

LEO/MEO 双层卫星网络层间星际链路建立策略的性能研究

吴廷勇 吴诗其

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要: 从改善 LEO/MEO 双层卫星网络拓扑结构稳定性的角度出发, 该文提出了 3 种基于集中重建的层间星际链路建立策略。新策略的基本思想是通过强制所有层间星际链路在相同时间进行重建来大幅减少网络拓扑的重构次数。仿真结果表明, 与原有的策略相比, 该文提出的策略能够以可接受的代价提高 LEO/MEO 双层卫星网络拓扑结构的稳定性。

关键词: LEO/MEO; 双层卫星网络; 层间星际链路; 网络拓扑重构; 建立策略

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)01-0067-05

Performance Analysis of the Inter-Layer Inter-Satellite Link Establishment Strategies in Two-tier LEO/MEO Satellite Networks

Wu Ting-yong Wu Shi-qi

(The National Key Lab. of Communication, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Three new merged-reconstruction-based Inter-Layer Inter-Satellite Link (ILISL) establishment strategies are proposed to reduce the number of network topology reconfiguration and enhance the topology structure stability of the two-tier Low Earth Orbit (LEO)/Medium Earth Orbit (MEO) satellite networks. These proposed strategies decrease the number of the network topology reconfiguration by forcing reconstruction of all ILISL at the same time. Simulation results show that the number of the network topology reconfiguration can be reduced greatly with proposed strategies. Hence the topological stability of the LEO/MEO two-tier satellite networks can be improved with acceptable cost.

Key words: Low Earth Orbit (LEO)/Medium Earth Orbit (MEO); Two-tier satellite networks; Inter-Layer Inter-Satellite Link (ILISL); Network topology reconfiguration; Establishment strategy

1 引言

随着用户对高速多媒体业务需求的不断增长, 卫星通信网络也在经历宽带化过程, 传统的语音和低速数据业务在未来卫星通信系统中所占的比例将逐渐减少, 而 Internet 业务和宽带多媒体业务将成为主要的业务。为顺应发展需求, 未来的卫星通信网络需要使用具有较强的星上处理和交换能力的卫星, 并利用星际链路实现卫星间的互联, 以降低对地面网络的依赖程度, 使得卫星通信网络能够以更加灵活和快捷的方式为全球用户提供服务^[1]。

上世纪90年代以来, 在卫星通信领域掀起了研究 Low Earth Orbit (LEO)/Medium Earth Orbit (MEO) 双层卫星网络的热潮。在 LEO/MEO 双层卫星网络中, LEO 星座通常充当具有本地交换功能的接入网络, MEO 星座则是完成传输、交换和管理功能的骨干网络, LEO 星座和 MEO 星座之间采用层间星际链路 ILISL (Inter-Layer Inter-Satellite Link) 连接^[1-5]。LEO/MEO 双层星座结构可以简化 LEO 卫星的结构, 降低 LEO 卫星的成本, 降低对 LEO 卫星星际链路天线捕

获和跟踪性能的要求, 同时还保留了 LEO 卫星传输延时短、损耗小的特点; 完成传输、交换和管理功能的 MEO 星座结构简单、固定, 有利于路由的简化和减少交换的中间节点, 减少信息的交换延时及其抖动, 减少路由重构的概率和信息开销^[1,3]。

LEO/MEO 双层卫星网络的一个显著特点是网络节点 (即卫星) 的移动性。卫星的运动给网络结构带来两个方面的影响。一是 LEO 卫星的运动导致终端与 LEO 卫星间的用户链路切换; 另一方面, 由于 LEO 卫星和 MEO 卫星之间存在相对运动, ILISL 存在着建立-拆除-再建立的动态变化过程, 称为 ILISL 的重建。

用户链路的切换带来 LEO 卫星资源重新分配等诸多问题, 一直是卫星通信领域的研究热点, 已经有大量的研究成果^[6-10]。相对而言, 由于 ILISL 重建的频率远低于用户链路切换的频率^[1], 因此对 LEO/MEO 双层卫星网络的研究主要集中于双层卫星网络的路由和组播问题^[1-5], 很少考虑 ILISL 的建立策略对系统性能的影响。实际上, 由于 ILISL 是双层卫星网络的骨干传输链路, 每一次 ILISL 的重建都可能导致整个网络拓扑的重构, 因此 ILISL 重建对网络性能的影响不可忽略。利用高效的 ILISL 建立策略, 尽可能地减少双层卫星网络拓扑重构次数, 提高网络拓扑结构的稳定性, 是非常

有价值的研究课题。

本文从改善LEO/MEO双层卫星网络拓扑结构稳定性的角度出发,提出了3种新的基于集中重建的ILISL建立策略。从网络拓扑结构的稳定性,ILISL的稳定性和系统资源利用率方面,对新策略和原有策略的性能进行了仿真分析和比较,验证了新策略的有效性。本文第2节讨论LEO/MEO双层卫星网络的结构和ILISL的可见性约束;第3节简介3种已有的ILISL建立策略,给出了3种新的基于集中重建的ILISL建立策略;第4节是数值仿真和性能比较;第5节是结束语。

2 LEO/MEO 双层卫星网络模型

2.1 网络拓扑结构

LEO/MEO双层卫星网络的结构如图1所示。网络由用户层,LEO卫星层和MEO卫星层组成。

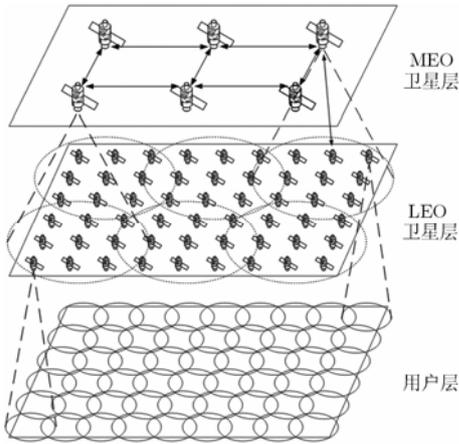


图1 LEO/MEO 双层卫星网络结构

用户层包括各种类型的用户终端,可以是便携和手持终端、车载和机载终端等。

LEO卫星作为接入层卫星,负责与地面终端的直接通信。根据LEO星座特性的不同,系统网络有两类结构:(1)如果LEO星座内采用了星际链路,部分用户数据可以在LEO卫星层内传递。如果源和目的终端间的距离较近,传输经历的跳数较少时,数据就可以通过LEO卫星星际链路直接传输,否则数据需要传递到MEO卫星层。文献[2-5]在研究时采用了这样的网络结构;(2)如果LEO星座内没有星际链路,则所有的用户数据都经过ILISL传递到MEO卫星层进行路由和中继传输。文献[1]在研究时采用了这样的网络结构。

MEO卫星完成传输、交换和管理功能。MEO卫星之间采用星际链路连接,MEO卫星与LEO卫星之间通过ILISL连接。无论LEO星座内是否采用了星际链路,ILISL都是双层卫星网络中的骨干传输链路,担负着大量的传输任务。

2.2 LEO 卫星与 MEO 卫星的空间几何关系

双层卫星网络中,LEO卫星和MEO卫星的基本空间几何关系如图2所示。图中, $R_e=6378.137$ km,为地球平均半

径; h_L 为LEO卫星轨道高度; h_M 为MEO卫星轨道高度; h_p 为余隙高度。理论上,ILISL可以与地球表面相切,但考虑到地球并非理想的球体,且接近地表的大气层电磁环境比较复杂,因此ILISL对地留有一定的保护距离(即余隙)是适当的^[11]。

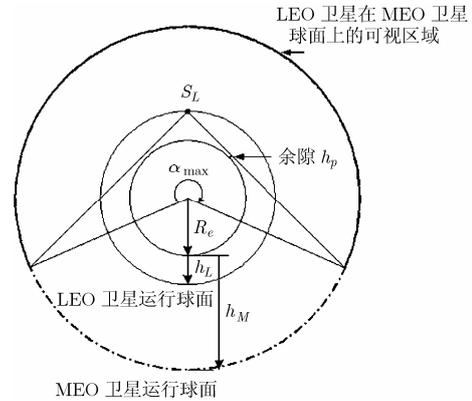


图2 LEO卫星和MEO卫星的基本空间几何关系

由图2可见,每颗LEO卫星在MEO卫星运行球面上的可视范围较大,因此LEO卫星可能与多颗MEO卫星建立ILISL。根据图2所示的几何关系,可以推出LEO卫星 S_L 在MEO卫星运行球面上的可视面积百分比:

$$S = \frac{1 - \cos \left[\arccos \left(\frac{R_e + h_p}{R_e + h_L} \right) + \arccos \left(\frac{R_e + h_p}{R_e + h_M} \right) \right]}{2} \times 100\%$$

图3给出了 h_L 分别为1414 km和780 km时,LEO卫星在不同高度的MEO卫星运行球面上的可视面积百分比。

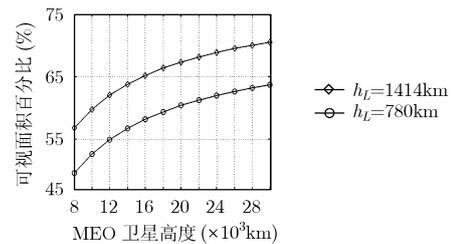


图3 LEO卫星在不同高度MEO卫星运行球面上的可视面积百分比

由图3可见,LEO卫星在MEO卫星运行球面上的可视面积几乎都能超过50%。如果MEO星座采用Walker Delta星座形式,卫星在运行球面上分布较均匀,则可视MEO卫星的数量近似于可视面积百分比乘上总MEO卫星数量。因此,根据表1中的参数,轨道高度为1414km和780km的LEO卫星大约能够同时看到6颗和5颗NewICO卫星。

LEO卫星需要为每一条ILISL提供一副具备跟踪能力的星载收发天线,因此,在卫星体积和重量、电源和射频功率、星体稳定度等诸多因素的限制下,LEO卫星不可能与所

有可视的MEO都建立ILISL,而只能建立1或2条ILISL,所以需要一定的策略来选择建立ILISL的MEO卫星。另外,LEO卫星和MEO卫星之间的相对运动使得LEO卫星不能始终维持与同一MEO卫星的可视性,因此ILISL存在动态重建过程。每一次ILISL的重建都可能导致整个网络拓扑的重构,为了提高LEO/MEO双层卫星网络拓扑结构的稳定性,尽可能降低网络拓扑的重构次数,需要在ILISL的建立策略上采取相应的措施。

3 层间星际链路建立策略

3.1 已有的ILISL建立策略

由于ILISL的重建过程与用户链路切换过程的相似性,已有的ILISL建立策略通常是简单地直接采用用户链路切换策略。常见的3种ILISL建立策略分别是最近距离策略、最长连接时间策略和最多资源策略。为简化起见,在本文中分别简称为距离策略、时间策略和资源策略。

(1)距离策略:LEO卫星始终与距离最近的MEO卫星建立ILISL。LEO卫星不断检测与可视MEO卫星间的距离,一旦发现与距离更近的MEO卫星,立即拆除与当前MEO卫星间的ILISL并与距离更近的MEO卫星建立ILISL。该策略可以保证所建立的每条ILISL距离最小化,但将导致最频繁的ILISL重建。

(2)时间策略:初始时或链路重建时,LEO卫星选择能够为自己提供最长连接时间的MEO卫星建立ILISL,并维持该链路,直到该MEO卫星将要飞出LEO卫星的可视范围,重新选择能够为自己提供最长连接时间的MEO卫星。该策略可以保证所建立的每条ILISL的重建次数最小化,但ILISL的平均距离较长。

(3)资源策略:初始时或链路重建时,LEO卫星与具有最多空闲资源的可视MEO卫星建立ILISL,并维持该链路,直到该MEO卫星将要飞出LEO卫星的可视范围,重新选择具有最多空闲资源的可视MEO卫星。该策略可以保证MEO星座资源的均匀利用。

文献[1-4]没有明确给出所采用的ILISL建立策略;文献[5]中则考虑了前两种策略。

研究发现:每颗LEO卫星独立地选择与之建立ILISL的MEO卫星,使得各ILISL的重建时间比较分散,从而导致了网络拓扑重构次数的增加。因此,通过调整ILISL建立策略,使得部分甚至全部LEO卫星的ILISL重建时间对齐,从而以可接受的代价,大幅减少网络拓扑重构次数,提高LEO/MEO双层卫星网络拓扑结构的稳定性。

3.2 基于集中重建的ILISL建立策略

基于尽可能减少LEO/MEO双层网络的拓扑重构次数,改善网络拓扑结构稳定性的思想,提出了3种新的基于集中重建的ILISL建立策略。新策略的核心思想是:将时间上分散的各ILISL的重建集中进行,从而大幅降低层间星际链路

的重建导致的网络拓扑的重构。

根据MEO卫星选择方法的不同,提出的3种策略分别称为基于集中重建的最近距离策略、基于集中重建的最长连接时间策略和基于集中重建的最多资源策略,分别简称为集中的距离策略、集中的时间策略和集中的资源策略。

(1)集中的距离策略:在网络拓扑重构时,每颗LEO卫星独立寻找距离最近的MEO卫星建立ILISL,并计算新建立的ILISL能够维持的时间,从而得到该ILISL的下一理论重建时间。为了在相同时间进行ILISL重建,需将所有ILISL的下一实际重建时间设置为相同的时间值。显然,为了保证所有ILISL不会中断,实际重建时间设置为所有ILISL下一理论重建时间的最小值。

(2)集中的时间策略:在网络拓扑重构时,每颗LEO卫星独立寻找能够提供最长连接时间的MEO卫星建立ILISL。所有ILISL的下一实际重建时间相同,是所有ILISL下一理论重建时间的最小值。

(3)集中的资源策略:在网络拓扑重构时,每颗LEO卫星与具有最多空闲资源的可视MEO卫星建立ILISL。所有ILISL的下一实际重建时间相同,是所有ILISL下一理论重建时间的最小值。

由于LEO和MEO卫星的运行是有规律的、确定的和周期性的,因此所有LEO卫星和MEO卫星都能够准确计算自己的瞬时坐标位置。通过地面测控站的周期性测控,容易实现全网卫星时钟在允许误差范围内的统一,从而可以保证各卫星在ILISL重建时间计算上的一致性。在实现时,系统的每颗卫星都有一个ILISL重建控制模块。LEO卫星的ILISL重建控制模块根据所有卫星的瞬时位置和采用的ILISL重建策略,计算每条ILISL的理论重建时间,选择下一次接入的MEO卫星。在比较所有计算出的理论重建时间后,将其最小值作为该LEO卫星关联的ILISL的实际重建时间并存储下来。当到达实际重建时间时,根据选择的MEO卫星调整ILISL天线的指向,与新的MEO卫星建立新的LIISL,并重新计算下一实际重建时间。同样地,MEO卫星的LIISL重建控制模块能够通过计算,通知MEO卫星将有哪些LEO卫星在何时接入,从而使得MEO卫星提前做好准备。由于所有卫星的位置信息和时钟信息都是统一,各ILISL重建控制模块计算出来的实际重建时间均是相同的,这就确保了统一更新的实现。

集中重建策略需要每颗LEO卫星计算所有ILISL的理论重建时间,而非集中策略中每颗LEO卫星仅需计算一条ILISL的重建时间,因此采用集中重建策略时,每颗LEO卫星的计算量会略有增加。

4 性能的数值仿真比较

4.1 性能指标

本文从网络拓扑结构的稳定性,ILISL的稳定性和系统资源利用率3个方面,使用6个性能指标对不同ILISL建立策

略的性能差异进行了分析和比较。这6个性能指标是:

(1)网络拓扑重构次数:任何时间点上,只要存在任意的一条ILISL的重建,就会导致整个网络拓扑的重构,此时网络拓扑重构次数增加一次。该指标说明了在给定时间内网络拓扑的稳定程度,数值越小网络的稳定性越高。

(2)ILISL重建次数:LEO卫星拆除与当前MEO卫星间的ILISL,并与重新选定的另一颗MEO建立ILISL的过程称为ILISL的重建。如果按ILISL建立策略重新选择的MEO卫星与当前MEO卫星相同,则ILISL重建次数不增加。显然,对单颗LEO卫星而言,在给定时间内的ILISL重建次数越少越好。

(3)ILISL平均长度:每颗LEO卫星的ILISL在给定时间内的平均长度。由于星间通信时消耗的功率与ILISL长度的平方成正比关系,因此ILISL平均长度越小越好。

(4)LEO星座资源闲置率:在ILISL重建时,如果选择接入到同一颗MEO卫星的LEO卫星过多,导致MEO卫星的总负载超过其负载能力时,LEO卫星必须丢弃部分负载,从而导致LEO卫星资源的闲置。在某一仿真时刻,如果与某些LEO卫星相关的ILISL发生了重建并产生资源闲置,则将时刻所有LEO卫星的闲置资源之和与LEO星座总资源之比称为LEO星座的瞬时资源闲置率,将瞬时资源闲置率的平均值称为LEO星座资源闲置率。该指标表征了LEO星座资源的使用情况。显然,MEO卫星选择策略的均匀性越强,LEO卫星的资源闲置率越小,LEO星座的资源利用率越高。

(5)MEO卫星的平均负载率:各MEO卫星在给定时间内的平均资源占用情况。该指标从MEO卫星的角度表征了不同ILISL建立策略MEO卫星选择的均匀性。显然,如果各MEO卫星的平均负载率相差越小,ILISL建立策略在MEO卫星选择时的均匀性越强。

(6)MEO星座的资源利用率:整个MEO星座在给定时间内的平均资源占用情况。该指标从总体角度说明了系统资源利用率特性。显然,MEO卫星选择策略的均匀性越强,MEO卫星的负载越均匀,MEO星座的资源利用率越高。

4.2 仿真参数设置

仿真总时间为一个太阳日(86400s)。考虑到LEO卫星与MEO卫星间的可视时间较长(几十到上百分钟),ILISL的重建频率不会很大,将仿真时间步长设定为10s。因此共仿真了8640个时间点。

假设每颗LEO卫星只能与一颗MEO卫星建立一条ILISL,而每颗MEO卫星可以同时与多颗LEO卫星建立ILISL。

仿真中,针对最坏情况下的系统资源利用问题进行了分析,即每颗LEO卫星满载荷的情况。每颗LEO卫星满载荷时具有相同的归一化业务容量,每颗MEO卫星的容量相同,是单颗LEO卫星容量的倍数。

仿真中采用的MEO星座为NewICO系统,LEO星座为Globalstar系统。LEO和MEO星座参数如表1。

表1 LEO/MEO星座参数

	中轨星座	低轨Delta星座
系统名称	NewICO	Globalstar
轨道高度(km)	10355	1414
轨道倾角(°)	45	52
卫星数量	10	48
轨道面数量	2	8
ILISL数量/星	多条	1

4.3 仿真结果和分析

图4给出了Globalstar/NewICO双层卫星网络中各ILISL建立策略的性能特性。图4(a)给出了网络拓扑重构次数随时间增长的特性;图4(b)给出了一个太阳日内各LEO卫星总的ILISL重建次数;图4(c)给出了一个太阳日内各ILISL的平均长度;图4(d)给出了低轨星座的资源利用率随单颗中轨卫星容量的变化情况;图4(e)给出了各中轨卫星的平均负载;图4(f)给出了中轨星座的资源利用率随单颗中轨卫星容量的变化情况。

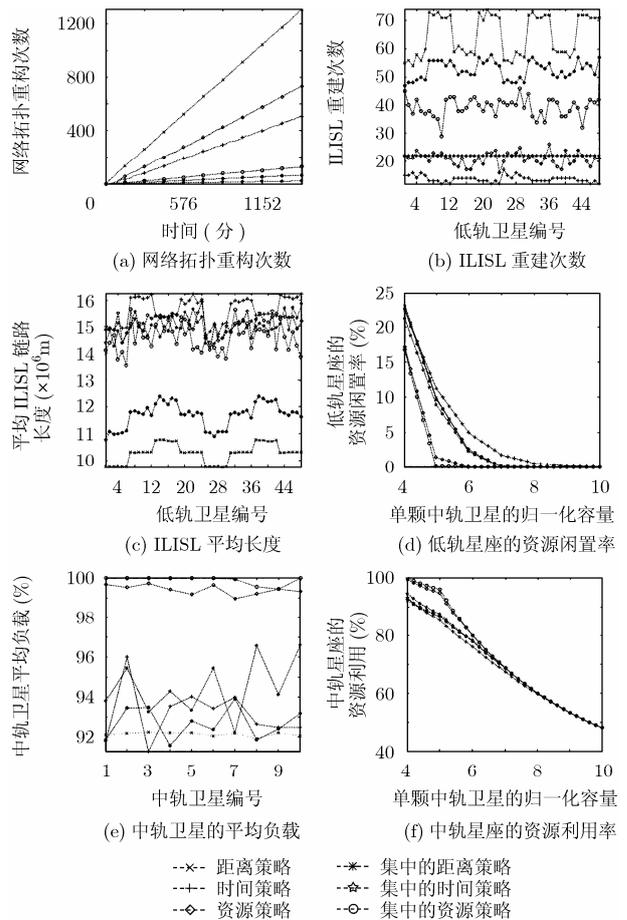


图4 LEO/MEO 双层卫星网络中 ILISL 建立策略的性能特性

通过对图4的分析可以得到如下结论:

(1)采用基于集中重建的ILISL建立策略时,LEO/MEO

双层卫星网络的拓扑重构次数较采用原有策略时有很大程度的降低,大幅度改善了网络的拓扑稳定性。采用集中的时间策略时,网络的拓扑稳定性最好,网络拓扑重构次数较采用时间策略时降低了约 22 倍;采用距离策略的网络拓扑稳定性最差,其网络拓扑重构次数约是采用集中的距离策略时的 21 倍;采用集中的资源策略时,网络的拓扑稳定性改善程度最小,网络拓扑重构次数仅比采用资源策略时降低约 5 倍。

(2)通过强制某些 LEO 卫星提前进行 ILISL 的重建,集中的时间策略和集中的资源策略获得了比原有策略更好的网络拓扑稳定性,但该方法缩短了部分 LEO 卫星与 MEO 卫星的连接时间,导致每颗 LEO 卫星的 ILISL 重建次数增加。显然,以每颗 LEO 卫星 ILISL 重建次数增大约 1 倍来换取网络拓扑重构次数的大幅度减少,这样的代价是可接受的。

(3)虽然基于集中重建的 ILISL 建立策略都强制所有 LEO 卫星的 ILISL 在相同时间进行重建,但并不保证所有 LEO 卫星的 ILISL 重建次数相同。因为在重建时,重新选择的 MEO 卫星可能仍是当前连接的 MEO 卫星,所以 ILISL 并没有真正重建,重建次数不会增加。

(4)由于在 MEO 卫星选择时考虑了距离特性,距离策略和集中的距离策略的 ILISL 平均长度特性明显优于其他 4 种策略;而时间策略、资源策略、集中的时间策略和集中的资源策略的 ILISL 平均长度特性几乎相当,由集中重建特性带来的 ILISL 平均长度特性的改变较小。

(5)图 4(d), 4(e)和 4(f)从不同的角度反映了各 ILISL 建立策略在 MEO 卫星选择时的均匀性。容易理解,在每颗 LEO 卫星满负载的情况下,ILISL 建立策略在 MEO 卫星选择时的均匀性越强,各 MEO 卫星的负载差异就越小,LEO 星座和 MEO 星座的资源利用率就越高。由图可见,由于资源策略和集中的资源策略在 MEO 卫星选择时考虑了 MEO 卫星的负载特性,因此这两种策略在单颗 MEO 卫星容量较小时的低轨星座资源闲置率、中轨星座资源利用率和 MEO 卫星的平均负载性能明显优于其他四种策略。距离策略、集中的距离策略和集中的时间策略具有几乎相同的性能,而时间策略的性能最差。当单颗 MEO 卫星的容量非常大时,各策略在 MEO 卫星选择时的非均匀性就被屏蔽了,因此各策略的低轨星座资源闲置率和中轨星座资源利用率相同。

综上可知,基于集中重建的 ILISL 建立策略能够以可接受的代价,降低 LEO/MEO 双层卫星网络的拓扑重构次数,改善双层网络的拓扑稳定性。

5 结束语

从改善 LEO/MEO 双层卫星网络拓扑结构稳定性角度出发,在对已有 ILISL 建立策略进行分析的基础上,提出了

3 种新的基于集中重建的 ILISL 建立策略。通过仿真分析可以看出,本文提出的 ILISL 建立策略通过强制所有 ILISL 在同一时刻进行重建,能够以可接受的代价,大幅度降低网络拓扑的重构次数,改善网络拓扑结构的稳定性。

参考文献

- [1] 胡剑浩,李涛,吴诗其. 具有星际链路的LEO&MEO双层卫星网络路由策略研究. 电子学报, 2000, 28(4): 31-35.
- [2] Lee J and Kang S. Satellite over satellite (SOS) network: a novel architecture for satellite network. INFOCOM'2000, Tel-Aviv Israel, 26-30 March, 2000: 315-321.
- [3] Akyildiz I F, Ekici E, and Bender M D. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2002, 10(3): 411-424.
- [4] Akyildiz I F, Ekici E, and Yue G. A distributed multicast routing scheme for multi-Layered satellite IP networks. *Wireless Networks*, 2003, 9(5): 535-544.
- [5] Yuan Zhen, Zhang Jun, and Liu Zhongkan. A simplified routing and simulating scheme for the LEO/MEO two-layered satellite network. 2005 Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR'2005), Hong Kong, China, 12-14 May 2005: 525-529.
- [6] Papapetrou E, Karapantazis S, Dimitriadis G, and Pavlidou F. Satellite handover techniques for LEO networks. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2004, 22(2): 231-245.
- [7] Papapetrou E and Pavildou F. QoS handover management in LEO/MEO satellite systems. *Wireless Personal Communications*, 2003, 24(2): 189-204.
- [8] Leo M and Luglio M. Intersegment handover performance in integrated terrestrial-satellite systems. *International Journal of Satellite Communications*, 2002, 20(6): 417-434.
- [9] Kwom Y H, Yun J Y, and Sung D K. Satellite selection scheme for reducing handover attempts in LEO satellite communication systems. *International Journal of Satellite Communications*, 1998, 16(4): 197-208.
- [10] Widiawan A K, Sammut A and Evans B G. Inter-beam handover in LEO satellite systems. *International Journal of Satellite Communications*, 1998, 16(5): 209-217.
- [11] Werner M, Frings J, Wauquiez F, and Maral G. Topological design, routing and capacity dimensioning for ISL networks in broadband LEO satellite systems. *International Journal of Satellite Communications*, 2001, 19(6): 499-527.

吴廷勇: 男, 1975年生, 讲师、博士生, 研究方向为卫星移动通信和卫星通信网络。

吴诗其: 男, 1938年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和个人通信。