



田 野 冯永新 马玉峰 刘桂君 著

高级在轨系统中的多路复用与 差错控制技术研究



科学出版社

高级在轨系统中的多路复用与 差错控制技术研究

田 野 冯永新 马玉峰 刘桂君 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书着重阐述高级在轨系统中的多路复用与差错控制技术, 内容主要包括高级在轨系统中的帧生成算法、具有广泛适用性的虚拟信道调度算法、帧生成算法与虚拟信道调度算法的联合优化, 以及高级在轨系统中的信道编码技术、混合自动重传技术等。研究结果不仅可以解决传统的多路复用技术时延大、信道利用率低、适用性较差等问题, 并且能够提高空间链路的数据传输性能。

本书可供卫星通信、导航制导等相关领域的研究人员、专业技术人员、高校教师和研究生等参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高级在轨系统中的多路复用与差错控制技术研究 / 田野等著. —北京: 科学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-03-040282-0

I. ①高… II. ①田… III. ①数字信号传输—研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 055266 号

责任编辑: 张海娜/ 责任校对: 胡小洁

责任印制: 张 倩/ 封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencecp.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 210 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

随着空间科学的不断发展,许多空间任务,如载人空间站、无人空间平台和自由飞行的空间飞行器等都对数据的处理和传输提出了新的要求。除了要处理传统的遥测遥控数据之外,许多系统还要求同时在航天器与地面站间、航天器与航天器间双向音频和视频数据的传输。这些数据具有类型繁多、数据速率高、数据量大、突发性强和实时性要求高等特点,传统的空间数据处理和传输方法已经难以满足其数据传输需求。

国际空间数据系统咨询委员会开发了高级在轨系统(AOS)建议书,使其能迅速推广到各种公用和专用的空间通信网络之中。只要拥有能够建立高效、可靠的AOS空间链路传输技术,就具有对空间多种类型数据进行接收的能力,也就具备相应的导航、侦察、监控和测量等目的,进而在军用和民用上都可以得到广泛的应用。

AOS空间链路采用两级多路复用机制,即包信道复用机制和虚拟信道复用机制,将来自星上不同信源的数据汇成一条数据流后,通过空间物理信道进行传输,实现多用户动态共享同一空间物理信道。多路复用决定了各信源数据在空间物理信道中传输的时序,也决定了空间物理信道的效率。另外,空间物理信道具有信号时延大、误码率高和突发错误多等特点,常规的重传纠错方式、单一调制方式以及固定帧长制式等传输技术难以使空间链路的服务质量达到较好的性能。

由此可见,多路复用和差错控制是AOS的关键技术,也是研究的重点和难点。为此,该书对AOS的多路复用与差错控制相关理论与技术进行了深入的研究。该书所提出的关键技术、算法、策略和方案等,可以为AOS中的数据传输技术发展提供相关的理论支持和技术保障,也将为新型接收终端的研制与应用提供关键技术支持,并在相应技术领域发挥至关重要的作用。

北京交通大学教授



2014年4月1日

前 言

“多路复用”和“差错控制”作为 AOS 空间链路传输的核心技术，一直以来是研究的重点和热点。随着空间通信的迅猛发展，对 AOS 相关技术的研究也越来越深入，目前 AOS 技术已逐渐在空间信息获取、载人飞行器数据传输、气象与环境监控和空间探测等领域得到了推广和应用。在这些领域中，待传输的数据量大、数据种类繁多，且信道环境比较复杂，如何设计高性能的 AOS 多路复用和差错控制技术，以满足其高效、可靠的 AOS 空间链路传输需求，是一个非常重要的课题。

为此，针对现有的 AOS 多路复用与差错控制方法和技术的不足，在国家自然科学基金“高级在轨系统中的多路复用与链路自适应研究”（No.61101116）、辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划（LJQ2012018）和辽宁省高校创新团队（LT2011005）系列计划课题的支持下，作者进行了相关理论和技术的深入研究。在此基础上，完成研究成果汇总，并撰写本书，为相关领域的研究工作提出新方法和新思想。全书共分 6 章。

第 1 章“绪论”。阐述了本书撰写的背景及意义，以及 AOS 关键技术的现状、研究进展与发展趋势。

第 2 章“CCSDS 高级在轨系统协议分析”。对 CCSDS AOS 协议进行研究，主要分析了 CCSDS 的协议结构及其应用方式，重点对 CCSDS 制定的适用于中、高数据率航天器的 AOS 进行了分析，主要包括 AOS 的应用、数据流特点及数据单元格式，并给出了一种 AOS 空间链路数据传输框架结构的设计方法。

第 3 章“高级在轨系统中的帧生成技术研究”。给出了在包到达率服从泊松分布条件下，高效率帧生成算法的帧生成时间均值的计算方法，并提出了一种新的自适应帧生成算法。理论分析和仿真结果表明，自适应算法不但能克服高效率算法中可能出现的大时延问题，而且比传统的等时帧生成算法具有更高的信息传送速率。进一步，对帧生成算法的包时延性能进行了研究。分析了在包到达率服从泊松分布的条件下，高效率算法的平均包时延均值和自适应算法的平均包时延均值计算公式。理论分析和仿真结果表明，自适应算法比高效率算法具有更小的平均包时延均值与方差。在实际应用中，可以根据系统的需要灵活地设置自适应算法的门限值，以获得所期望的包时延和帧效率。

第 4 章“高级在轨系统中的经典虚拟信道调度技术研究”。对经典的虚拟信道算法，包括先来先服务算法、轮询算法、静态优先级算法、剩余量优先算法进行了研究，通过将这些算法应用于分包遥测系统模型进行了仿真分析，总结了其特点。进一步，对静态优先级算法在分包遥测系统模型中的应用进行了严格的理论分析，给出了包到达过程服从泊松分布、数据帧生成过程采用高效率算法的条件

下, 优先级最高的虚拟信道在各个调度时刻占用物理信道的概率以及在缓存为有限值时, 该虚拟信道的丢包概率。研究结果可以为工程设计提供参考作用。

第 5 章“高级在轨系统中的动态虚拟信道调度技术研究”。对动态虚拟信道调度算法进行了研究。针对现有动态调度算法的不足, 提出了一种基于数据帧紧迫度的调度算法。研究表明, 应用于载人航天器信源模型时, 基于数据帧紧迫度调度算法的性能明显优于传统的动态调度算法, 更适合空间链路的多样化数据传输。进一步, 提出了具有广泛适用性的虚拟信道调度算法, 对于不同速率、不同性质、不同类型的 AOS 星上信源, 该算法均可通过选择合适的参数灵活地分配传输时隙, 保证各用户合理、动态地占用物理信道, 满足对数据的传输时延要求, 因此具有广泛的适用性。理论分析和仿真结果表明, 应用于多种星上信源模型时, 本书提出的算法性能均优于传统的动态调度算法。然后, 对于高度复杂的星上信源调度, 本书提出了边界可移动的具有广泛适用性的调度算法, 进一步提高了调度性能。

第 6 章“高级在轨系统中的差错控制技术研究”。差错控制技术包括信道编码技术与重传技术, 是提升无线传输性能的有效技术。信道编码技术通过增加信息冗余度为代价提高接收机的检错纠错功能, 从而提高传输可靠性; 重传技术则利用更多的时间资源提高可靠性。显然, 信道编码技术和重传技术分别以不同的方法, 对通信系统的可靠性进行优化。AOS 协议规定了其采用的标准编码方式为卷积码、Turbo 码、R-S 码, 但对采用何种重传方式以实现可靠传输, 并没有给出具体的方案。为此, 对 AOS 中的差错控制技术进行研究, 首先仿真分析了采用卷积码和 Turbo 码时 AOS 空间链路的性能, 在此基础上, 提出了引入混合自动重传技术的 AOS 空间链路传输方案, 从而提高了链路的吞吐量和传输的可靠性。

在本书的研究工作中, 作者要感谢课题组所在的辽宁省“信息网络与信息对抗技术”省级重点实验室和辽宁省“通信与网络技术”省级工程中心所提供的研究平台和条件, 还要感谢课题组所在的辽宁省高校“信息网络与信息对抗”创新团队的积极协作。本书的撰写工作还得到了团队成员赵运弢、刘庆利、肖志东、刘立士、姜月秋、张德育、张文波、田明浩、张子敬、张艳琴、高晓玲、夏莹、李清凡、王珊珊等的大力支持, 在此表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免有不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 2 月 1 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究的背景、意义与目的	1
1.2 研究的现状、进展与趋势	2
1.3 研究的思路、方法与创新	5
第 2 章 CCSDS 高级在轨系统协议分析	10
2.1 CCSDS 协议分析	10
2.1.1 CCSDS 协议层次模型	10
2.1.2 CCSDS 空间数据链路协议	12
2.1.3 CCSDS 网络协议	12
2.2 AOS 数据流特点与数据单元格式	13
2.2.1 AOS 数据流特点	13
2.2.2 AOS 数据单元格式	14
2.3 AOS 空间链路数据传输框架设计	21
2.4 小结	22
参考文献	23
第 3 章 高级在轨系统中的帧生成技术研究	24
3.1 包到达模型	25
3.2 高效率帧生成算法研究	25
3.3 自适应帧生成算法研究	27
3.3.1 算法描述	27
3.3.2 自适应算法与高效率算法的帧生成时间均值的比较	28
3.3.3 仿真结果	29
3.4 帧生成算法的包时延性能分析	35
3.4.1 高效率帧生成算法的包时延性能分析	36
3.4.2 自适应帧生成算法的平均包时延性能分析	38
3.4.3 仿真结果	42
3.5 小结	47
参考文献	48
第 4 章 高级在轨系统中的经典虚拟信道调度技术研究	49
4.1 经典调度算法的性能仿真与分析	50

4.1.1	经典虚拟信道调度算法描述	50
4.1.2	经典虚拟信道调度算法性能仿真	50
4.2	基于静态优先级的虚拟信道调度算法理论研究	54
4.2.1	调度模型	54
4.2.2	理论分析	54
4.3	小结	69
	参考文献	69
第 5 章	高级在轨系统中的动态虚拟信道调度技术研究	71
5.1	基于 VC 紧迫度的动态调度算法	71
5.2	基于帧紧迫度的虚拟信道动态调度算法	73
5.2.1	算法描述	73
5.2.2	仿真结果	74
5.3	具有广泛适用性的动态虚拟信道调度算法	86
5.3.1	VC 紧迫度	87
5.3.2	数据帧紧迫度	87
5.3.3	虚拟信道传送紧迫度函数	87
5.3.4	加权系数的取值策略	88
5.3.5	仿真结果	88
5.4	自适应算法与虚拟信道调度算法的结合应用	99
5.5	引入边界可移动技术的 SABA 算法	103
5.5.1	同步 VC 调度方法	104
5.5.2	异步 VC 调度方法	105
5.5.3	仿真结果	105
5.6	小结	125
	参考文献	126
第 6 章	高级在轨系统中的差错控制技术研究	127
6.1	AOS 中信道编码技术的仿真研究	128
6.1.1	AOS 信道编码仿真系统模型的建立	128
6.1.2	卷积码的编译码原理	129
6.1.3	Turbo 码的编译码原理	130
6.1.4	AOS 系统的信道编码性能仿真与比较	135
6.2	引入 HARQ 技术的 AOS 链路性能研究	141
6.2.1	引入 HARQ 技术的 AOS 仿真系统模型的建立	141

6.2.2 HARQ 的原理和实现方案	143
6.2.3 不同类型的 HARQ 对 AOS 系统性能影响的仿真与比较	147
6.3 小结	154
参考文献	154

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景、意义与目的

随着航天飞机、载人飞船和轨道空间站技术的发展,人类的空间活动进入了一个空间站时代,空间通信系统的研究已成为热点。除了传统的遥测、遥控数据之外,许多空间系统和空间任务还要求同时在空间链路中双向传输音频、视频、科学实验等多种不同类型的数据。这些数据具有数据量大、突发性强、实时性要求较高等特点,传统的空间数据处理和传输方法已经很难满足这种复杂的数据需求。另一方面,目前,为促进各国和各空间组织间的交互支持与合作,并通过标准化的途径降低空间任务的开发和运行成本、缩短空间数据系统的开发研制周期,也需要制定一个空间通信的规范,以提高空间数据系统的性能,适应日益复杂的空间任务的需要。为此,空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)开发了高级在轨系统(advanced orbiting systems, AOS)协议。

AOS 协议提出了 CCSDS 主网(CCSDS principal net, CPN)的概念模型,用于端-端的数据传输,以便于支持空间任务用户的使用。CPN 在结构上包括星载子网、空间链路子网(space link subnet, SLS)和地面网络三部分。其中星载网类似于计算机局域网,它是 CPN 的在轨段或空间段,如卫星、飞船、空间站等,每个航天器内部都构成了一个星载网;地面网主要是由地面设备、系统以及相关数据组成;空间链路子网是 CPN 主网的核心,用以保障空-地或空-空双向的音频、视频、图像等多种类型的大容量数据传送,空间系统的数据由星载网收集后,必须经由空间链路子网才能传输到地面网络。然而,CCSDS AOS 只定义了空间链路子网的总体结构与服务类型,并没有设计出具体的传输技术。因此,研究出高效、可靠的 AOS 空间数据链路传输技术,尤其是其中的多路复用技术与差错控制技术,以建立空间通信中的高速信息通道,从而提高空间通信中的数据传输质量和效率,为空间链路子网提供链路级支撑作用,是 AOS 研究中的重点问题和关键问题。

AOS 为多种信源或用户提供服务,这些信源或用户信息产生的时刻独立无关,且数据量、数据率和实时性要求各不相同。为有效传输这些多信源、多用户且业务质量要求各不相同的信息,提高空间数据信道的利用率,AOS 空间数据链路采用帧生成与虚拟信道复用两层多路复用机制来实现多用户动态共享同一物理信道。其中,帧生成的功能是为高层协议产生的各种类型的数据包提供一种共享虚拟信道(帧)的机制。该模块通过将来具有相同或相似服务质量要求、需要在同一虚拟信道中传输的多种数据包复用并分段装入固定长度的复用协议数据单

元 (multiplexing protocol data unit, MPDU) 的包区中, 再分别加入 MPDU 主导头、帧主导头、帧尾, 从而生成一帧, 在该层复用中, 需要考虑到包时延和复用效率这两个重要的指标。而虚拟信道 (virtual channel, VC), 是指将空间物理信道在时隙上进行划分而得到的多个分离的逻辑信道, 每个虚拟信道传输来自特性相同或相近的用户的数据, 这些虚拟信道共享 (复用) 该物理信道, 在该机制中具体采用的算法, 即虚拟信道调度算法, 决定了虚拟信道数据单元 (virtual channel data unit, VCDU) 从虚拟信道到物理信道时的排序, 也决定着整个物理信道传输的效率。因此, 如何设计出性能良好的帧生成算法与虚拟信道调度算法, 并对二者进行联合优化, 以合理地分配不同类型的数据占用物理信道的时隙, 是一个非常重要的问题。随着 AOS 空间系统中大量呈动态变化的信源用户的增加, 传统的 AOS 多路复用技术, 包括等时帧生成算法、高效率帧生成算法、先来先服务调度算法、剩余量优先调度算法、静态优先级调度算法以及轮询调度算法已经不再完全适用, 而经过我们前期的研究发现, 目前主要使用的动态优先级调度算法在一些信源模型下性能较好, 但在很多信源模型下性能较差, 因此必须对 AOS 多路复用技术, 包括帧生成算法和虚拟信道调度算法展开深入的研究。

另外, AOS 空间链路与地面链路相比, 具有信号时延大、误码率高、突发错误多等特点, 这使得单一的重传方式、单一的调制方式以及固定帧长制式等传统的传输技术很难使空间链路的服务质量 (quality of service, QoS) 达到较好的性能。因此, 对差错控制技术的研究就显得非常重要。差错控制技术主要包括检错重发、前向纠错、反馈校验、检错删除等方式, 该技术通过采用信道编码技术完成检错纠错功能, 并通过采用重传技术进一步提高传输的可靠性。目前, 对 AOS 空间链路差错控制技术, 尤其是混合重传技术的研究刚刚起步, 成果也比较少, 因此, 我们更应研究能够根据 AOS 空间链路实时状态, 灵活地选取数据帧长度、编码方式以及重传方式的差错控制技术, 从而提高空间链路的吞吐量性能, 为未来的空天地一体化信息网络提供链路级支撑作用。

综上, 针对空间通信技术的发展、多种传输业务的需求以及现有 AOS 空间链路传输技术的不足, 我们提出进行 AOS 多路复用与差错控制技术研究, 核心为帧生成算法、虚拟信道调度算法、帧生成算法与虚拟信道调度算法联合优化、信道编码仿真技术以及混合自动重传技术的研究。

1.2 研究的现状、进展与趋势

1. 国内外研究现状

近几年来, 世界各国对空间通信的研究尤其是对 AOS 的研究及应用已达到高

潮,相继地,AOS 中的核心技术,即 AOS 多路复用技术与链路自适应技术也引起了人们广泛的关注。同时,各国在军事上的应用需求也推动着 AOS 的发展趋势从以民用为主转变为军民两用,目前,AOS 技术尤其是 AOS 空间链路传输技术,包括多路复用技术与链路自适应技术,越来越受到各军事强国的重视。因此,各国都相继开展了对 AOS 多路复用技术与链路自适应技术的研究。

1) AOS 技术发展现状

CCSDS 为了能够提供更加灵活方便的数据处理服务,于 1986 年在其制定的常规在轨系统(conventional orbiting systems, COS)建议书的基础上做了提高和扩展,开发了以满足载人航天器等复杂航天器需求的数据传输和管理系统,即协议。与其他空间通信技术或规范相比,AOS 具有能够满足多种空间任务需要、支持多种数据速率传输(从每秒几比特到每秒几百兆比特)、空间信道利用率高以及可以实现国际范围的开放式系统互联,从而创造更多的国际参与和相互支持的机会等优势。目前,AOS 已成为国际空间站、空间通信网络、空间探测以及气象和环境监控卫星设计等领域的重要研究课题,且其重要性仍不断增长,具有广阔的应用发展前景。

国际空间站是 AOS 技术的典型应用。国际空间站是以美国、俄罗斯为首,包括欧洲宇航局、加拿大和日本等 12 个国家联合研发的大型载人航天计划,其数据系统体制上就采用了 AOS 建议标准,并采用 AOS 中的四种业务,即路径业务、位流业务、包装业务和合路业务进行数据传输,其中路径业务主要用来传送遥测数据、高速有效载荷数据、视频数据;而位流业务则用来传输语音数据和部分高速有效载荷数据。国际空间站的 AOS 方案将国际空间站本身的特点和 AOS 数据体制很好地结合在一起,并综合考虑了多国合作和技术发展等问题,有许多值得我们学习和借鉴的地方,为设计我国未来空间站和空间站的 AOS 方案提供了很有价值的参考。

AOS 技术在我国国内的空间站计划和航天器研究中也得到了广泛的应用。中国空间技术研究院在 1995~1999 年期间先后完成了 863 课题“空间站信息与数据系统概念研究”、预研课题“CCSDS 体制空间数据系统研究”、国家 863 课题“空间站 AOS 方案研究”,在分析了我国未来空间站数据系统性能需求的基础之上,提出在我国未来空间站、高速卫星采用 AOS 体制的设计方案,并详细分析论证了我国空间站数据系统的拓扑结构、各级网络的选型、AOS 业务的选择、各种不同类型数据流的分析和处理方式以及调度策略等。在这些研究成果的基础上,中国空间技术研究院与西北工业大学完成了 863 课题“空间站 AOS 演示验证系统”的研究,该课题完成了中等信道码速率(40Mb/s)下 AOS 基本业务的实现和主要关键技术攻关,并建立用于空间站的 AOS 演示验证系统,研制了相关软硬件设备。

近些年中,AOS 在实践五号卫星及神舟飞船数管系统也得到了应用,这也

说明了国内航天器测控技术的发展正在逐渐向国际标准靠拢,而且复杂的航天器(如载人飞船等)已经不仅仅需要常规数据系统的支持,还需要使用 AOS 实现数据的规范化管理。在测控系统的实现中,从 COS 向 AOS 的过渡是必然的发展趋势。

2) AOS 空间链路多路复用与差错控制技术发展现状

为建立空间通信中的高速信息通道,提高空间通信中的数据传输质量和效率,为空间链路子网提供链路级支撑作用,AOS 空间数据链路传输技术,尤其是多路复用技术和链路自适应技术已成为国内外研究的重点及难点。虽然可以通过使用高精度的原子钟、A/D、大规模的集成电路等硬件设施来实现高效的信号传输,但是,考虑到高精度设备的稳定性、兼容性、复杂度及成本等问题,对空间数据链路的核心研究还应主要围绕高效、可靠的链路传输技术与算法展开。

现阶段,在 AOS 空间链路传输技术中,对于业务类型比较单一的星上数据源虚拟信道调度算法已经具有了一定的初步研究成果。但随着星上数据源的日益复杂化、多样化,这些算法已经很难满足实际的需求,如先来先服务算法虽然具有最公平的延迟性能,但正是由于它的公平性,在过载的条件下会造成关键数据的丢失;而剩余量优先算法虽有利于缓解虚拟信道中数据帧的大量积压和堆积,但其最大时延性能较差,轮询调度算法和静态优先级调度算法的延迟性能则介于先来先服务调度算法和剩余量优先调度算法之间。因此,对动态优先级调度算法的研究已成为必然。在目前的研究成果中,主要包括传统的动态优先级调度算法及其基础之上的改进算法。通过我们前期的研究发现,这些算法虽然在一定程度上能够提高时延性能,但其本身也存在着一定的问题,如传统的动态优先级调度算法及其改进算法只考虑到虚拟信道的紧迫度,而没有注意到同一虚拟信道中各帧的紧迫度是不同的,因此在对一些星上信源数据进行调度时延较大,并且多数算法均针对特定的星上信源设定,可移植性较差。因此,非常有必要研究新的动态优先级调度算法。

链路吞吐量是衡量空间链路整体性能的一个重要指标,而空间信道的时变性、复杂性是制约 AOS 链路吞吐量性能的关键因素。目前,AOS 在空间链路子层将连续的数据流划分成固定长度的传输帧,经同步与信道编码子层进行信道编码、加入附加帧同步标志(attached synchronization marker, ASM)后,再经由物理层进行发送。这种传输模式的优点是简单可靠并便于帧同步。但是,由于空间链路的特性、空间通信的业务类型以及空间通信业务的分布都会随时间、空间的变化而变化,单一的固定帧长模式和编码方式很难获得较好的 AOS 空间链路的吞吐量性能;另一方面,对于 AOS 可靠性要求较高的用户数据,需要通过混合自动重传技术提高数据传输的可靠性,而如何选择最优的重传方式,使得在满足可靠性要求的前提下,尽可能地不增加传输时延,也是一个非常重要的问题,但国内外对

这方面的研究成果也比较少。因此,如何设计出性能良好的差错控制技术,包括信道编码技术与混合自动重传技术,从而提高 AOS 空间数据链路的吞吐量性能,具有重要的现实意义。

2. 发展动态分析

通过综合论证和深入研究,AOS 技术特别是 AOS 空间链路传输技术研究将呈现以下发展趋势,这也正是本书有待研究的重点和关键:

- (1) AOS 新型帧生成技术的研究,以降低空间数据包的时延;
- (2) AOS 新一代高速复接技术的研究,以实现多种信源的数据装载和传输控制;
- (3) 新型帧生成技术与新型虚拟信道调度联合优化的研究,以提高空间信道的利用率,降低用户数据的传输时延;
- (4) 抗衰落帧同步技术与高效信道编码技术研究,以降低传输的差错概率;
- (5) AOS 空间链路混合自动重传技术研究,以提高空间链路的吞吐量;
- (6) AOS 新的链路抗毁技术研究,为网络层路由抗毁和重构提供服务和支持;
- (7) AOS 的链路吞吐量优化技术研究,为 CCSDS 协议跨层优化提供链路支持。

1.3 研究的思路、方法与创新

本书将遵循如图 1-1 所示的研究方案展开。在对国内外相关理论与先进技术研究的基础上,重点将现有的 AOS 传输技术、AOS 系统应用,作为 AOS 多路复用和差错控制研究的理论和技术借鉴。进一步,进行具有自主知识产权的算法、机理和技术的创新研究,主要包括如下方面。

1. AOS 多路复用技术研究

1) 帧生成算法研究

AOS 中的帧生成,即包信道复用、包复用帧,其功能是为高层协议产生的各种类型的数据包提供一种共享虚拟信道(帧)的机制。该模块通过将来具有相同或相似服务质量要求、需要在同一虚拟信道中传输的多种数据包复用并分段装入固定长度的 MPDU 的包区中,再分别加入 MPDU 主导头、帧主导头、帧尾,从而生成一帧。目前主要的帧生成算法为等时帧生成算法(每隔一段固定的时间将上层到达的包封装成一帧并释放)与高效率帧生成算法(到达的包总长度可以填满 MPDU 包区时才释放一帧)。长期以来,对于帧生成算法的 MPDU 复用效率和包时延的研究主要是根据经验给出估计值,很少有文献给出严格的理论分析。

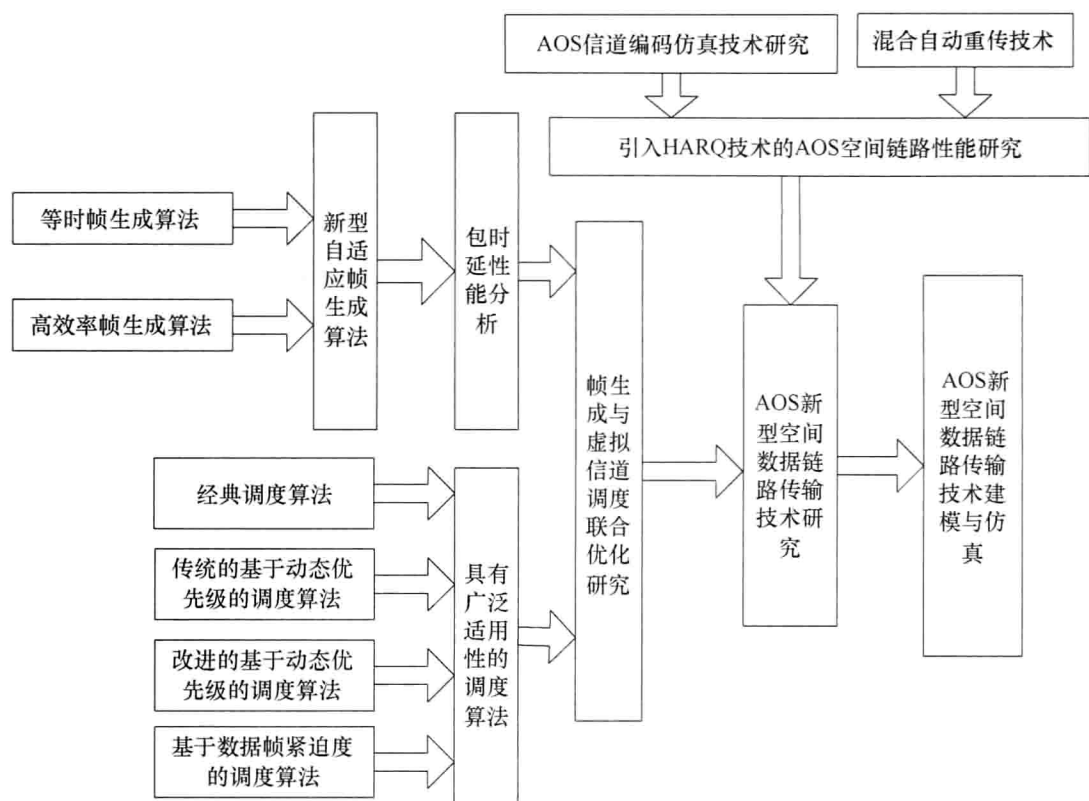


图 1-1 研究方案

有研究表明,当包到达过程服从泊松无记忆过程且数据包长度固定的情况下,对于等时帧生成算法,其各个数据帧的复用效率均值是不同的,呈逐渐增加趋势,当系统运行时间足够长时,各个数据帧的 MPDU 复用效率均值将趋于一定值;而高效率算法的复用效率为 100%,并通过仿真验证了理论分析的正确性。但另一方面,研究结果也表明,等时算法的包时延性能很不理想;而高效率帧生成算法中也存在着较长时间内没有足够多的包到达,导致帧生成时间过长,从而造成帧生成时延超过业务所允许的最大时延情况。因此,拟在这两种帧生成算法的基础上,开展对新的基于门限值的自适应帧生成技术研究,通过研究在不同门限值下自适应算法的 MPDU 复用效率、帧生成时间均值、每帧平均包时延均值及总平均包时延均值,确定理想的门限值选取方案,使自适应生成算法兼有较高的 MPDU 复用效率和较好的包时延性能。

2) 新的虚拟信道/帧分离估计的动态调度算法研究

随着星上数据源的日益复杂化、多样化, AOS 新型动态虚拟信道调度算法的研究成为必然。考虑到星上数据源的多样性、复杂性以及空间链路所传输数据的多样化,良好的调度算法不但应该能充分利用物理信道的带宽,并防止某个数据源长时间地垄断信道以增加各数据的公平性,还应该具有较广泛的适用性,使之略作调整,便可以移植用于多种星上数据源的调度。因此,拟进行新的基于虚拟

信道/帧分离估计的调度算法研究。首先通过设计合理的虚拟信道紧迫度函数,以记录任一虚拟信道在竞争物理信道之前已经等待的时间,防止某一虚拟信道垄断物理信道;再通过设计合理的数据帧紧迫度函数,以记录并区分任一虚拟信道中每个数据帧已经等待的时间,从而克服传统的动态优先级算法中,当某一虚拟信道传完一个数据帧后,虚拟信道紧迫度下降时,缓存中其他数据帧已经等待的时间被清零的问题;最后根据被调度的星上数据源的特点,采取相应的方案将二者有效的结合,形成一个新的虚拟信道紧迫度函数进行判决调度,这可以使得新型算法不但在逻辑上更具备合理性,能提供较好的调度性能,而且还能具有广泛的适用性。

3) 帧生成技术与虚拟信道调度联合优化的研究

AOS 采用帧生成技术和虚拟信道调度两层多路复用机制实现多用户动态共享同一信道,具体的过程为:在帧生成模块中生成的数据帧首先分别送入各自虚拟信道的帧缓冲区,在每个调度时刻,各虚拟信道缓冲区的第一帧在虚拟信道调度模块中参与竞争物理信道。因此,帧生成模块的性能和虚拟信道调度模块的性能相互影响,共同作用,决定着 AOS 多路复用的总时延(帧生成过程中的包时延与虚拟信道调度过程中的帧时延之和)和信道利用率。如果各虚拟信道的帧生成速度过慢,不但帧生成过程中的包时延较大,而且会造成在很多调度时刻,所有虚拟信道缓冲区都没有数据帧,此时为保证空间数据流的连续性,系统将会在物理信道上传输填充数据帧,从而降低信道利用率;而当各虚拟信道的帧生成速度过快时,虽然帧生成过程中的包时延较小,但每个数据帧中的有效包数也随之减少,从而降低信道的利用率,同时虚拟信道缓存中积压的帧数会大量增加,增大调度过程中的帧时延。因此,必须对帧生成技术与虚拟信道调度进行联合优化研究,设置能与调度算法匹配的最优的帧生成速度,从而降低多路复用总时延,并提高空间信道的利用率。

4) 基于多路复用的性能分析

在新的帧生成算法、新的虚拟信道/帧分离估计的动态调度算法、帧生成算法与虚拟信道调度算法联合优化的研究基础上,通过相应的分析手段,建立数学模型,对 AOS 多路复用进行时效性及复杂度分析。

2. AOS 空间链路差错控制技术研究

用户数据在空间链路进行传输的过程中,除了具有自由空间损耗外,还受降雨、云层、大气吸收等因素的影响,因此空间信道误码率较高,且具有时变的特点。差错控制技术,包括信道编码技术与重传技术,是提升无线时变信道传输性能的有效技术。信道编码技术通过在传输数据中引入冗余来降低数字数据在传输过程中出现差错的概率;重传技术则利用更多的时间资源提高可靠性。显然,信

道编码技术和混合自动重传技术分别采用不同的方法对空间通信系统的可靠性进行优化。然而,对于共存于 AOS 通信系统中的信道编码和重传技术,如何在两者之间取得联合优化,目前尚无充分的研究成果。因此,拟开展 AOS 系统中的信道编码与重传技术研究,主要包括:

1) 采用卷积码和 Turbo 码的 AOS 空间链路性能研究

AOS 指定在链路传输中,可使用卷积码、Turbo 码或 R-S 码对所传输的数据帧进行编码,以获得编码增益,降低传输中的差错率,并提高链路吞吐量。在本研究方案中,拟分析 AOS 选定的卷积码和 Turbo 码的编译码原理与算法,并建立 AOS 信道编码仿真系统的模型,对采用卷积码和 Turbo 码的 AOS 空间链路性能进行仿真研究。通过分析交织长度、分量编码器的生成矩阵和迭代次数等参数对采用 Turbo 码的 AOS 空间链路性能的影响,选取合适的 Turbo 码参数选取方案。进一步,通过比较在相同参数下,采用卷积码的 AOS 系统和采用 Turbo 码的 AOS 系统的误比特率、误帧率和吞吐量等性能,确定在 AOS 系统中,卷积码和 Turbo 码各自所适用的通信环境和系统要求。

2) 引入重传技术的 AOS 空间链路性能研究

在信道环境较差,或传输可靠性要求很高的情况下,仅采用信道编码技术很难满足 AOS 系统的传输要求。因此,拟开展引入重传技术的 AOS 空间链路性能研究。通过将卷积码、Turbo 码与自动请求重传技术结合起来,形成混合自动请求重传(hybrid automatic repeat request, HARQ)技术,以克服仅采用重传技术时造成的传输效率较低的问题,并建立引入 HARQ 技术的 AOS 空间链路仿真系统模型,仿真在引入采用卷积码和 Turbo 码的 HARQI、HARQII、HARQIII 方案时, AOS 空间链路的误比特率、误帧率、平均传输次数和吞吐量的性能,从而选出其中最优的 HARQ 方案,以提高 AOS 空间链路传输的可靠性。

3. AOS 空间链路新型传输方案建模及仿真技术研究

在理论研究的基础上,课题组将进行 AOS 空间链路新型传输方案建模与仿真技术研究,重点为基于 HLA/RTI 的分布式仿真技术,从而指导课题的不断深入与改进。

在研究过程中,本书坚持理论与实践相结合,循序渐进,进行关键技术的仿真建模与设计,并细致地分析与论证,以相关研究的实验数据为指导进行改进和完善,有计划、有步骤地完成。主要采用的实验手段为:对提出和建立的新的算法、方法和机理等采用 MATLAB 7.1、Visual Studio C++等软件进行仿真及测试。进一步,采用 MAK-RTI 2.2、VR-Link 3.9.1、Oracle DBMS、STK 5.0 等软件,通过合理有效的推进与时间受限的控制策略,以及基于