

龙飞◎著

卫星网络鲁棒 QoS 路由技术研究



国防工业出版社

National Defense Industry Press

卫星网络鲁棒 QoS 路由技术研究

龙飞 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以卫星网络的路由技术为研究对象,在以往研究的基础上,提出了一套满足一定性能指标的星座设计与优化方案、一种新型的卫星网络虚拟分组路由策略、一种对卫星网络中不可预测的流量峰值具有鲁棒性的流量规划方法和一系列适用于卫星网络的 QoS 路由方案。这一系列策略与方法构成了一套系统的具有鲁棒性的卫星网络 QoS 路由理论,为天基网络路由技术的研究提供了新的思路。本书适合有一定网络基础知识的理工科大学研究生和教师阅读,也可供相关研究领域的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星网络鲁棒 QoS 路由技术研究/龙飞著. —北京:国防工业出版社,2010. 7

ISBN 978-7-118-07020-0

I. ①卫… II. ①龙… III. ①卫星通信—通信网—鲁棒控制—路由选择 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 142459 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 11½ 字数 135 千字
2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

序

在一个国家的综合国力中,军事实力占据着重要的地位。而在科学技术日新月异的今天,信息技术在军事技术中又具有举足轻重的作用。随着太空时代的到来,航空航天技术已经成为国家的核心技术之一。以卫星网络为代表的空间信息技术正是信息技术与航空航天技术的结合。

卫星网络技术起源于 20 世纪 50 年代的卫星通信技术,最初的通信模式为地球同步卫星的弯管式中继,星间链路产生后,才有了真正意义上的卫星网络。卫星网络自从概念提出以来得到了迅猛的发展,越来越受到各方的关注。与地面网络相比,卫星网络的覆盖范围更广,接入更方便,故障率更低。由于以上的诸般优点,卫星网络已经有着广泛的应用。

对于军事领域来说,卫星网络系统可以提供战场侦察和战场通信等服务,必要时还可以对敌方的通信设施进行干扰甚至摧毁,为指挥员掌握战场态势提供准确而实时的信息,同时为其调度作战单元提供指令传输媒介。值得注意的是,卫星网络在美军近十年来进行的一系列局部战争中发挥了关键的作用,成为指挥系统中极为重要的一部分。可以预见,卫星网络也必将成为未来战场上克敌制胜的

利器。

我国近些年来也十分重视卫星网络技术的发展,为了缩短与发达国家之间的技术水平差距,中国科学院与科学技术部在“十一五”规划中将空间综合信息网络的研究作为一个重要的研究方向。继第一颗中国自行研制开发的“东方红”一号卫星成功发射至今,我国已经成功发射了数十种类型、数十颗卫星,具备了组建空间信息网络的技术基础。同时卫星网络方面的相关研究也在大步跟进,国家每年对空间信息技术研究的投入都在增加,每年也都有大量的卫星网络技术相关的成果面世。这些成果极大地推进了我国空间信息技术的发展。

在卫星网络技术中,网络路由技术有着重要的地位,决定着整个系统的性能。龙飞编写的“卫星网络鲁棒 QoS 路由技术研究”一书,层次分明,深入浅出,从卫星星座模型的设计入手,为卫星网络鲁棒路由提供了一套完整的技术方案。作者详细介绍了这些方案的数学原理和实现细节,并给出了大量实验数据,为相关领域的后来研究者提供了很好的借鉴。相信该书的出版对推动空间信息技术的发展将具有积极的意义。

中国载人航天工程原副总指挥

杨利伟

二〇一〇年五月八日

前 言

卫星网络系统具有全球覆盖、接入简单、扩展性强和带宽按需可变等优点,在气象预测、环境监测、资源探测、导航定位以及无线通信等方面有着日益广泛的应用,已经引起社会各界的广泛重视。卫星网络作为下一代互联网的重要组成部分,为地面网络的服务做了有益的补充,而卫星网络路由技术作为卫星网络技术的核心,决定着整个网络系统的性能。卫星网络的拓扑时变特性和资源受限特性使得传统的地面网络路由方法不能直接应用于卫星网络环境,也使得卫星网络比地面网络更需要鲁棒性的路由方法。本书从星座设计、路由策略、流量规划和路由算法设计四个方面为卫星网络提出了一套系统的具有鲁棒性的 QoS 路由方案。

本书共分为 6 章。

第 1 章介绍了卫星网络的基本概念和卫星网络路由技术的研究现状,指出了现阶段卫星网络路由研究中的技术难点。

第 2 章提出了一套星座设计与优化方案,给出了满足全球覆盖、层间覆盖、连续覆盖时间和链路持续时间大于某阈值、系统开销最小等条件的星座模型,并通过实验给出了星座架构对网络传输性能的影响。

第3章提出了一种新型的卫星网络虚拟分组路由策略,改进了以往虚拟拓扑路由策略中系统周期内快照数量过多、快照时间太短的缺点;同时增加了拥塞避免和节点失效处理策略,提高了卫星网络路由策略的鲁棒性。

第4章依据所掌握的地面网络流量信息和全球用户分布信息,基于时间序列分析理论提出了一种卫星网络流量预估方法。然后提出了一种以流量预估的结果为输入,以最大链路利用率为优化目标的带开销闭包的流量规划方法,大大增加了卫星网络对不可预测流量峰值的鲁棒性。

第5章提出了一种适用于卫星网络的 QoS 路由方法。引入了蚁群算法、遗传算法等启发式算法和 PEC、优序数法等多目标优化方法为用户的不同 QoS 需求组合同时进行优化。解决了传统 SPF 路由算法所不能解决的多 QoS 目标优化路由问题。

第6章对全书的研究内容作了一个总结和展望。

本书的作者在进行卫星网络路由相关研究时得到了清华大学计算机系孙富春教授、耶鲁大学 Richard Yang 教授的悉心指导。另外耶鲁大学的王皓博士、乔治亚州立大学的熊乃学博士、中国科学院软件所的吴凤鸽博士、分别对书中的部分章节或部分内容提出了宝贵的修改意见。总装备部某研究所的赵宗印研究员和王涛研究员为作者的研究提供了十分有价值的启发。同组的杨治安同学为本书中的研究工作也付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

本书中的部分研究成果受到国家 863 计划项目、国家自然科学基金和国家自然科学基金杰出青年基金等课题的资助。通过本书,我们希望能将卫星网络鲁棒 QoS 路由研究中所采用的新方法、发现的新思

路贡献出来,以期给后来的研究者提供一些参考,为国家空间信息技术的发展聊尽绵薄之力。由于作者水平有限,加之成书时间仓促,不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

作 者

2010 年 5 月于清华园

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	3
1.2 卫星网络简介	6
1.3 卫星网络路由技术研究现状	10
1.3.1 边界路由	11
1.3.2 接入路由	11
1.3.3 星间路由	12
1.4 本书的研究内容及安排	21
1.4.1 本书的研究内容	21
1.4.2 本书的主要工作	22
1.4.3 各章节内容安排	23
第2章 卫星网络星座设计	25
2.1 概述	27
2.2 星座设计原理	29
2.2.1 星座结构的选择	29

2.2.2 轨道类型的选择	33
2.2.3 轨道高度的选择	36
2.2.4 轨道面数与卫星个数的选择	38
2.2.5 多层星座模型参数的选择	43
2.3 星座设计的仿真分析	43
2.4 星座参数的分析及对路由的影响	46
2.5 本章小结	48
第3章 卫星网络路由策略	49
3.1 概述	51
3.2 NSGRP 路由策略构件	55
3.3 NSGRP 路由策略实现	59
3.3.1 概念定义	59
3.3.2 实现步骤	63
3.4 NSGRP 路由策略总体架构	78
3.5 仿真验证	83
3.5.1 时延特性	84
3.5.2 节点失效影响	88
3.5.3 链路拥塞影响	89
3.6 本章小结	90
第4章 卫星网络流量规划	91
4.1 概述	93
4.2 卫星网络流量预估	95
4.3 卫星网络流量规划	102

4.3.1	概念定义	103
4.3.2	PTCE 的实现	107
4.4	仿真验证	110
4.5	本章小结	114
第 5 章	卫星网络多 QoS 目标路由算法	115
5.1	概述	117
5.2	卫星网络启发式 QoS 路由算法	121
5.2.1	路由模型	122
5.2.2	蚁群 QoS 路由算法	124
5.2.3	禁忌 QoS 路由算法	129
5.2.4	遗传 QoS 路由算法	132
5.2.5	蜂群 QoS 路由算法	136
5.3	卫星网络多目标优化 QoS 路由算法	141
5.3.1	优序数 QoS 路由算法	142
5.3.2	PEC 路由算法	145
5.4	仿真验证	148
5.5	本章小结	158
第 6 章	总结与展望	159
6.1	工作总结	161
6.2	进一步的工作展望	162
	参考文献	164

第 1 章

绪论

- 1.1 研究背景及意义
- 1.2 卫星网络简介
- 1.3 卫星网络路由技术研究现状
- 1.4 本书的研究内容及安排

1.1 研究背景及意义

随着全球一体化进程的加快,人们对网络技术的依赖程度越来越高。传统的国际互联网主要依靠地面链路传输信息,难以覆盖高山、海岛等复杂地型区域。由于地震和工程挖掘失误导致的地面网络链路中断几乎每年都有发生,给社会造成了巨大的经济损失。比如2006年1月9日,美国一家主要网络服务供应商(Internet Service Provider,ISP)的两条主干链路(Oroville-Stockton, Rialto-El Palso)由于挖掘事故被切断,导致美国西部上百万网络用户与国际互联网断开达数小时之久,造成数百万美元的损失^[1]。又如中国台湾地区2007年的大地震和汶川地区2008年的大地震,都使当地的互联网系统遭到了毁灭性打击。

传统地面网络的上述缺点和日益增长的网络用户需求使得卫星网络逐渐成为各国关注的对象。卫星网络由于具有可全球覆盖、接入简单、可扩展性强、带宽按需可变等特点,在气象预测、环境与灾害监测、资源探测、导航定位、通信广播等方面被广泛应用,即将成为下一代互联网(Next Generation Internet,NGI)的重要组成部分^[2]。以卫星网络为代表的空间信息技术水平也正在成为标志国家综合实力的特征之一。

由于空间卫星的轨道资源非常有限,不但以美国和俄罗斯为首的各个航天大国纷纷展开卫星网络的研究与建设工作,越来越多的中小国家也加大了本国空间信息能力的发展力度。目前,世界上已有130多个国家开展了空间信息技术的研发工作,预计今后几年全世界将投资5000多亿美元,研制和发射1000多颗各类卫星。我国顺应科技发展潮流,自20世纪50年代以来,十分重视航天科技与空间信

息技术的发展。为了缩短与发达国家在技术水平方面的差距,科技部和中国科学院在“十一五”规划中,将空间综合信息网络的研究作为一个重要的研究方向。继第一颗中国自行研制的“东方红”一号卫星成功发射至今,我国已发射成功了 18 种类型、63 颗自行研制的卫星,广泛应用于经济、科技、文化和国防建设等各个领域。目前,我国已经发射并能形成卫星网络基础系统的卫星主要有“尖兵”系列返回式侦察卫星、“实践”系列卫星、“资源”一号对地观测卫星、“风云”系列气象卫星、“神通”战略通信卫星、“尖兵”三号传输型军事普查卫星、“尖兵”五号雷达卫星、“烽火”一号通信卫星、“北斗”导航定位卫星和“海洋”一号目标监视卫星等。正在研制和即将发射的卫星有战略通信卫星等。

卫星网络除了在气象、侦察、通信和定位等方面有重要应用以外,还是星际网络(Interplanetary Internet, IPI)的重要组成部分^[3]。深空科学探索如火星探索等会产生大量科学数据,这些科学数据的传输依赖一个高数据传输率、高安全性和可无缝互操作的星际网络。卫星网络作为深空科学数据回传地球的最后一个环节,担负着数据中转、数据融合和指令转发等任务,被美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的深空网络(Deep Space Network, DSN)计划^[4,5]列为重点研究对象。

自卫星网络的概念被提出以来,其最主要的应用还是作为地面网络的旁路网络为实时和非实时应用提供服务。卫星网络路由技术作为卫星网络技术中的关键部分,决定着整个卫星网络系统的效率和可靠性。由于卫星网络拓扑高速周期性变化,传统的地面网络路由协议如 OSPF^[7] 和 RIP^[8] 等已经不能直接应用于卫星网络。OSPF 和 RIP 协议主要针对拓扑结构相对固定的地面网络。在每次链路建立或失效、网络节点加入或失效等拓扑变化事

件发生时, OSPF 和 RIP 协议都要重新交互网络拓扑信息并刷新路由表。卫星网络中卫星节点的高速移动会导致拓扑信息频繁变化, 给 OSPF 和 RIP 协议造成极大的开销, 而同样具有拓扑结构时变特性的 Ad Hoc 网络, 其网络特性与卫星网络有很大差异。首先, 卫星网络的拓扑结构每时每刻都在变化, 而 Ad Hoc 网络的拓扑只在某些时刻变化; 其次, 卫星网络拓扑高速变化, 以轨道高度在 500km ~ 2000km 的低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星为例, 其对地面固定点的可见时间只有 10min 左右, 而 Ad Hoc 网络节点移动相对缓慢得多; 再次, Ad Hoc 为自组织网络, 拓扑变化没有规律, 而卫星网络的拓扑变化有着严格的周期性规律。因此, 现有的 Ad Hoc 网络协议如 DSDV、TORA、AODV 和 DSR 等^[6]都不适用于卫星网络。

卫星网络由于具有拓扑时变的特性且备份路由器较少, 与地面网络相比更需要鲁棒路由算法。作为地面网络的重要补充, 卫星网络需要为不同类型的用户提供可靠的网络传输服务, 因此对 QoS 路由协议的设计提出了很高的要求。卫星网络的拓扑特性, 网络环境特性和对卫星网络的服务质量期望使得卫星网络鲁棒 QoS 路由协议设计面临以下挑战。

(1) 协议的低开销、高可靠性要求。卫星网络系统能量供给、计算资源和存储资源都十分有限, 星上设备可替代性差, 维护不便, 要求路由协议必须具有低开销和运行高度稳定的特性, 以提高系统的生命周期。

(2) 用户 QoS 需求和系统实际性能的矛盾。卫星链路中存在着传播时延大、误码率高等问题, 与用户的低时延、高准确率传输需求冲突。而不同用户的 QoS 需求又不完全相同, 因此要求路由协议能够在大时延、高误码率链路环境下, 采取一定的策略降低差错率、防

止拥塞、缩短传输时延,并能同时满足不同用户的 QoS 需求。

(3) 卫星网络系统的鲁棒性需求。作为地面网络的旁路网络,卫星网络将与地面网络承担相似类型的网络流量。地面网络中的鲁棒路由问题在卫星网络中同样存在,而受限的卫星网络资源使得卫星网络中的鲁棒路由问题更具挑战性。网络中经常会存在一些不可预测的流量峰值,不同时段的网络流量也不尽相同。这就要求路由协议具有鲁棒性,使得系统在不同的网络流量下都能够良好运行,即使在流量峰值到来时也不例外。

面向解决卫星网络路由协议中的这些问题,本课题将研究具有鲁棒性的 QoS 路由方法,使得资源受限条件下的卫星网络系统能够为不同的用户提供 QoS 传输服务,能够在复杂的流量环境下稳定运行,同时为今后的卫星网络路由协议研究提供具有参考价值的研究思路。

1.2 卫星网络简介

卫星网络系统一般由地面基站、卫星星座系统和星地链路三部分组成,如图 1.1 所示。地面基站包括信关站和控制中心。控制中心负责整个卫星网络资源的运行管理,卫星遥操作和轨道控制。信关站在为不同的外部网络和卫星网络之间提供网络接口的同时负责协议转换和地址翻译^[9]。卫星星座系统由不同轨道的不同卫星通过星间链路连接而成,星座系统中的卫星节点具有星上处理功能,作用与地面路由器相同,负责路由和转发所收到的用户数据包。

卫星星座按照星座中卫星的轨道高度可分为同步地球轨道 (Geosynchronous Earth Orbit, GEO) 卫星星座,中轨 (Medium Earth