossbar 的交换结构按照内部数据缓存的位置和管理策略，分为输入排队结构 (IQ)、输出排队结构 (OQ)、联合输入输出排队结构 (CIOQ)、联合输入交叉点排队结构 (CICQ)。

OQ 输出排队结构最大吞吐量理论值为 1，交换矩阵调度简单，采用排队管理策略可以精确地控制 QoS 参数 (时延、带宽和公平性)，但要求 N 倍的加速因子，不适合大容量交换机，一般只用于理论研究。

IQ 输入排队结构加速因子为 1，但传统的 FIFO 输入排队存在著名的队头 (HOL) 阻塞问题，对于贝努利过程，N 趋于无穷大时，其带宽利用率只有 58.6%^[107]，对于突发过程，Crossbar 的带宽利用率更低^[108]。为了改进 HOL 队头阻塞问题，VOQ 机制可以很好的改善这一现象^{[109][110]}。VOQ 在输入端口对每个输出端口分别排队，消除了 HOL 阻塞，加速因子=1，但是 Crossbar 交换开关调度复杂，因此，VOQ 获得高性能的关键在于设计高效的 Crossbar 调度算法，匹配输入队列和空闲的输出端口，即“二部图匹配”。在已有的文献中提出了很多的基于 VOQ 的输入缓存的调度算法^{[111][112][113][114]}，比较典型的是采用循环轮转的方法对输入端口进行调度，然而由于输入端口和输出端口需要无冲突的匹配的限制，对于输入端口最多匹配 N 个输出端口，对于输出端口也最多只能匹配 N 个输入端口，因此对于交换机的吞吐量是有所限制的。

对于 CIOQ 联合输入输出排队交换结构，其对输入排队和输出排队交换结构进行了折中，通过适当的加速使交换系统的性能获得了一定程度上的提升，然而由于结构本身的限制，集中式的调度策略同样不可避免，因而，和 IQ 交换结构面临的问题一样，CIOQ 调度算法依然具有极高的算法复杂度。

随着 ASIC 技术的发展，在交换机中开辟大容量的存储器对数据进行缓存是可行的，因此 CICQ 结构逐渐成为人们研究的热点。CICQ 交换结构由于引入了输入交叉点缓存，可以将输入端口和输出端口进行有效的隔离，通过分别在输入端口设置调度器和在输出端口设置调度器独立进行调度，将输入端口和输出端口的带宽冲突隔离开来，可以简化调度算法的设计，达到增加交换吞吐量以及减小时延的目的，适合于大容量交换。

星载交换机由于卫星星上资源 (体积、重量、处理速度) 受限，且不可重构。因此选用适用于高速环境应用的 CICQ 交换结构作为星载交换结构。

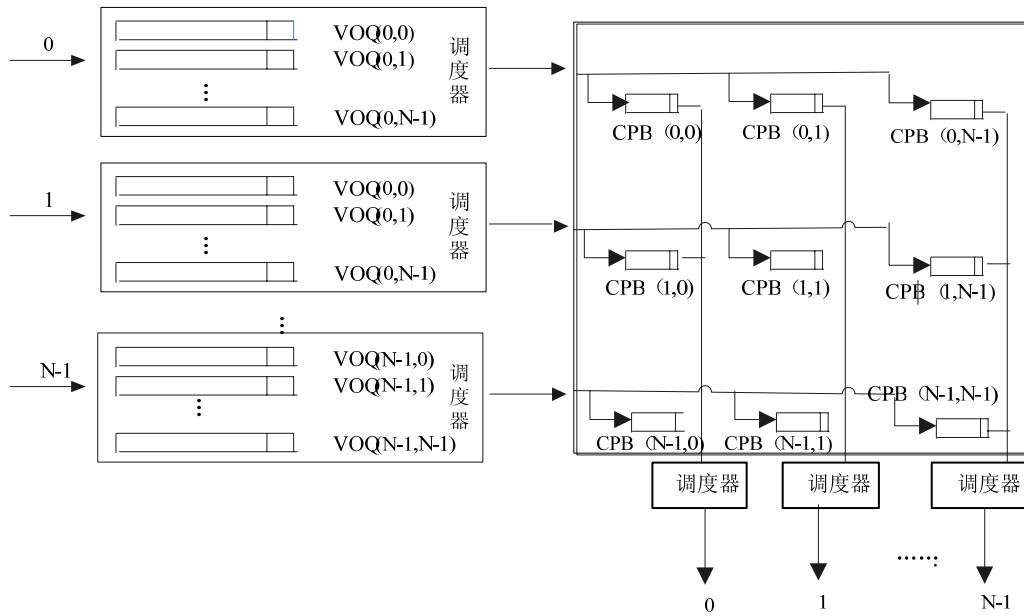


图 5-1 CICQ 交换结构调度模型

在 CICQ 交换系统中，一方面由于输入端调度策略和交叉点调度策略相互隔离简化了调度单元的设计，获得了交换系统整体性能的提升，另一方面，相互隔离的调度策略很难保证输入、输出端口在每个时隙都能达到最佳匹配状态。因此，如何利用其分布式调度策略的特点设计出具有高吞吐量的调度策略是本文要考虑的重点。

5. 2 CICQ 交换结构分组调度算法研究现状

5. 2. 1 分组调度技术性能评价指标

分组调度技术的主要衡量指标有：时延、公平性、算法复杂度、吞吐量、丢包率和带宽利用率等来衡量。

(1) 时延：时延分为分组平均时延 (D_a) 和分组最大时延 (D_m)。若交换系统在一定时间内交换的分组数为 n ， d_i 代表第 i ($1 \leq i \leq n$) 个分组的时延，那么 D_a 和 D_m 分别为：

$$D_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (式 5-1)$$

$$D_m = \max(d_1, d_2, \dots, d_n)$$

(2) 公平性：指链路带宽以公平合理的方式分配给共享链路带宽的所有业务流，保证网络资源能够公平分配，即能够对每个分组进行公平调度，使每个连接的 QoS 不受其他业务变化的影响；

(3) 复杂度：复杂度包括算法复杂度和工程实现的复杂度。复杂度决定了交换系统的可扩展性能。算法复杂度即需要执行的操作的数目，其取决于交换结构所采用的调度判决机制；而工程复杂度主要考虑算法的可实现性，需要考虑到系统的硬件资

源和工作速率等因素；

(4) 吞吐量：吞吐量定义为一个交换系统在稳定工作的前提下能够接纳的最大负荷（分组的最大到达速率），是衡量交换系统交换能力的重要指标；

(5) 丢包率：为在一定时间段内，交换系统丢弃分组数目 n_d 与到达交换系统分组数目 n_a 之间的比值，即： n_d/n_a 。

5.2.2 基本的分组调度策略

5.2.2.1 输入排队调度策略

目前基于 Crossbar 的 VOQ 输入排队的调度算法主要包括两大类：最大尺度匹配（Maximum Size Matching, MSM）算法和最大权重匹配（Maximal Weight Matching, MWM）算法。下面主要对代表最大匹配的 MSM 算法^[115]以及代表极大匹配的 PIM 算法^[116]和 iSLIP 算法^[117]进行介绍。

MSM 算法

MSM 算法也称为最大二部图匹配或最大基数匹配，可以利用图论中的二分图匹配算法来解决调度中的匹配问题。MSM 算法的复杂度为 $O(N^{5/2})$ ，它能保证找到最大匹配，但由于算法复杂难于实现，并且算法运行时间太长，因此该算法只存在理论上的研究意义，在实际中应用较少。人们转而研究代表逼近 MSM 的极大匹配算法。

PIM 算法

PIM 算法采用启发式迭代来达到极大匹配：

第 1 步，请求（request）。每个未匹配的输入端口向所有非空的 VOQ 队列对应的输出端口发送请求。

第 2 步，允许（grant）。假如某个未匹配的输出端口接收到若干输入端口的请求，则在所有的请求中随意选择一个输入端口允许其请求，并指示每个输入端口，本输出端口是否允许该输入端口。

第 3 步，接受（accept）。假如某个输入口接收到允许，则在允许此输入端口的输出口中间随意选择一个输出端口接受。

上述迭代中，每次选择都是随意的，因此需要经过 $O(\log N)$ 次迭代才能达到最大匹配，然而 PIM 算法在高速情况下实现随机选择有一定困难，另外整个过程不稳定，易受随机数发生器的制约。在单次迭代的情况下，吞吐率只能达到 63%。

iSLIP 算法

iSLIP 与 PIM 算法一样，每次迭代仍然还是分为请求、允许和接受三个步骤：

第 1 步，请求。每个有分组输入端口发送一个请求到每个输出端口。

第 2 步，允许。每个输出端口按照轮询的方式选择输入口允许其请求，同时通知每个输入端口是否被应答；

第 3 步，接受。每个输入端口按照轮询的方式选择输出口接受其允许，同时，通过

指针 a_i^q 记录并更新所指输出端口。如果选择的输出端为 j , 则指针 a_i^q 更新为 $a_i^q = (j+1) \bmod N$ 。只有应答信号被认可的输出端口改变其应答指针, 如果应答的输入端为 i , 则指针 g_i^q 更新为 $g_i^q = (i+1) \bmod N$ (N 为端口数目)。

iSLIP 算法巧妙地设计了轮询指针的更新条件, 避免了饥饿现象 (某队列出现长期得不到服务的现象), 同时消除了同步现象。输入为 i.i.d 均匀伯努利流时, 单次迭代的 iSLIP 算法可以达到 100% 的吞吐率。思科公司著名的 12000 系列路由器中就是采用 iSLIP 算法。下图 5-2 给出了一个典型的 iSLIP 算法的一次迭代过程的示意图。

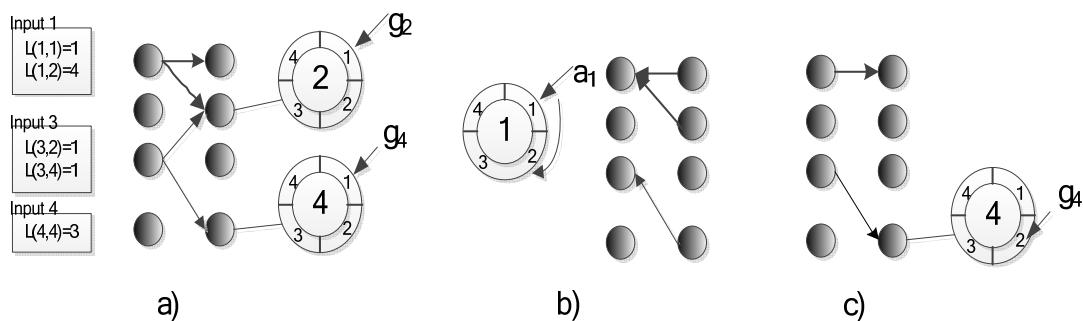


图 5-2 iSLIP 算法示意图

5.2.2.2 输出排队调度策略

输出排队调度策略运行于交换系统的输出端口, 按照一定的服务规则对到达输出端口的业务流进行调度和服务, 使所有的业务流按照一定的规则共享交换节点的输出链路带宽。一般将输出排队调度策略分为五类: 基于轮询的调度策略、基于优先级的调度策略、基于通用处理机共享 (GPS)^[118]的调度策略、基于时延的调度策略、基于服务曲线 (Service Curve) 的调度策略。

基于轮询的调度策略

轮询调度策略是比较简单也是最基本的一种调度策略, 它对所有输出端口队列进行无差别的服务。这种调度策略会造成队列之间的不公平的现象, 而且不具备为各类业务流提供 QoS 保障的能力。为了改善 RR 算法的性能, 研究人员相继提出了一些改进型的算法, 如加权轮询调度算法 (Weighted Round-Robin WRR)、差额轮询 (DRR) 等。

在 WRR 调度中, 每个队列被赋予了一定的权值, 权值表示对应输出端口的链路带宽比例, 即队列 i 的权值为 ω_i , $\sum_i \omega_i = 1$ 。在调度过程中, 调度策略顺次为每个队列服务, 允许权值大的队列在一次服务时可以调度多个分组, 这样在一次轮转服务过程中可以确保多次访问分配了高比例带宽的队列。WRR 可以优先为权值大的队列提供服务, 同时又能保证低服务等级的流始终能得到额定的服务资源, 而不在网络拥塞时

拒绝为低优先级队列提供服务。

WRR 调度策略针对 RR 策略的缺点进行适应性改进，使其在时延性能以及在变长分组环境下的不公平性得到了提高。

基于 GPS 的调度策略

GPS (General Processor Scheduling) 是一个理想化的流模型，它根据各队列的预分配的带宽对所有的活动队列同时服务，所以能使各业务流真正公平地共享链路带宽。对于流体模型系统，GPS 对每个队列业务流保证有明确的端到端时延上限，时延低并且公平性好。但由于 GPS 模型是基于流的系统，而实际的系统都是基于分组业务传输的，分组的传输是不能被抢占的，因此出现了一类用来逼近基于流的 GPS 模型的分组调度算法：分组公平排队 (Packet Fair Queueing, PFQ) 算法。

在 PFQ 中引入系统虚拟时间函数，系统虚拟时间函数代表分配给各队列的归一化服务量，当分组到达时，为其分配一个虚开始或完成时间标签，系统根据虚时间标签的大小对所有队列的队头分组依次进行服务。所有 PFQ 算法都是在虚时间函数的基础上按照一定的选择策略对队列分组进行调度，不同之处主要体现在虚时间函数的计算和分组选择策略这两个方面。用来逼近基于流的 GPS 模型的分组调度算法还有 VC 算法、SCFQ 算法、LFVC 算法、JVC 算法均是 GPS 算法的衍生算法。

5.2.2.3 CICQ 调度算法

在 CICQ 调度算法的研究中，研究人员参考并利用了上述算法，大部分是在上述算法的基础上发展起来的，主要分为两大类：

(1) 无队列状态信息的调度

如 RR-RR^[119]、DRR^[120](Differential Round Robin)、DRR-k^[121](Dual Round Robin) 等，算法的优点是简单、硬件实现容易。缺点是在均匀的业务流下性能良好，但在设计调度策略时没有考虑交叉点缓存队列的状态，同时主轮询指针的更新条件选择过于简单，灵活性较差，在非均匀的业务流下性能无法令人满意。

RR-RR 算法

RR-RR 算法即是在输入端和输出端都采用 RR 轮转的调度策略。在 RR-RR 的仲裁器中，每个输入端口和输出端口都设有一个轮转仲裁器，设备启动时，轮转仲裁器的指针随意设置其初始值，之后每一个时隙指针都前移，指针循环移动方向是固定的，它们的轮转周期与输入端口数或输出端口数相同。在每个时隙中，输入端口的轮转指针指向某一个 VOQ，该 VOQ 的队头信元就被送入相应的交叉点缓存，输出端口的轮转指针指向某一个交叉点缓存，该交叉点缓存的队头信元就输出到相应的输出端。

输入调度执行的步骤如下：

- 1) 轮转仲裁器随机指向其中一个 VOQ，若所指向的 VOQ 为空或相应的交叉点缓存满，则指针沿循环方向依次前移，直到找到能被调度的 VOQ，将该 VOQ 的队列头信元送入交叉点缓存。

2) 如果步骤 1) 执行成功, 则轮转仲裁器的优先指针前移到所找到 VOQ 队列的下一个位置。如果执行不成功, 也就是轮转仲裁器循环一圈后没有找到满足条件的 VOQ, 则指针保持原来位置。

输出调度执行的步骤如下:

- 1) 轮转仲裁器指向其中一个交叉点缓存, 若所选择的交叉点缓存为空, 则指针沿循环方向以此前移, 直到找到能被调度的交叉点缓存, 将该交叉点缓存的信元输出。
- 2) 与输入调度 2) 中的指针移动策略相同。

(2) 基于队列状态信息的调度

如 LQF-RR^[122]、OCF-OCF^[123]、LQF-DRR^[124] 等, 这些算法基本上都是在 RR-RR 算法基础上改进而来。

LQF-RR 算法总是优先服务队列长度最长的 VOQ, 尽量保持各个队列调度均衡, 在一定程度上改善了 RR-RR 算法在非均匀流量下的性能, 但是此算法复杂度为 $O(\log N)$, 限制了算法在高速处理环境下的应用。

OCF-OCF 算法是指在输入端和输出端均采用 OCF 算法, 根据信元在队列和交叉点缓存中等待的时间进行调度, 选择等待最久的信元优先进行调度。

文献[125]提出了一种 RR-LQD 算法, 从 RR-RR 算法的基础上发展而来, 在输入端调度中预测局部“最长”队列并尽力为其服务, 保持调度中各个队列长度的均衡。

这些算法基本思想都是通过为每个 VOQ 分配固定的调度份额、根据相邻调度 VOQ 长度关系的“差分因子”来约束轮转指针的更新。与无队列状态信息的调度算法相比, 这些算法当每个交叉点缓存容量为 1 个信元大小时, 在非均匀流量下能够获得较好的吞吐量和时延性能, 然而它们的算法复杂度较高, 并且它们的“份额”或者“差分因子”通常是经验所得, 不具有通用性。

(3) 基于交叉点缓存状态的调度

在文献[126]中提出了由于输出端口的调度依赖于输入端口的仲裁, 在输入端口采用有效的调度算法是决定整个交换结构调度性能的关键, 因此它提出了在输入端口采用一种“最短交叉点缓存优先”(SCBF)的算法, 并对此算法进行了仿真, 仿真结果表明, 采用此种算法, 不管输出端口采用何种 WORK CONSERVING 的算法, 均可以达到 100% 的吞吐量。在文献[127]中提出了一种基于缓存区状态的调度算法 MCBF, 该算法不依赖于输入队列的状态信息, 根据交叉点缓存的状态选择相应的输入端口和输出端口, 在 ON/OFF 流下, 具有最优的稳定性和最低的时延特点。虽然仿真结果表明这两种调度算法都能够在不同的业务模型下获得良好的时延性能, 然而它们的不足之处在于: 由于设计调度策略时仅仅考虑了交叉点缓存队列的状态而没有考虑输入端口虚拟队列的状态, 因而会导致虚拟输出队列的不稳定性。此外, SCBF 和 MCBF 调度策略的复杂度对交换结构的规模比较敏感, 因而在构建大规模交换系统时受到了限制。

以上均是 CICQ 调度算法在地面交换机方面的应用，在卫星网络方面的应用研究相关的文献还比较少。由于星载交换机的特殊性：其星上功率、体积以及处理能力受限；且分组在星地链路和星间链路传播时延比较大，因此需要设计简单有效的调度算法，复杂度低并能易于执行。此为星载交换机调度算法的一般要求，而对于本文提出的网络模型，涉及到 GEO 星载交换机和 LEO 星载交换机，对于 LEO 星载交换机，其需要交换的业务种类多，既包括数据业务又包括语音业务，还有信令信息等，在交换中主要需要考虑的是交换机调度算法的公平性以及针对不同种类业务的 QoS 指标的实现；而对于 GEO 星载交换机，作为整个低层网络的汇入点，业务量大，所以在设计其调度算法时，需要重点关注的是交换机调度算法的吞吐量指标。对于调度算法在星载交换机中的应用，文献[106]提出了应用于 LEO 卫星星载交换机的 Inline-DRR 调度算法，内嵌 DRR 核心思想是把 DRR 中的每一轮服务（在此称为外轮询）分解为多轮服务（称作内轮询），每次内轮询服务顺序不变，执行过程与 DRR 算法相同，不同之处在于内轮询中各业务流分配的固定服务额度降低。在 OPNET 中建立仿真模型，对此算法进行了仿真，但此调度算法没有很好的将队列的状态和缓存区的状态结合起来考虑，而且轮询指针更新操作比较简单，缺乏一定的灵活性。在某些流量模型下，一些算法的吞吐量会严重地下降，甚至变得不稳定。本文按照上文提出的 LEO 星载交换机和 GEO 星载交换机的要求，有针对性的提出了满足其特定要求的调度算法，并对其进行仿真。

5.3 基于流量控制的分组调度算法

本文基于队列长度和缓存区状态，提出一种基于流量控制的 CICQ 交换结构调度算法(FCSA)，可以充分利用各个交叉点缓存的空间，达到吞吐量的最大化，并有效的降低了分组传输的时延。

5.3.1 CICQ 交换结构建模与定义

图 5-1 为 CICQ 的交换结构模型。基于 Crossbar 的 CICQ 交换结构由输入队列、交换阵列、调度器和输出队列组成。对于任意的输入端口 i ，其维护了 N 个缓存队列，用于存储发往 N 个输出端口 j 的信元，记为 VOQ_{ij} , $1 \leq i,j \leq N$; 在 crossbar 结构内部，位于输入 i 和输出 j 交叉点处的队列，用于缓存从输入端口 i 发往输出端口 j 的信元(简记为 CPB_{ij} , $1 \leq i,j \leq N$); 每一个输入端口和输出端口都各自包含一个独立的调度器，对于输入端口 i 的调度器，它决定哪个 VOQ 的队头信元被送往相应的交叉点缓存，对于输出端口 j 的调度器，它决定将哪个交叉点缓存中的队头信元送往输出端口。交换单元交换一个信元的时间间隔为一个时隙。为了下面描述方便，下面对本文中出现的术语和名词进行定义：

N：交换结构的规模；

- VOQ_{ij} : 目的端口为 j , 输入端口 i 的虚拟输出队列;
 VL_{ij} : VOQ_{ij} 信元队列长度;
 VT_{ij} : VOQ_{ij} 的队头信元等待的时间;
 XPB_{ij} : 输入端口为 i , 输出端口为 j 的交叉点缓存;
 XL_{ij} : XPB_{ij} 内部的信元队列长度;
 XT_{ij} : XPB_{ij} 内部的队头信元等待的时间;
 $EVOQ_{ij}$: VOQ_{ij} 非空且相应交叉点缓存 XPB_{ij} 未满, 则此 VOQ_{ij} 为有效的 VOQ_{ij} ;

5.3.2 算法描述

对于一个 $N \times N$ 的交换结构模型, 比较常用的调度算法是设置一个份额分配函数 [128], 根据一定的函数为每个 VOQ 分配相应的调度份额, 函数的制定在下面章节讨论。

对于输入端口的调度, 调度过程如下: 假定对于输入端口 i , 用 $P(t) = [P_i(t)]_{1 \times N}$ 表示时刻 t 输入端口 i 轮询指针的位置向量, 用 $Q(t) = [q_{ij}(t)]_{N \times N}$ 表示 VOQ_{ij} 的当前份额的状态向量。现在讨论在 $t=n$ 时隙时, 输入端口 i 的 $p_i(n)$ 更新机制。在初始调度时, 为每个输入 VOQ 设置调度份额, 并进行排序, 根据调度份额的大小, 选择初始调度的位置, 假定选择轮询指针的位置为 $p_i(n)=j$, 如果 $VOQ_{ij} \in E_i$, 则在 $n+1$ 时隙, $p_i(n+1)=j$, $q_{ij}(n+1)=q_{ij}(n+1)-1$ 。否则, 按照轮询规则找到第一个满足 $VOQ_{ik} \in E_i$ 的 VOQ_{ik} 队列, 即 $p_i(n+1)=k$, 从此刻开始, IS 持续为 VOQ_{ik} 服务直到 $t=n'$ 时刻, $q_{ik}(n')=0$ 或者 $VOQ_{ik} \notin E_i$ 。

对于输出端口的调度, 维护两个轮询指针, 主轮询指针和辅助轮询指针。主轮询指针对应被 IS 选中且阻塞的 XPB , 而剩余的 XPB 属于第二类。在输出端调度时, 首先根据轮询规则从第一类中找到第一个满足 $XPB_{kj} \in E'_j$ 的 XPB , 如果没有满足条件的, 则从 i' 开始, 按照轮询规则从第二类中找到满足条件的 XPB 。

份额分配函数 Γ 的讨论

在 IS 工作工程中, 当输入端口 i 轮询到某一 VOQ_{ij} 时, IS 按照份额分配函数依据输入端口和交叉点缓存区的综合状态为其分配本次轮询的调度份额, 因此规则的制定影响着调度算法的性能。可以看出, 队列的长度、队列的到达速率、队列的服务速率、交叉点缓存区剩余的缓存大小决定着交换分组的时延和吞吐量。定义时刻 t 由 VOQ_{ij} 和 XPB_{ij} 所决定的通道的状态为 $S_{ij}(t)$ 。若 $\Gamma(S_{ij}(t))=l$, 则该算法逼近为 RR-RR 调度策略; 若 $\Gamma(S_{ij}(t))=C$ (C 为常量), 则该算法逼近为 DRR-k 调度策略。为了更有效地调度分组, 份额分配函数应能反映通道的综合状态, 直观上来讲, 份额分配函数应是通道综合状态恶劣程度的递增函数。用 x 表示恶劣程度的量化值, 则权值为变量 x 和规则的函数。并且, 份额分配函数 Γ 应满足如下条件:

规则 1. $\Gamma(0)=0$

规则 2. $\Gamma()$ 是增函数, $0 \leq \Gamma(x_1) \leq \Gamma(x_2) \leq C_q$;

规则 3 为了支持变长分组交换, $\Gamma(\cdot)$ 应是可微函数, 并有 $\Gamma'(\cdot) \geq 0$.

规则 1 说明了当前通道的状态 $S_{ij}(t)$ 为 0, 则其份额分配值为 0。例如当 $S_{ij}(t)$ 为 VOQ 队列首信元等待时间时, ‘0’ 表示 VOQ 队列没有信元在等待, 因而不需要为其分配调度份额; 规则 2 说明了 Γ 为恶劣程度的增函数, 若通道状态越差, 则为其分配的调度份额值越大, 越能优先得到服务, 由于每次分配的调度份额不能超过 VOQ 队列的占有率以及信元的等待时间等造成的大值, 因而 Γ 为有界函数; 规则 3 是对规则 2 的扩展, 说明了在变长分组交换下规则 $\Gamma(\cdot)$ 是恶劣程度的可导可微函数。 Γ 可以是线性的也可以是非线性的, 只要满足规则 (1) (2) (3) 即可。不同的份额函数具有不同的硬件实现复杂度, 下面分别针对两类函数进行分析和讨论。

(1) 线性函数

线性函数具有 $f(x)=ax+b$ 的形式, 其中 $0 \leq x \leq C_q$, 如图所示, 由规则 1 可知 $b=0$ 。线性函数的含义为虚通道的份额分配值与通道恶劣程度成正比关系, 其中 a 取值越大, 则 $f(x)$ 受其影响越大。线性函数在硬件实现上比较简单, 并且具有延时小的优点, 其缺点是这种线性增长的灵活性差, 对网络状态的变化反应较“迟钝”。

(2) 非线性函数

和线性函数相比较, 非线性函数具有较好的动态特性, 可以较为“灵敏”的感应网络状态的变化, 非线性函数有多项式函数、指数函数和对数函数等等类型, 不同的类型带来的 $f(x)$ 的映射值完全不同, 如下图 5-3 给出了两种不同指数函数的曲线示意图。非线性函数虽然反应较为灵敏, 但在硬件上不易实现, 硬件资源开销比较大。

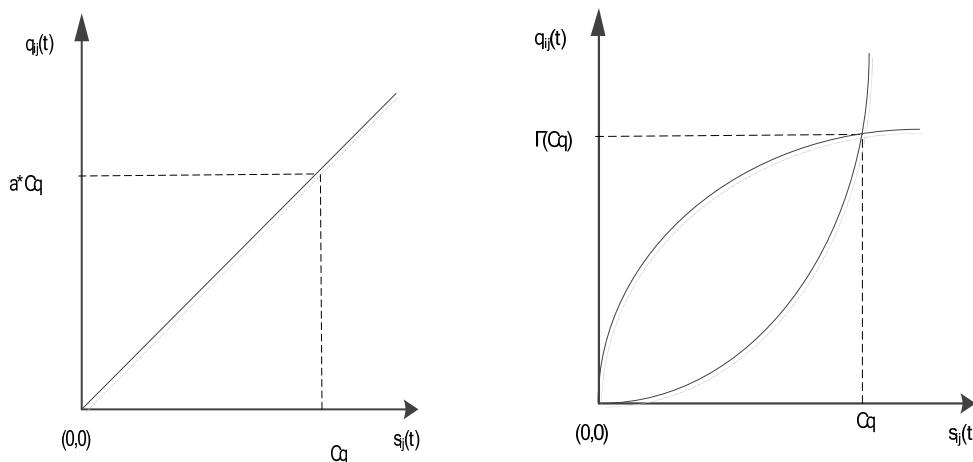


图 5-3 线性函数和非线性函数示意图

通过上述的分析, 由于星载交换机资源有限, 不适合采用硬件难以实现的非线性函数份额分配方法。但由于线性函数不能灵敏反映通道的状态, 因此, 本文对此进行改进, 提出了基于流量控制的 FCSA 算法, 既保留了线性函数复杂度低硬件易实现的优点, 又能较为准确及时反映通道的状态。在 IS 调度阶段, FCSA 算法依据交换系统的当前状态(而这种状态反映了网络中的流量分布)来指定虚通道的份额分配函数,

并在输出阶段首先对拥塞的通道进行处理，使算法具有良好的动态和公平特性。同时为了兼顾处理上的简单性和稳定性，在本文中，结合信元的到达速率以及队长，定义其份额分配函数为： $\Gamma(S_{ij}(t)) = a * \lambda_{ij} + b * (VL_{ij} - Li)$ ，通过调整参数 a 、 b 的值，可以调整到达速率与队长对每个队列权值的影响因子，同时定义输入端口 i 的门限值为：

$$Threshold_i = \frac{\sum_{j=1}^N VL_{ij}}{N}$$

通过对输入端口 i 的份额值的定义，可以得出对于每个输入端

口 i ，负载最重的 VOQ_{ij} 队列，可以按照权值排序，优先对负载最大的队列进行服务。同时为了防止调度算法对负载最重的队列无限制地服务，使得其他端口存在“饥饿”问题，在输入端口定义两个轮转指针，主指针指向队列份额值大于门限值的份额最大队列 LP ，辅助指针指向 $EVOQ$ 轮转指针 FP （即份额值小于门限值的队列中随机选择一个队列）。

输入端调度 (IS):

输入端采用负载最重优先调度策略，对于输入端口 i ，维护两个指针：主指针指向队列份额值大于门限值的份额最大队列 LP ，辅助指针指向 $EVOQ$ 轮转指针 FP （即份额值小于门限值的队列中随机选择一个队列）。在每个时隙开始时，即 $t=n$ 时， LP 指向端口 i 对应的负载最重的虚拟队列 VOQ_{ij} ，若 VOQ_{ij} 对应的 XPB_{ij} 不为满，则将其队头信元调度进 XPB_{ij} ，完成该端口的输入调度，并在下一个时隙继续服务此队列， $q_{ij}(n+1) = q_{ij}(n+1) - 1$ ，直到其份额值小于门限值；若此 VOQ_{ij} 对应的 XPB_{ij} 为满，则从辅助指针的位置寻找 $EVOQ$ ，如果找到，则该 $EVOQ$ 的队首信元被发送至相应的交叉点缓存区，并将辅助指针移向下一个位置；如果没有找到 $EVOQ$ ，则辅助指针保持不变。若 LP 指向的 VOQ_{ij} 小于门限值，则将 LP 指向下一个负载次重的队列 $EVOQ$ ，以此类推。

输出端调度 (OS):

在每个输出端口都维持两个指针，主轮询指针和辅助轮询指针。OS 将输出端口 j 对应的 $XPBs$ 分成了两类：被 IS 的轮询指针选中且阻塞的 $XPBs$ 属于第一类，即为 V ，剩余的 $XPBs$ 属于第二类，记为 V' 。在每个时隙开始时，从 V 中找到第一个满足条件的 XPB ，若 $V=\emptyset$ 或者没有满足条件的，则从 V' 中按照轮询规则找到第一个满足条件的 XPB ，直接将 XPB_{ij} 从 j 端口输出，并将 OP_j 轮转到 $XPB_{(i+1) \bmod j}$ 。

输入端伪码描述:

```

Input port i:
for(index=1; index≤N; index++)
{if(qij(n)>qj index(n)&&(qij(n)>Thresholdi))
    LP=j; }
if(VOQij∈Ei)
{qij(n+1)=qij(n)-1;
LP=j; }
else
{FP=k; }

```

输出端伪码描述:

```

Output port j:
Flag=0;
If(V!=Φ){
For(index=1; index≤N; index++)
{ k=(Zmj(n)+index)%N;
If(XBkj∈Ej&&XBkj∈V)
{flag=1;
Zmj(n+1)=k; }}
}
Else{
For(index=1; index≤N; index++)
{k=(Zaj(n)+index)%N;
If(XBkj∈Ej)
{ Zaj(n+1)=k; }}
}

```

图 5-4 输入端调度和输出端调度的伪码描述

5.3.3 算法仿真结果

对于 FCSA 算法的公平性、吞吐率以及时延指标，拟通过 OPNET 建模对其性能进行仿真。采用 OPNET 建立的网络模型如图 5-5 所示：

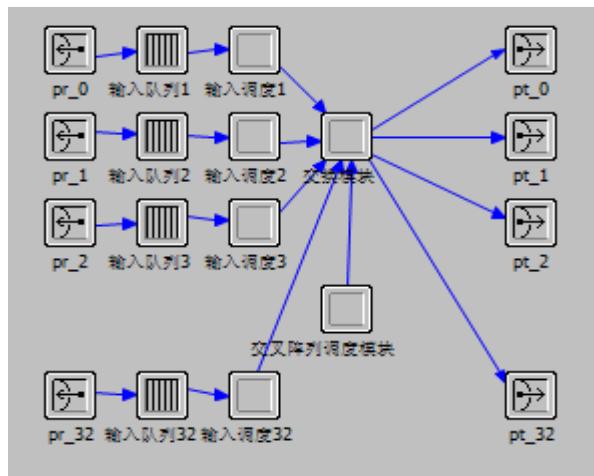


图 5-5 CICQ 交换的 OPNET 建模模型

在 32*32 网络模型下，对其在均匀流量与典型的几种非均匀流量模型下对 FCSA 算法进行了仿真，并与几个典型的 CICQ 调度算法 RR-RR、LQF-RR、OCF-OCF、进行了比较，同时与 OQ 交换结构进行了比较，仿真结果表明，此算法减小了调度时延，吞吐量也有相应提高，适用于对于时延和带宽要求较高的星载交换机。

① Uniform Bernoulli i.i.d Traffic

信元的到达过程是 Bernoulli i.i.d 的，并且每个 VOQ 具有相同的负载，即 λ_i , $j = \rho/N$, 任意的 i , 任意的 j ;

②Uniform Bursty Traffic

信元的到达过程用 ON-OFF 模型来表示，信元只在 ON 时期产生，ON、OFF 状态的长度服从参数为 p 和 q 的几何分布。突发信元的长度为 10 个信元。

图 5-6、图 5-7 分别仿真了在上述两种均匀流量模型下几种算法的时延性能的对比。

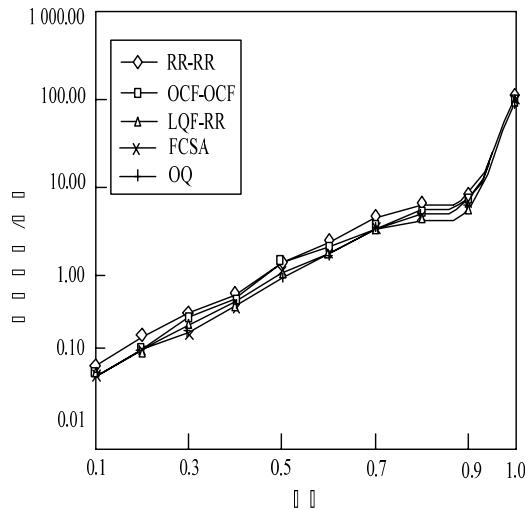


图 5-6 均匀贝努利业务流模型下算法时延性能比较

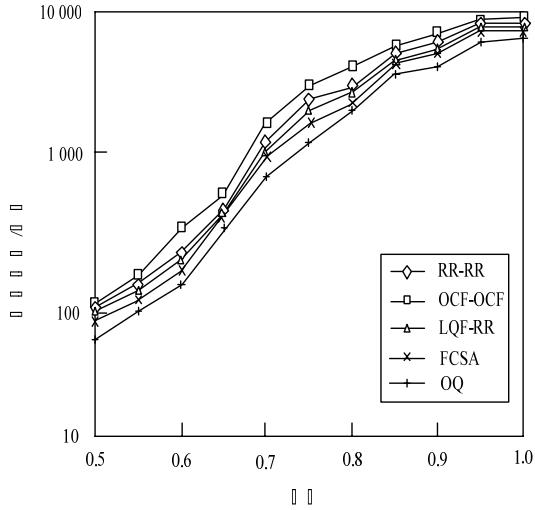


图 5-7 突发业务源模型下算法时延性能比较

从中可以看出，在均匀流量下，各 CICQ 算法的性能相差无几，且明显优于经过 4 次迭代的 iSLIP 算法。在突发流量下各种 CICQ 算法的性能发生了一定的分化。其中，OCF_OCF 算法的性能最差；而 FCSA 算法的性能最接近 OQ。

③非均匀流量

论文采用弱对角流量作为非均匀流量来测试各种算法的性能，在弱对角流量下，分组的到达是满足 Bernoulli i.i.d 的，且 λ_{ij} 的速率 $\lambda_{i,j}$ 满足：

当 $i=j$ 时， $\lambda_{ij} = \rho [w + (1 - w)/N]$ ；

当 $i \neq j$ 时， $\lambda_{ij} = \rho (1 - w)/N$ 。

其中， N 代表交换结构的端口数； ρ 代表端口的负载率； w 为非平衡因子。当 $w=0$ 时，该流量模型退化为均匀流量模型。而当 $w=1$ 时，该流量完全不平衡，即所有从 i 端口产生的流量全部去往 j 端口($i=j$)。这是一种典型的非均匀流量，通常用来模拟具有热端口的情形。下图仿真了当 $w=0.7$ 时各算法的时延性能和吞吐量性能比较。

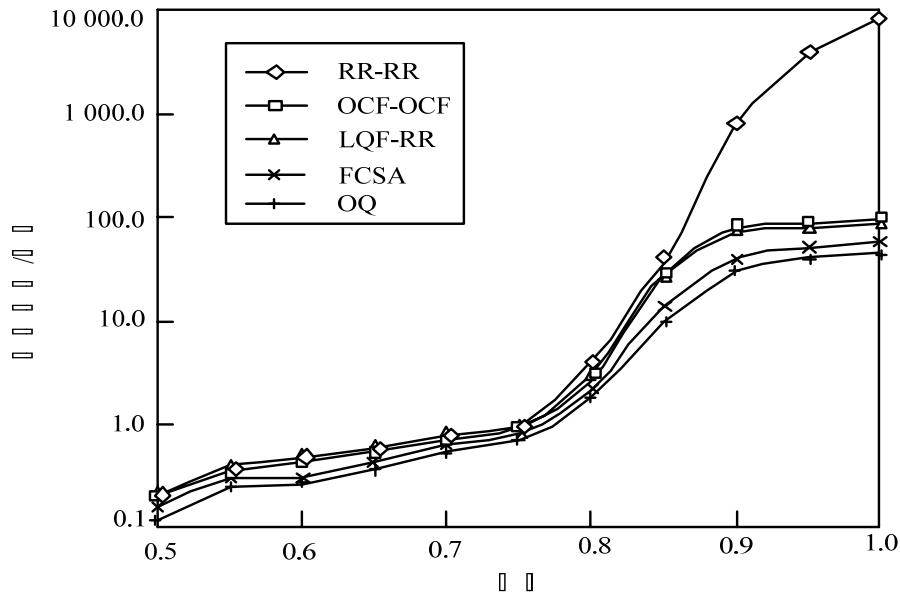


图 5-8 非均匀流量模型下的时延性能比较

图 5-9 为几种 CICQ 算法在弱对角流量下的时延性能对比。可以看出, RR-RR 算法在弱对角流量下, 当负载大于 0.8 时已经不能稳定工作, 在剩余的 3 种 CICQ 算法中, FCSA 算法表现最佳。

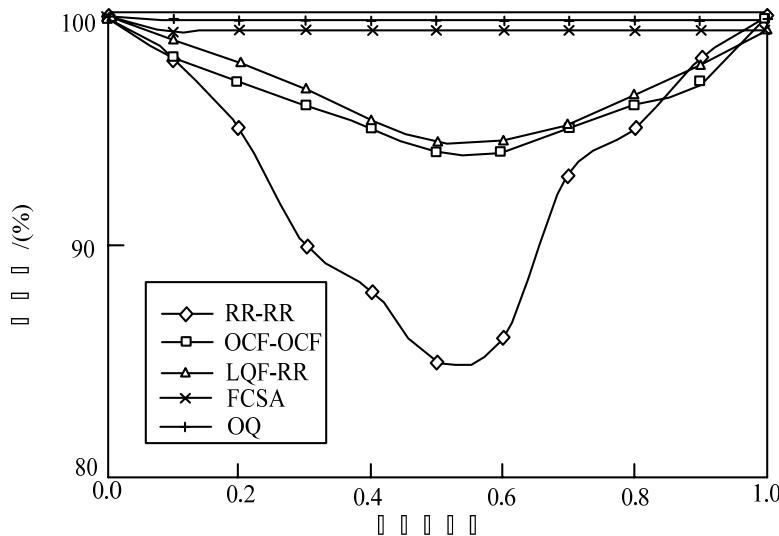


图 5-9 非均匀流量模型下的吞吐量性能比较

从实验结果可以看出, FCSA 算法有较高的吞吐率。

5.3.4 算法小结

复杂度分析:

基于无状态信息的 CICQ 调度算法一般采用轮询的调度策略, 如 RR-RR 算法, 在输入端和输出端分别采用复杂度为 $O(1)$ 的轮询操作, 因此, 整个算法的复杂度也为 $O(1)$ 。基于状态信息的调度算法一般在输入端或输出端采用排序操作, 如 OCF-OCF

在输入端和输出端均对信元的排队时间排序以进行调度, LQF-RR 则是在输入端对信元队长排序。排序操作可以采用树形比较的方法来实现, 其算法复杂度为 $O(\log N)$ 。FCSA 算法在输入端同样采用了 LQF 策略, 其复杂度为 $O(\log N)$, 而在输出端调度过程中只进行一次比较操作和指针轮询操作, 算法复杂度为 $O(1)$, 因此 FCSA 算法与 OCF-OCF、LQF-RR 具有相同的算法复杂度 $O(\log N)$ 。另外, 排序操作可以在硬件中实现以提高交换结构的性能。

算法特点:

(1) 对于高负载的队列, 如果其到达速率大于离开速率, 则队列会不断增长, 其队列权值也将会增加, 根据指针的更新规则, 易知队列负载较重的队列会优先得到服务, 可以较为灵敏地感应网络状态的变化, 依据交换系统的当前状态来分配服务时间, 具有良好的动态特性, 抗突发性好。同时又定义一个门限值, 不会使系统一直为某几个队列服务, 当权值低于门限值时, 主指针就会被移动到其他位置, 从而可以避免发生饿死问题。

(2) FCSA 算法在不增加算法复杂度的情况下, 能够自动适应网络流量的变化, 特别是在各种非均匀流量下具有良好的性能。

5.4 星载交换调度算法仿真

5.4.1 星载交换体制

目前网络交换体制主要有电路交换和分组交换方式。电路交换方式要求通信收发双方之间建立一条物理的传送通路, 在整个通信过程中该条电路由收发双方固定使用, 只有当双方通信结束拆除电路后, 其它用户才能再使用该条电路。其主要优点是信息传送时延小、实时性好、不易产生拥塞, 硬件实现简单, 功耗较低; 缺点主要是电路资源被双方独占, 网络资源利用效率较低。如果星座系统采用电路交换, 卫星节点之间需要进行大量的信令消息的交互和处理来重新进行电路资源的分配, 用户的频繁切换更增加了交换机的信令处理负担。分组交换的实质是存储转发。主要优点是实现了用户信息对电路的统计复用, 网络资源利用率较高; 主要缺点是网络附加的信息较多、处理较复杂, 分组传送时延有抖动。分组交换包括不定长和定长分组两种类型。目前不定长分组交换体制的主要代表技术有 IP 和帧中继, 定长分组交换技术的代表是 ATM 交换技术。如果采用定长分组交换体制, 则交换单元的长度等于按规定的长度即可, 但如果采用不定长的分组交换体制, 则在存储中需要采用复杂的动态配置存储管理机制, 在硬件实现上实现变长分组交换比实现定长分组交换要复杂得多 [129][130][131]。

ATM 交换是快速分组交换的一种实现方式, 它采用面向连接的实现方式。其固定长度的信元结构便于用硬件来实现高速交换, 但由于 ATM 交换涉及虚电路和虚路径的建立和维护, 如果在卫星网络中采用基于 ATM 交换的方式, 由于用户和卫星的

移动性将会导致链路频繁切换和重新路由，因而连接的复杂性不可避免。

IP 交换技术正在演变成为未来宽带骨干网的核心技术。IP 交换技术采用变长的分组交换方式，可以对 IP 协议进行适应性修改，以实现端到端的差错控制和流量控制，并且可以提供服务质量（QoS）保证，具有很大的灵活性。

根据如上分析，由于本卫星网络的主要业务为非实时短数据业务的特点，即业务信息、信令、测控、管理等信息，因此采用 IP 分组交换方式更为适合。在 CICQ 分组交换时，可以采用基于定长信元的分组交换体制也可以采用不定长的分组交换方式，下面对其各自的优缺点进行分析。

定长信元方式交换

在采用定长信元交换方式时，输入的变长 IP 分组首先要被分割成定长信元，信息在交换网络中以信元为单位转发，在输出端口需要将信元重新组装为变长 IP 分组，因此需要在图 5-1 所示的交换网络中在输入端增加分组切割模块，在输出端增加分组重组模块。这种交换方式虽然实现简单，所需交叉点缓存容量小，但是会带来下面两个主要问题：

- 1) 分组切割和重装会带来系统开销，使网络应用效率下降。并且有时需要网络加速来抵消系统开销，最坏情况下需要近 2 倍的加速；
- 2) 属于同一分组的信元在传输过程中可能由于信元丢失或乱序而造成整个分组无法重组，使系统网络资源造成浪费。

不定长分组方式交换

变长分组交换方式以变长分组为交换单位，可以减少分组切割和分组重装开销，提高网络的转发效率，一次调度匹配传完一个完整分组，可以保证一个分组完整到达输出端口，不会出现信元交换的资源浪费现象。另外，从交换结构来说，CICQ 交换结构将交叉点缓存设置为分组最大长度，以分组为单位进行调度，不需要对分组做任何处理，可以说是一种天然支持变长分组交换的结构。

表 5-1 分组交换体制比较

交换方式	优点	缺点
定长信元交换方式	所需交叉点缓存容量小，实现简单	系统开销增大，网络应用效率下降
不定长分组交换方式	网络效率高，比较适合应用于 CICQ 交换结构中	实现较复杂

针对星载交换网络的无线环境、频繁切换和星载处理能力受限和系统中业务种类多、节点卫星业务的 QoS 要求高的特点，表 5-1 对上述两种交换方式进行了比较，从表中可以看出对于采用 CICQ 交换结构的星载交换机，采用不定长分组交换的 IP 交换方式则更有优势。

5.4.2 卫星载交换机模型

对于 LEO 卫星交换机和 GEO 卫星交换机，其基本的组成结构是相似的，其主要由以下几个基本组件组成：输入接口、输出接口、交换结构和路由处理器。输入输出接口是路由器和网络物理链路的连接点，它们分别负责从物理链路上接收和发送分组到链路上，并且对分组做相应的处理；交换网络负责连接输入和输出接口，本文采用的是 CICQ 的交换网络，而路由处理器则一般负责路由协议的运行、路由信息的分发以及用于分组转发的路由转发表的计算和更新。其逻辑框图如图 5-10 所示：

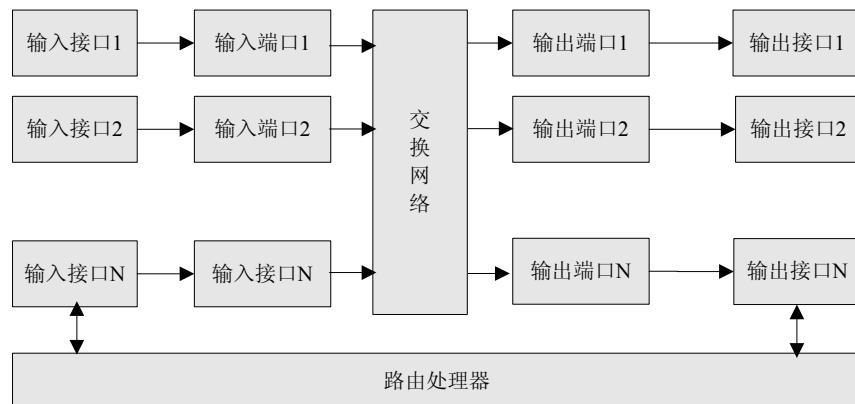


图 5-10 星载交换机逻辑框图示意图

在交换网络中，交换结构的选取和调度算法的采用是影响分组交换性能的关键，因此下文对本文提出的分组调度算法进行介绍。

5.4.3 星载区分服务建模及仿真

卫星星载交换需要实现对语音业务、低速数据业务、高速数据业务、系统信令、测控信息、网络管理信息的承载和交换。其需要支持的业务种类多，分组长度不同，并且具有突发性强的特点。星载交换机对应的端口有用户链路、馈电链路、星间链路，不同链路的传输速率不同，根据星载业务的特点，输入端口有三类业务：信令分组（包括测控信息和网络管理信息），以泊松分布到达；语音业务分组，到达模式和语音持续周期为泊松分布；数据分组为 on-off 突发模型。将其业务分为三个优先级，对不同的业务分配不同的权重。信令分组优先级最高，为第一类业务，语音分组次之，为第二类业务，数据分组优先级最低，为第三类业务。为了在调度时区分不同的业务分组，CICQ 输入端口将每一 VOQ 扩展为 3 个子虚拟输出排队队列（sub-VOQ），每一个 sub-VOQ 用来缓存不同类型业务的分组，同时每个交叉点队列相应的被分为 3 个交叉点队列，记为 sub-CPB。扩展后的 CICQ 交换结构 DCICQ 如下图所示：

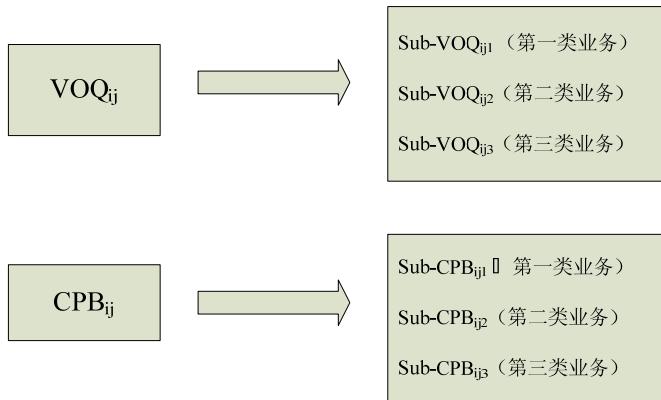


图 5-11 支持优先级服务模型的 DCICQ 交换结构

采用 DCICQ 交换结构的星载交换机逻辑框图示意图如图 5-12 所示：

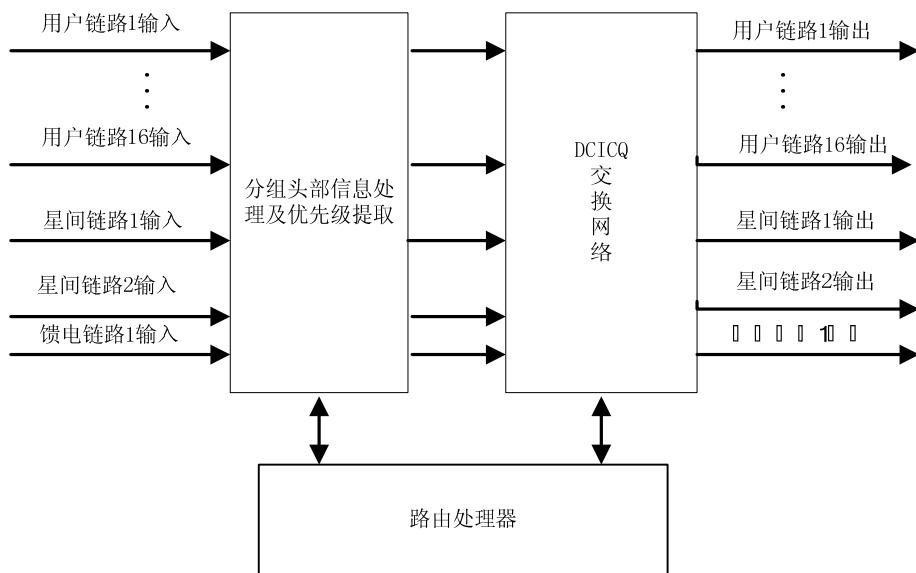


图 5-12 星载交换机逻辑框图示意图

结合上述卫星的特点，在星载交换机中对上面提出的 FCSA 调度算法进行适应性修改以实现支持星载交换不同优先级的服务类型。在输入端采用 FCSA 算法的基于份额的调度机制，按照优先级排序，首先对优先级最高的业务进行处理，只有轮询到的优先级高的业务执行完毕才轮询到优先级次高的业务，依次类推。在输出端由于有多种业务存在，在交叉节点缓存与输出端口之间为防止过于贪心的高优先级业务服务并避免低优先级业务被“饿死”，考虑采用基于带宽约束的控制机制。

5.4.3.1 相关定义及带宽分配方案

首先定义每类业务的统计带宽为 B_p ($p=1,2,3$) 表示对于每类业务的统计带宽； BA_p 代表任意一个输出端口每类业务流的预约带宽。

在上文分别定义了三类业务，第一类业务是享有最高优先级的服务类型，为此类业务规定一个峰值服务速率 MIR，即最大服务速率，为防止过于贪心的第一类业务服务，在交叉缓存与输出端口之间超过该服务速率的请求就会被拒绝。同时还为第一

类业务规定一个预约承诺服务速率 (Committed Information Rate) CIR, 记为 CIR(1)。由于第二类业务享有确保最低带宽的服务, 因此, 对于第二类业务来说, 预约承诺服务速率相当于最小服务速率, 即确保最低带宽的服务, 即 CIR(2)。对于第三类业务, 由于只需为其提供尽力而为的服务, 其只要求保证带宽和丢包率, 不涉及延迟和抖动, 其服务原则是无论网络是否发生了拥塞, 都能得到所约定的最小的带宽。

在输出端调度时, 为每类业务分配一个计数器, 周期性地对不同种类的业务在输出端口获得的带宽进行统计, 根据端口实际获得的带宽与其预约分配的带宽的大小进行比较以确定当前对哪个端口进行服务。周期 T 的选取应该遵循下面的规则:

$$T \cdot CIR(p) > L_{\max} \quad (\text{式 5- 2})$$

在上式中, L_{\max} 表示调度时分组数据的最大包长。

5.4.3.2 DFCSA 算法描述

与 FCSA 算法一样, 整个调度过程分为两个阶段, 输入端调度 IS 和输出端调度 CS, IS 调度单元和 CS 调度单元可以分布式地并行工作。

IS 调度阶段, 以输入端口 i 为例, 描述算法:

在输入端口, 在 FCSA 算法的基础上, 增加一个优先级指针 Ppoint, 在不同优先级的 P 个集合之间进行轮转, 但对于 Ppoint 指向的输入端口 i, 按照 FCSA 算法的输入端口的调度过程执行。假设在初始时, Ppoint 指向的优先级为第一类业务的端口 i, 则调度过程如下图所示:

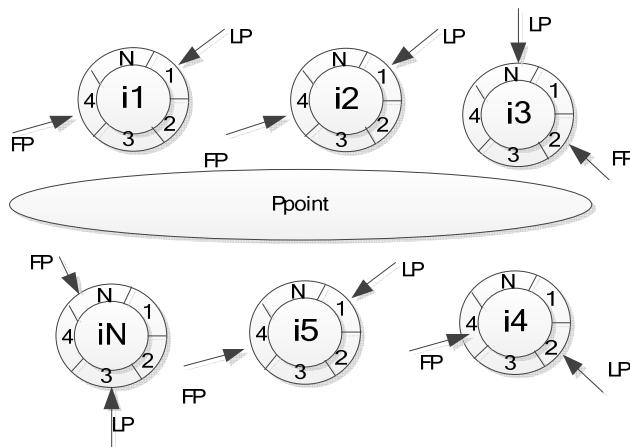


图 5-13 优先级轮询输入端调度示意图

在上图中, Ppoint 作为优先级指针按照顺序分别为优先级第一类业务、第二类业务、第三类业务顺次服务。LP 指针为按照上节 5.3.2 描述的队列分配函数确定的份额最大的队列, FP 指针为辅助指针。

CS 调度阶段, 下面以输出端口 j 为例, 描述算法:

对于任一个输出端口 j 的调度器, 同样地, 设置一个优先级指针 Ppoint, 在 3 个集合之间进行大轮询, 起始状态 Ppoint 指向优先级为第一类业务的输出端口 j。相

对于 FCSA 算法，需要增加一个监视器，周期监控第一类业务统计带宽是否已小于预约带宽，如果 $B_1 < BA_1$ ，则监视器置 1 提示。在调度时，优先级指针指向第一类业务时，即 $P_{point}=1$ 时，如果 $B_1 > t \cdot MIR$ ，则优先级指针转向为第二类业务服务，如果 $B_2 > BA_2$ ，则优先级指针更新至 $P_{point}=3$ ，同时要检查存在 $B_1 > BA_1$ ，如果不存在则优先级指针转去为第一类业务服务，当一旦出现 $B_1 > t \cdot MIR$ ，则优先级指针转回调整前的指针处执行。优先级指针的更新考虑了带宽占用的情况，采用这种基于预约带宽约束的流量控制，DFCSA 算法采用这样一种流控机制可以根据不同类型业务的预约带宽实现三类业务的带宽分配，满足其不同的 QoS 需求。

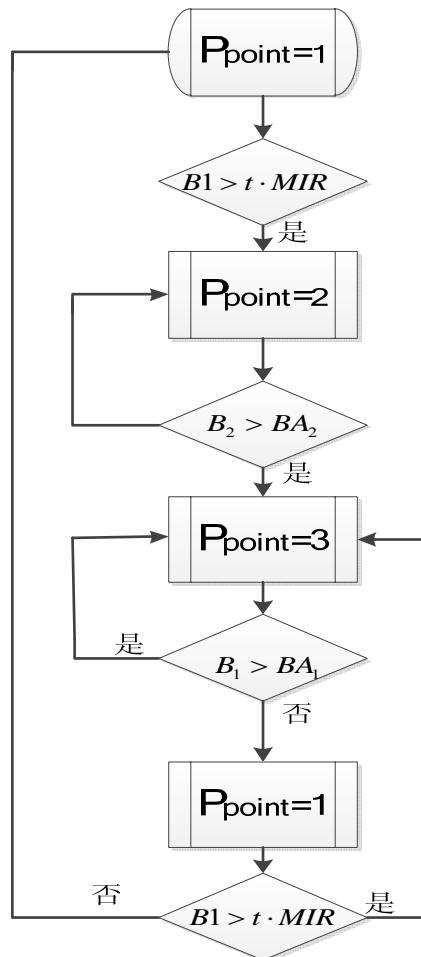


图 5-14 DFCSA 算法输出端优先级轮询指针更新选择示意图

5.4.3.3 DFCSA 算法理论分析及公平性论证

下面对 DFCSA 算法的性能进行理论分析和公平性的论证。

算法理论分析：

(1) 相对于 FCSA 算法，份额分配函数增加了优先级信息，在输入端通过优先级指针轮转实现对不同类业务的区分服务，在输出端通过定义预约带宽和统计带宽实现对不同种类业务流的流控机制，因此具有与 FCSA 算法相同复杂度低的特点，对于

同种类业务，只需在内部执行 FCSA 算法即可。

(2) 采用基于预约带宽约束的流量控制机制，实现所有预约带宽在第一类业务与第二类业务之间的分配，不仅能有效处理不同业务类的突发数据，比较迅速地缓解网络的拥塞状况，而且又保持了各优先级业务类的相对公平性。

算法公平性论证：

公平性通常采用归一化服务量即服务公平指数 (Service Fairness Index, SFI) (单位时间服务量与分配服务速率的比值) 来衡量。对于任意一种调度算法，对端口 j 分别首先定义对于优先级为 p 的业务获得的实际带宽比 FQ_p 、理想带宽比 IFQ_p ，则服务公平指数 SFI 定义为第 p 个业务流获得的实际带宽比 FQ 和理想带宽比 IFQ 的比值，其值越接近 1，说明调度算法公平性越好。

假设定义第三类业务为只需尽力而为的服务类型 BE (Best Effort)，BE 业务没有预约带宽，只需为其提供尽力而为的服务，因此在上文中定义的预约带宽只适用于在第一类业务 EF 业务和第二类 AF 业务之间分配的，我们所讨论的公平性也是针对这两种业务类型来讨论的。

由于仅当交换结构处于拥塞导致不同业务流存在带宽争用时才需要考虑公平性。假设输出端口 j 所有第一类业务和第二类业务的到达速率均超出其预约带宽，令 ST_p 为第 1~n 个周期优先级为 p 的不同类业务获得预约带宽的字节数， ST 为第 1~n 个周期所有第一类业务和第二类业务获得预约带宽的字节数。则对于端口 j，其实际带宽比、理想带宽比以及公平指数分别定义为：

$$\begin{aligned} FQ_p &= \frac{ST_p}{ST} \\ IFQ_p &= \frac{BA_p}{\sum_{p=1}^{P-1} BA_p} \\ SFI_p &= \frac{FQ_p}{IFQ_p} \end{aligned} \quad (\text{式 5- 3})$$

任何一种优先级的业务在一个周期中应该获得预约带宽和实际获得的预约带宽之差最大为 L_{max} ，则

$$\begin{aligned} nBA_p &\leq ST_p \leq nBA_p + nL_{max} \\ n \sum_{p=1}^{P-1} BA_p &\leq ST \leq n \sum_{p=1}^{P-1} BA_p + n(P-1)L_{max} \\ \sum_{p=1}^{P-1} BA_p \cdot \left[\sum_{p=1}^{P-1} BA_p + (P-1)L_{max} \right]^{-1} &\leq SFI_p = \frac{FQ_p}{IFQ_p} \leq \frac{BA_p + L_{max}}{BA_p} \end{aligned} \quad (\text{式 5- 4})$$

因此，在实际应用中，预约带宽值 $BA_p = T \bullet CIR(p)$ 会远大于一个最大包长 L_{max} ，

服务公平指数 SFI 将接近于 1，因此 DFCSA 调度算法具有良好的公平性。

5.4.3.4 DFCSA 算法仿真

设置交换机为变长分组交换体制，设置每颗卫星有 19 个输入/输出端口。每个输入口有 $19 \times 3 = 54$ 个 VOQ 队列，每个输出口对应各输入口有 54 个交叉缓存队列。在调度模型设计中，根据卫星业务特点，不同输入链路端口的业务强度不一，各业务分组的目的输出端口也是非均匀分布的。

我们在分组长度不同和到达强度不一的两种场景下仿真，仿真时间为 2 hours。图 5-15 所示为第一种场景，信令分组 64 bits，语音分组 128 bits，数据分组 640 bits。图 5-16 所示为第二种场景，信令分组长度不变，语音分组为 256 bits，数据分组为 1920 bits，适当降低各分组到达率，保证两种场景下吞吐量一致。对于第二种场景，当分组长度变大时，为达到同样性能，各端口调度速度和缓存空间也需变大，需提高 15% 左右。下面针对三种业务在各输入端口的比例为 20%、30%、50% 的情况下，三种不同业务随着业务负载量的增加，平均时延和吞吐量的变化情况。

第一种场景：输入端队列长度为 100 个最大分组长度大小，交叉点缓存的大小为至少一个最长分组的大小，在仿真中设置交叉点缓存的大小分别为 2 个最长分组大小。

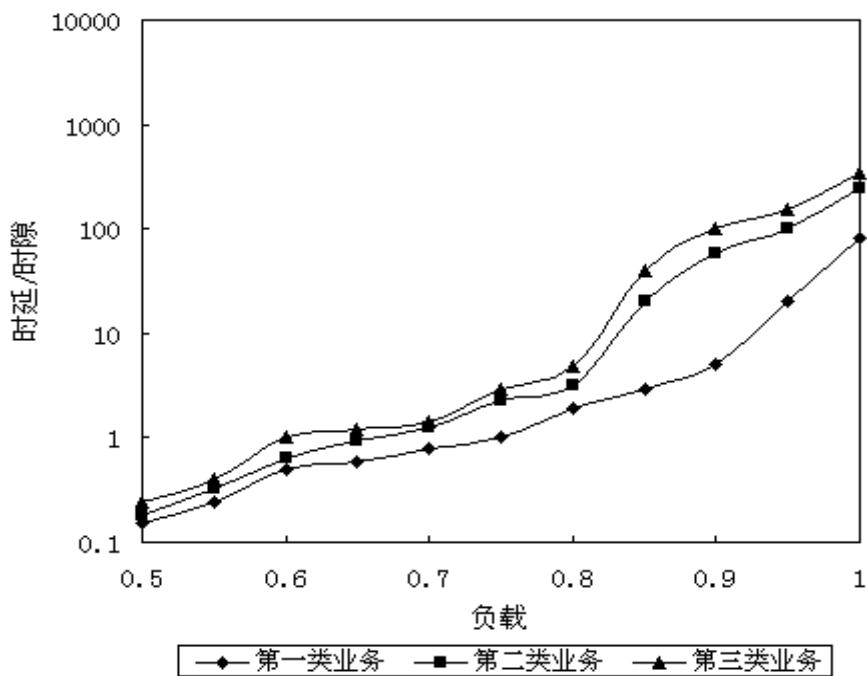


图 5-15 星载交换机各类业务平均时延场景 1 仿真结果

上述仿真结果表明，在输入队列和交叉点缓冲区容量设置合理的情况下，在星载交换机中应用 DFCSA 算法，可以达到对各类业务的公平服务，优先级高的业务可以获得较短的时延。在实际应用中，各端口不同业务所占的比例不同的情况下，会对各业务的时延性能有一定影响。

在两个仿真场景中，不同类型链路端口的业务量大小不同，但是对于同一个链路端口是均匀分布的，通过调整信令分组和语音分组的到达速率，数据分组的突发到达长度，在无掉包无拥塞发生的情况下，可以仿真得到两种场景下交换机的吞吐量为 20Mbps。

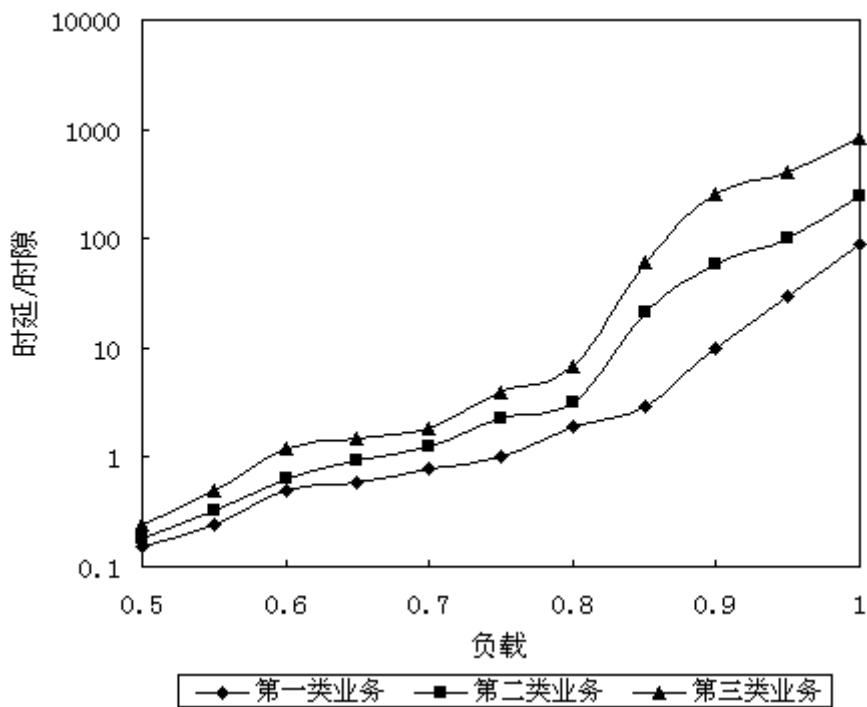


图 5-16 星载交换机各类业务平均时延场景 2 仿真结果

从图 5-15 和图 5-16 两种仿真场景下三类业务的时延曲线的仿真结果中可以看出，数据分组长度变大时，延时较大。

5.5 本章小结

本章基于 CICQ 交换结构，提出了一种新的基于流量控制的适用于不定长分组交换的调度算法—FCSA 算法。该算法以常用的输入端和交叉点轮询调度方法作为基础，通过对输入端的份额分配函数进行分析，对线性函数和非线性函数各自的优缺点进行分析，由于非线性函数复杂度高不易在硬件上实现，本文针对线性函数不能灵敏反映网络状态的缺点进行改进，提出了一种能准确反映网络通道状态的线性函数实现方法，该方法保留了线性函数复杂度低的特点同时又能及时反映网络通道的状态。对此算法在均匀贝努利业务流模型、突发业务源以及非均匀业务源的情况下时延性能以及吞吐量性能进行了仿真，可以看出与其他几种典型的 CICQ 调度算法相比，在突发业务源和非均匀流量模型下 FCSA 算法时延性能最优，接近于 OQ 算法，并且 FCSA 算法吞吐量可以接近 100%。

针对星载交换机业务类型和链路特点，本文又对 FCSA 调度算法进行适应性修改提出了新的 DFCSA 算法。DFCSA 算法基于 FCSA 算法，在输入端按照优先级排序

执行 FCSA 算法，在输出端提出了采用基于带宽约束的控制机制，以实现不同优先级业务的公平分配调度。在 OPNET 中建立了星载交换机模型，对星载区分服务建模，理论分析和仿真结果证明该算法支持区分服务，公平性好，实现了不同种类业务的 QoS 保障，具有广泛的应用前景。

第六章 全文总结

天基综合信息网结合了天基多层网络和星间链路的优势，在进行高速数据传输以及预警、导航、组网联合作战等各个方面都具有十分巨大的潜力，是未来卫星网络发展的趋势，是未来空间主要的竞争焦点。在这样的背景下，本文构建了天基信息网的双层卫星网络，研究了双层卫星网络组网的几项关键技术。

组网架构设计是系统建设的顶层问题，是实现网络中的业务通信和各种网络功能的基础；抗毁性技术是保证网络可靠运行的关键；动态路由技术是通信网络要解决的核心问题；分组调度技术是提高网络性能的必要措施。星座网络有序良好的运行，必须对以上几项关键技术进行研究。本文在国内外研究成果和深入分析星座网络拓扑特征的基础上，借鉴相关领域的研究成果，结合本文研究背景，在组网体系架构设计、抗毁性技术、动态抗毁路由技术、分组调度技术等方面进行了大量创新工作，取得了以下重要研究成果：

(1) 多层卫星网络组网架构设计主要从星座结构设计与拓扑分析、星间链路设计与性能分析、通信协议设计三个方面进行了研究。在星座结构设计方面首先介绍了星座设计的概念和星座的类型，然后通过 GEO 卫星对低空空域覆盖能力的分析，提出了优化的分层卫星网络的星座设计模型，该模型满足了系统的设计目标，并从通信时效性、抗毁性、经济性等方面分析了其系统性能并对星座构型进行了优化设计。在星间链路技术方面，首先分析了星间链路的几何特性，然后对本文提出的网络模型的星间链路性能变化规律进行了仿真分析。最后给出了一种层间星间链路的瞄准、捕获和跟踪技术实现方法。在通信协议设计方面，在深入分析 TCP/IP 协议和 SCPS 协议的基础上，设计了一种适用于本文的双层卫星网络的 TCP/IP 各层协议体制。

(2) 提出了网络拓扑结构和通信业务两方面的抗毁性测度方法，用来对某时刻网络的抗毁性进行全面、综合的定量评价。针对网络拓扑结构抗毁性分析，采用图论对卫星网络进行了建模，针对现有的一些评估标准存在无法正确评价节点重要度以及不能满足不同节点数的网络间的抗毁性分析与比较等不足，本文引入节点自身的重要性和抗毁性结合节点的全局和部分位置属性首先提出了基于节点度和节点凝聚度的节点重要度评价方法，然后建立了全网平均等效抗毁测度模型，改变了原有评估方法只适用于某一种网络模型的现状。经过典型拓扑验证，该评估方法正确有效，为具有不同节点个数和不同连接关系的网络抗毁性评价提供了一个可靠的定量标准和简单有效的计算方法。针对网络业务通信抗毁性分析，提出了“最佳搜索”原则的备份路径建立机制，建立了网络业务通信抗毁性测度模型，并得到了抗毁性指标的计算方法，并通过典型拓扑进行了验证分析。

(3) 针对所提出的“间断性强连接”模型的双层卫星网络，通过分析此网络拓扑结构的特性，提出了一种新的基于 LEO&GEO 双层卫星网络的自适应动态抗毁路由算法。算法采用基于不同种类业务的区分处理机制、路由中转层数选择机制以及基于状态更新的链路拥塞触发更新机制实现了对不同种类业务的动态自适应处理；算法采用链路冗余设计方案、簇头选择备份机制以及簇头兼容簇管理者功能的角色扩充机制实现了在卫星节点或链路失效时的抗毁性；最后对算法进行了相应的仿真，仿真结果显示，该路由策略考虑了网络中 ISL 的信息负载变化情况，自适应地选择最优路径，相对于 CDSNR 路由算法能够更加均匀地分配网络通信量，具有较小的丢包率、网络平均归一化链路负载和特定路径的综合路径权重，以及较低的平均阻塞概率和特定路径的阻塞概率，并且具有比较好的鲁棒性。

(4) 基于 CICQ 交换结构，提出了一种新的基于流量控制的适用于不定长分组交换的调度算法—FCSA 算法。该算法对输入端的份额分配函数进行分析并进行改进，既保留了线性函数复杂度低的特点又能较灵敏反映网络通道的状态。对此算法的仿真结果表明在突发业务源和非均匀流量模型下 FCSA 算法时延性能最优，接近于 OQ 算法，并且 FCSA 算法吞吐量可以接近 100%。

针对星载交换机业务类型和链路特点，本文又对 FCSA 调度算法进行适应性修改提出了 DFCSA 算法。DFCSA 算法基于 FCSA 算法，在输入端按照优先级排序执行 FCSA 算法，在输出端提出了采用基于带宽约束的控制机制，以实现不同优先级业务的公平分配调度。在 OPNET 中建立了星载交换机模型，对星载区分服务建模，理论分析和仿真结果证明该算法支持区分服务，公平性好，实现了不同种类业务的 QoS 保障。

双层卫星网络中的组网技术涉及领域非常广泛，而且处于不断发展之中。本文研究的几项关键技术，仍然存在诸多问题待完善和进一步改进。在以后的研究中，需要进一步研究以下几个方面的问题：

(1) 由于卫星网络拓扑的高度动态性，本文对卫星网络的抗毁性研究只是针对某一时刻的网络的抗毁性。为了更全面的对卫星网络系统的抗毁性进行衡量，对卫星网络的抗毁测度方法需要进行进一步的优化，并考虑从其他方面进行进一步的研究；

(2) 业务排队模型、路由策略、交换调度等各种算法有效结合的新模型新概念例如 MPLS、软交换技术等在卫星通信网中的应用；另外由于各种卫星系统都具有各自不同的特性，包括其运行的参数和卫星本身的各项性能。因此，本文提出的路由算法和分组调度算法必须加以改进，增强其兼容性，或者可以根据网络参数的不同灵活的进行配置；

(3) 随着信息化的不断发展，空间资源的竞相利用，天基综合信息网在未来的卫星网络中，是个不可或缺的角色。本文主要针对天基综合信息网的网络层的路由交

换以及抗毁性等技术进行了研究，后续需要兼顾各个层面上的技术需要，整合其物理层和传输层等技术，最终将技术整合，实现完整的通信系统。

参考文献

- [1] 余金培, 李国通, 梁旭文, 杨根庆.现代通信小卫星技术的发展与对策[J].电子学报, 2001, 29(3):100-105.
- [2] 余金培, 杨根庆, 梁旭文.现代小卫星技术与应用[M].上海: 上海科学普及出版社, 2004.
- [3] 张乃通, 刘会杰, 初海彬. 对发展卫星移动通信的几点思考[J]. 电气电子教学学报, 2002, 24(1): 1-6.
- [4] 张更新, 张杭等.卫星移动通信系统[M], 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [5] K. Morimoto, J. Hirokawa, M. Ando.Design of a 180-Degree Single-Layer Divider to control Sidelobe and Crossover Levels in Butler-Matrix Beam-Switching Antenna[C],Asia-Pacific Microwave Conference ,2007:1 - 4.
- [6] Lee J, Kang S. Satellite over satellite (SOS) network: A novel architecture for satellite network[C]//INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE 2000, 1: 315-321.
- [7] Hu J H, Yeung K L, Li T. Routing and re-routing in a LEO/MEO two-tier mobile satellite communications system with inter-satellite links[C]//Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on. IEEE, 2000, 1: 134-138.
- [8] Akyildiz I F, Ekici E, Bender M D. MLSR: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2002,10(3): 411-424.
- [9] Antonini M, Cianca E, De Luise A, et al. Stratospheric relay: potentialities of new satellite-high altitude platforms integrated scenarios[C]//Aerospace Conference, 2003. Proceedings. 2003 IEEE. IEEE, 2003, 3: 3_1211-3_1219.
- [10] Dash D S, Durresi A, Jain R. Routing of VoIP traffic in multilayered satellite networks[C]//ITCom 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 65-75.
- [11] Durresi A, Dash D, Anderson B L, et al. Routing of real-time traffic in a transformational communications architecture[C]//Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE. IEEE, 2004, 2: 1086-1104.
- [12] Kawamoto Y, Nishiyama H, Kato N, et al. A delay-based traffic distribution technique for Multi-Layered Satellite Networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 2401-2405.

- [13] Kawamoto Y, Nishiyama H, Kato N, et al. Assessing packet delivery delay in multi-layered satellite networks[C]//Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 3311-3315.
- [14] Tada Y, Nishiyama H, Yoshimura N, et al. An effective route control method on multi-layered satellite networks[C]//International Astronautical Congress. 2010.
- [15] Bayhan S, Gür G, Alagöz F. Performance of delay - sensitive traffic in multi - layered satellite IP networks with on - board processing capability[J]. International Journal of Communication Systems, 2007, 20(12): 1367-1389.
- [16] Caini C, Cruickshank H, Farrell S, et al. Delay-and disruption-tolerant Networking (DTN): an alternative solution for future satellite networking applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1980-1997.
- [17] 吴廷勇.非静止轨道卫星星座设计和星间链路研究[D].电子科技大学博士学位论文, 2008.
- [18] 王振永, 多层卫星网络结构设计与分析[D].哈尔滨工业大学博士学位论文, 2007
- [19] 刘刚, 吴诗其.非静止轨道卫星通信系统中星际链路性能研究[J].系统工程与电子技术, 2001, 24 (1): 26-30
- [20] Zou X, Zhang X, Wen C. Research on Bandwidth of Optical Filter in GEO-LEO Laser Communication[C]//Biomedical Engineering and Informatics, 2009. BMEI'09. 2nd International Conference on. IEEE, 2009: 1-4.
- [21] Duca E. Background noise limitations on optical intersatellite links for data relay applications[C]//Transparent Optical Networks, 2009. ICTON'09. 11th International Conference on. IEEE, 2009: 1-4.
- [22] Xuan W, Zong P, Yu J. Link analyzing and simulation of TDRSS based on OPNET[C]//Communications and Mobile Computing (CMC), 2010 International Conference on. IEEE, 2010, 2: 481-485.
- [23] 李赞,孙国滨,张乃通.卫星通信系统星间链路几何参数分析.高技术通讯,1998年12月. pp.40-44.
- [24] 贾敏.第二代中继卫星捕获跟踪系统的星间链路仿真分析和验证[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006.
- [25] 李德志.二代中继卫星系统捕获跟踪技术研究与仿真[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006.
- [26] 孙小松,杨迪,杨旭等.用户星对中继星的捕获跟踪规律研究[J]. 宇航学报.2004, 25(1):41~45.
- [27] 王勇前, 马正新, 曹志刚.卫星 TCP/ATM 传输中的明确窗口指示拥塞控制策略研究[J].电子学报, 2001, 29(1): 1-4.

- [28] Subramanian S, Sivakumar S, Phillips W J, et al. Investigating TCP performance issues in satellite networks[C]//Communication Networks and Services Research Conference, 2005. Proceedings of the 3rd Annual. IEEE, 2005: 327-332.
- [29] 顾明, 张军. 适用于卫星网络的TCP跨层改进机制[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1815-1819.
- [30] 王平, 顾学迈. LEO 卫星网络中 TCP 协议性能及路由策略研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(1): 85-88.
- [31] 刘炯, 曹志刚. 一种适合卫星网络的拥塞控制算法[J]. 宇航学报, 2007, 28(3).
- [32] Sheng-lei Z, Shu-qian L, Fei W, et al. Improving TCP over Geostationary Satellite Links[C]//Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on. IEEE, 2009: 4030-4033.
- [33] Loreti P, Luglio M, Kapoor R, et al. Satellite systems performance with TCP-IP applications[M]//Evolutionary Trends of the Internet. Springer Berlin Heidelberg, 2001: 76-90.
- [34] Ellison R J, Linger R C, Longstaff T, et al. Survivable network system analysis: a case study[J]. Software, IEEE, 1999, 16(4): 70-77.
- [35] Liew S C, Lu K W. A framework for network survivability characterization[C]//Communications, 1992. ICC'92, Conference record, SUPERCOMM/ICC'92, Discovering a New World of Communications., IEEE International Conference on. IEEE, 1992: 405-410.
- [36] Zolfaghari A, Kaudel F J. Framework for network survivability performance[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 1994, 12(1): 46-51.
- [37] Jha S, Wing J M. Survivability analysis of networked systems[C]//Proceedings of the 23rd international conference on software engineering. IEEE Computer Society, 2001: 307-317.
- [38] Krings A W, Azadmanesh A. A graph based model for survivability applications[J]. European journal of operational research, 2005, 164(3): 680-689.
- [39] McDermott J. Attack-potential-based survivability modeling for high-consequence systems[C]//Information Assurance, 2005. Proceedings. Third IEEE International Workshop on. IEEE, 2005: 119-130.
- [40] Li X, Yang D. A quantitative survivability evaluation model for wireless sensor networks[C]//Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006: 727-732.
- [41] Chen D, Garg S, Trivedi K S. Network survivability performance evaluation:: a quantitative approach with applications in wireless ad-hoc networks[C]//Proceedings

- of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems. ACM, 2002: 61-68.
- [42] Koroma J, Li W, Kazakos D. A generalized model for network survivability[C]//Proceedings of the 2003 conference on Diversity in computing. ACM, 2003: 47-51.
- [43] Kim D S, Shazzad K M, Park J S. A framework of survivability model for wireless sensor network[C]//Availability, Reliability and Security, 2006. ARES 2006. The First International Conference on. IEEE, 2006: 8 pp.
- [44] Woodall D R. The binding number of a graph and its Anderson number[J]. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 1973, 15(3): 225-255.
- [45] Jamrozik J, Kalinowski R, Skupień Z. A catalogue of small maximal nonhamiltonian graphs[J]. Discrete Mathematics, 1982, 39(2): 229-234.
- [46] Barefoot C A, Entringer R, Swart H. Vulnerability in graphs—a comparative survey[J]. J. Combin. Math. Combin. Comput, 1987, 1(38): 13-22.
- [47] Cozzens M, Moazzami D, Stueckle S. The tenacity of a graph[J]. Graph theory, combinatorics, and algorithms, 1995, 1: 2.
- [48] Xing F, Wang W. On the survivability of wireless ad hoc networks with node misbehaviors and failures[J]. Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on, 2010, 7(3): 284-299.
- [49] 明亮, 王东霞, 张鲁峰等. 网络抗毁性测度研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1850-1852.
- [50] 王志刚, 杨世松. 基于模糊综合评价的信息网络系统可生存性评估[J]. 网络安全技术与应用, 2010, 10: 58-60.
- [51] 李黎, 管晓宏, 赵千川等. 网络生存适应性的多目标评估[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 1-7.
- [52] Glenn A B. Methodology for quantitatively evaluating satellite communication network survivability[J]. IEEE Communications Magazine, 1985, 23: 28-33.
- [53] Barnhart C M, Ziemer R E. Topological analysis of satellite-based distributed sensor networks[J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1991, 21(5): 1060-1070.
- [54] Stenger D K. Survivability analysis of the Iridium low earth orbit satellite network[R]. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH, 1996.
- [55] He Y, Zhao H. Survivability performance evaluation for satellite communication network based on Walker Constellation[C]//Second International Conference on

- Spatial Information Technology. International Society for Optics and Photonics, 2007: 67955C-67955C-6.
- [56] Dong-jie Z, Hai-tao Y, Jian J, et al. Modeling and Simulation of the Invulnerability of Space Information Network[C]/Internet Technology and Applications, 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 1-5.
- [57] Kawamura R. Architectures for ATM network survivability[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 1998, 1(1): 2-11.
- [58] 袁荣坤, 孟相如, 李明讯等.节点重要度的网络抗毁性评估方法[J].火力与指挥控制, 2010, 37(10): 40-42.
- [59] 陈铎龙, 孟相如, 梁萧等.复杂环境下网络抗毁性综合评估方法[J].计算机科学, 2012, 39(9): 101-104.
- [60] 蔡瑾曜, 吴玲达.一种通信网络抗毁性评价的改进模型[J].计算机工程与应用, 2012, 49(13).
- [61] 彭秀媛.卫星网络管理系统的鲁棒性和抗毁性研究[D].沈阳理工大学硕士学位论文, 2010.
- [62] 周牧.多层卫星网络稳定性设计研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008.
- [63] Werner M, Delucchi C, Vogel H J, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 1997, 15(1): 69-82.
- [64] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks[C]/Global Telecommunications Conference, 1995. GLOBECOM'95., IEEE. IEEE, 1995, 1: 529-535.
- [65] Werner M, Berndl G, Edmaier B. Performance of optimized routing in LEO intersatellite link networks[C]/Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47th. IEEE, 1997, 1: 246-250.
- [66] Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I, et al. IP routing issues in satellite constellation networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69-92.
- [67] Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I, et al. IP routing issues in satellite constellation networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69-92.
- [68] Hashimoto Y, Sarikaya B. Design of IP-based routing in a LEO satellite network[C]/Proceedings of Third International Workshop on Satellite-Based Information Services (WOSBIS98. 1998.
- [69] 任洪波. LEO 卫星网络中的一种分布式路由算法 [J]. 计算机科学, 2007, 34(14): 48-51.

- [70]Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2001, 9(2): 137-147.
- [71]Janoso R F. Performance analysis of dynamic routing protocols in a low earth orbit satellite data network[R]. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH, 1996.
- [72]Chan T H, Yeo B S, Turner L. A localized routing scheme for LEO satellite networks[J]. Proc. AIAA 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit (ICSSC 2003) Arpil,2003:AIAA,2003,2357-2364
- [73]万鹏, 曹志刚, 王京林.LEO 星座网络动态源路由算法[J], 宇航学报,2007,28(5): 1295-1303.
- [74]Mohorčič M, Švigelj A, Kandus G, et al. Performance evaluation of adaptive routing algorithms in packet - switched intersatellite link networks[J]. International journal of satellite communications, 2002, 20(2): 97-120.
- [75]Mohorcic M, Werner M, Svilgelj A, et al. Adaptive routing for packet-oriented intersatellite link networks: performance in various traffic scenarios[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2002, 1(4): 808-818.
- [76]Kucukates R, Ersoy C. High Performance Routing in a LEO Satellite Network[C]//ISCC. 2003: 1403-1408.
- [77]Mauger R, Rosenberg C. QoS guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network[J]. Communications Magazine, IEEE, 1997, 35(7): 56-65.
- [78]Kim Y S, Park W J. Adaptive routing in LEO satellite networks[C]//Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st. IEEE, 2000, 3: 1983-1987.
- [79]Werner M, Maral G. Traffic flows and dynamic routing in LEO intersatellite link networks[J]. NASA, 1997 (19980137500).
- [80]Li D, Wang X, Meng Y. A Destruction-Resistant Routing Algorithm in Low Earth Orbit Satellite Networks[C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on. IEEE, 2007: 1841-1844.
- [81]白建军, 卢锡城, 彭伟.LEO 卫星网络中一种简洁的星上分布式路由协议[J].软件学报, 2005,16(12):2139-2149.
- [82]Akyildiz I F, Uzunalioglu H, Bender M D. Handover management in low earth orbit (LEO) satellite networks[J]. Mobile Networks and Applications, 1999, 4(4): 301-310.

- [83] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [84] Erçetin Ö, Krishnamurthy S, Dao S, et al. Provision of guaranteed services in broadband LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2002, 39(1): 61-77.
- [85] Uzunalioglu H. Probabilistic routing protocol for low earth orbit satellite networks[C]//Communications, 1998. ICC '98. Conference Record. 1998 IEEE International Conference on. IEEE, 1998, 1: 89-93.
- [86] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks[C]//Global Telecommunications Conference, 1995. GLOBECOM'95., IEEE. IEEE, 1995, 1: 529-535.
- [87] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 1998, 47(3): 1037-1048.
- [88] Yiltas D, Zaim A H. A dynamic routing algorithm in LEO satellite systems estimating call blocking probabilities[C]//Recent Advances in Space Technologies, 2007. RAST'07. 3rd International Conference on. IEEE, 2007: 541-545.
- [89] 许辉, 吴诗其. LEO 卫星网络中基于蚂蚁算法的分布式 QoS 路由[J], 计算机学报, 2007, 30(3):361-367.
- [90] Mohorcic M, Svilajc A, Kandus G, et al. Demographically weighted traffic flow models for adaptive routing in packet-switched non-geostationary satellite meshed networks[J]. Computer Networks, 2003, 43(2): 113-131.
- [91] Uzunalioglu H, Akyildiz I F, Yesha Y, et al. Footprint handover rerouting protocol for low Earth orbit satellite networks[J]. Wireless Networks, 1999, 5(5): 327-337.
- [92] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks[C]//INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. IEEE, 2000, 2: 500-508.
- [93] 王汝传,徐小龙,黄海平.智能 Agent 及其在信息网络中的应用[M].北京邮电大学出版社,2006.
- [94] 饶 元,王汝传,郑彦.一种基于移动 Agent 卫星网动态路由算法[J],解放军理工大学学报,2010,11(003):255-260.
- [95] 王汝传, 李映, 徐小龙等. 基于移动代理的动态路由算法的研究[J].计算机学报, 2005,128(3).

- [96] Ping W, Xue-mai G, Gong-liang L. Multi-QoS Routing for LEO Satellite Networks[C]//Advanced Communication Technology, The 9th International Conference on. IEEE, 2007, 1: 728-731.
- [97] Foster M. A Delay-efficient Satellite Network for Multimedia Communication: A Pilot Study[D]. University of Florida, 2002.
- [98] 胡剑浩,李涛,吴诗其. 具有星间链路的 LEO&GEO 双层卫星网络路由策略研究[J]. 电子学报,2000,28(4):31-35.
- [99] Hu J H, Yeung K L, Li T. Routing and re-routing in a LEO/MEO two-tier mobile satellite communications system with inter-satellite links[C]//Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on. IEEE, 2000, 1: 134-138.
- [100] 苑喆,张军,柳重堪.LEO /GEO 双层卫星网的分层动态路由算法[J].北京航空航天大学学报, 2006,32(7).
- [101] 白建军.天基网路由技术研究[D].国防科学技术大学博士论文, 2005.
- [102] 李晖, 顾学迈.多层卫星通信网络自适应路由策略 [J]. 通信学报 , 2006,27(8):119-128.
- [103] Kudoh D, Kashibuchi K, Nishiyama H. Dynamic Load Balancing Method Based on Congestion Prediction for IP/LEO Satellite Networks[J]. IEICE transactions on communications, 2009, 92(11): 3326-3334.
- [104] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, et al. Explicit load balancing technique for NGEO satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2009, 17(1): 281-293.
- [105] Nishiyama H, Kudoh D, Kato N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998-2007.
- [106] 曾媛.低轨卫星通信网络的星上交换和路由技术研究[D].中国科学院研究生院博士学位论文, 2008.
- [107] Karol M, Hluchyj M, Morgan S. Input versus output queueing on a space-division packet switch[J]. Communications, IEEE Transactions on, 1987, 35(12): 1347-1356.
- [108] Li S Q, Lee M J. A study of traffic imbalances in a fast packet switch[C]//INFOCOM'89. Proceedings of the Eighth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Technology: Emerging or Converging, IEEE. IEEE, 1989: 538-547.
- [109] Anderson T E, Owicki S S, Saxe J B, et al. High-speed switch scheduling for local-area networks[J]. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 1993, 11(4): 319-352.

- [110] Y.Tamir , G.Frazier. High Performance Multi-queue Buffers for VLSI Communications Switchehs In:1st Annual SymPosiumon Computer Arehiteetures[C] , Hawaii, 1998,343-354.
- [111] Mekkittikul A, McKeown N. A practical scheduling algorithm to achieve 100% throughput in input-queued switches[C]//INFOCOM'98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. IEEE, 1998, 2: 792-799.
- [112] Liu N H, Yeung K L, Pao D C W. Scheduling algorithms for input-queued switches with virtual output queueing[C]//Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on. IEEE, 2001, 7: 2038-2042.
- [113] Tabatabae V, Tassiulas L. MNCM a new class of efficient scheduling algorithms for input-buffered switches with no speedup[C]//INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. IEEE, 2003, 2: 1406-1413.
- [114] N.MeKeown.The iSLIP Seheduling Algorithm for InPut-queued Switchehs[J].IEEE/ACM Transaction Son Networking, 1999, 7(2): 188-201.
- [115] A.Mekkittikul,N.MeKeown.A Practical Scheduling Algorithm for Aechieving 100% Throught in Input-queued Switchehs[A] .In:Proc.IEEE INFOCOM'98[C], San Francisco, 1998:792~799.
- [116] T.Anderson, S.Owieki, J.Saxe, et al. High-speed Switch Scheduling for Local-area Networks[J].ACM Transactions on Computer Systems,1993,11(4):319~352.
- [117] N.MeKeown.The iSLIP Seheduling Algorithm for InPut-queued Swithes[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,1999,7(2):188-201.
- [118] Parekh A K, Gallager R G. A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the single-node case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 1993, 1(3): 344-357.
- [119] Rojas-Cessa R, Oki E, Jing Z, et al. CIXB-1: Combined input-one-cell-crosspoint buffered switch[C]//High Performance Switching and Routing, 2001 IEEE Workshop on. IEEE, 2001: 324-329.
- [120] Zhang X, Bhuyan L N. An efficient scheduling algorithm for combined input-crosspoint-queued (CICQ) switches[C]//Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE. IEEE, 2004, 2: 1168-1173.
- [121] Zheng Y, Shao C. An efficient round-robin algorithm for combined input-crosspoint-queued switches[C]//Autonomic and Autonomous Systems and

- International Conference on Networking and Services, 2005. ICAS-ICNS 2005. Joint International Conference on. IEEE, 2005: 2-2.
- [122] Javidi T, Magill R, Hrabik T. A high-throughput scheduling algorithm for a buffered crossbar switch fabric[C]//Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on. IEEE, 2001, 5: 1586-1591.
- [123] Nabeshima M. Performance evaluation of a combined input-and crosspoint-queued switch[J]. IEICE Transactions on Communications, 2000, 83(3): 737-741.
- [124] 唐权,高志江.CICQ 的高性能 LQF_DRR 调度算法[J].Computer Engineering, 2011,37(7).
- [125] 彭来献, 恽姿, 赵文栋等.一种基于最长队列预测的 CICQ 交换结构调度算法 [J].电子与信息学报, 2010,32 (6): 1457-1462.
- [126] Yang M Y, Wang P, Li X T, et al. A High-Performance Scheduling Algorithm for Buffered Crossbar Switch[J]. Advanced Materials Research, 2011, 268: 2101-2107.
- [127] Mhamdi L, Hamdi M. CBF: A high-performance scheduling algorithm for buffered crossbar switches[C]//High Performance Switching and Routing, 2003, HPSR. Workshop on. IEEE, 2003: 67-72.
- [128] 扈红超.基于 CICQ 排队机制与调度策略的研究[D].解放军信息工程大学硕士学位论文, 2007.
- [129] 王晓亮, 杨君刚, 邱智亮, 李然.基于 CICQ 结构的变长分组交换调度算法研究[J].吉林大学学报, 2006,24(4).
- [130] Ganjali Y, Keshavarzian A, Shah D. Input queued switches: cell switching vs. packet switching[C]//INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. IEEE, 2003, 3: 1651-1658.
- [131] 闫恒, 王磊, 李秀芹.一种基于 CICQ 支持区分服务质量的分布式动态双轮询调度算法[J].华北水利水电学院学报, 2009,30(5).

作者攻读博士学位期间发表的论文

- [1] 姚晔, 江玉洁, 梁旭文, 卫星 CICQ 交换系统调度算法研究, 计算机工程, 2012 年第 5 期
- [2] 姚晔, 梁旭文, LEO&GEO 双层卫星网络的动态路由技术研究, 系统工程与电子技术 (EI 收录), 已录用
- [3] 姚晔, 龚文斌, 梁旭文, 低轨卫星通信星座的星载交换技术研究, [C], 卫星星座论坛, 2008
- [3] 江玉洁, 姚晔, 梁旭文, 分布式卫星网络故障诊断算法[J], 小型微型计算机系统, 2012 年 8 月, 已录
- [4] 江玉洁, 姚晔, 梁旭文, LEO 卫星网络中一种自适应权值路由算法[J], 计算机应用与软件, 2012 年 6 月, 已录
- [5] 姚晔, 梁旭文, 卫星网络抗毁性量度研究, 已投
- [6] 姚晔, 梁旭文, 中继卫星系统的现状、关键技术与应用, 已投

作者简历

姓 名 姚晔
性 别 女
籍 贯 河南省
出生日期 1980.06.17

主要简历：

2007.09–2013.08 中国科学院上海微系统与信息技术研究所
通信与信息系统 工学博士
2005.04 至今 上海微小卫星工程中心 工作
2002.09–2005.04 电子科技大学
通信与信息系统专业 工学硕士
1998.09–2002.07 成都信息工程大学
通信工程 工学学士

参加研究课题情况

2006.10–2007.12

国防型号项目，中国科学院创新 1 号卫星模拟器，已验收并产品化。
主要研发人员：参与软件设计与实现。

2005.04–2008.09

通信装备预先研究项目，十五、十一五星座预研项目，已验收。
主要研发人员、项目子课题负责人；
负责方案设计与论证，网络通信协议及路由交换体制架构设计与软件仿真、半实物仿真验证测试；任务划分、文档管理、项目验收。
本论文就是以该项目作为基础。

2006.02–2009 年 3 月

对外交流合作项目，中法合作天文卫星（SVOM 卫星），已立项。
数传分系统负责人；
主要负责方案设计、论证、关键技术攻关。

2009.03–2013.07

国家 863 重大专项项目，创新三号卫星，卫星已成功发射并正常运行。
数传分系统负责人；
负责数传分系统各项工作，包括方案设计与论证、关键技术攻关，接口协调、

产品质量控制与验收、各项集成测试，以及各项大型试验等。

2011.07 月–2013.08

中科院先导专项项目，暗物质粒子探测卫星，已进入初样阶段

数传分系统主任设计师；

负责数传分系统各项工作，包括方案设计与论证、关键技术攻关，接口协调、

产品质量控制与验收、各项集成测试，以及各项大型试验等。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学 位 论 文 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院上海微系统与信息技术研究所或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一起工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: _____ 日 期: _____

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学 位 论 文 使 用 授 权 声 明

本人完全了解中国科学院上海微系统与信息技术研究所有关保留、使用学位论文的规定，即研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。保密的论文在解密后遵守此规定。论文的公布（包括刊登）授权中国科学院上海微系统与信息技术研究所人才教育处。

研究生签名: _____ 导师签名: _____ 日 期: _____