

# LEO&GEO 双层卫星网络的动态路由技术

姚 晔<sup>1,2,3</sup>, 梁旭文<sup>1,2</sup>

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于低地球轨道和静止地球轨道(low Earth orbit & geo-synchronous Earth orbit, LEO&GEO) 双层卫星网络结构, 对其覆盖特性和星间链路(inter-satellite-link, ISL) 特性进行了仿真分析。提出了分层分簇的管理方法, 只有主簇头与 GEO 卫星有连接关系, 简化了互联关系的复杂性。在该卫星组网结构中, 利用星座网络拓扑的特点, 提出一种负载均衡的动态路由算法, 综合考虑了路径时延和 ISL 链路负载。与单层卫星网络相比, 双层卫星网络可以更加均匀地分配通信量, 仅在低层 LEO 卫星路由跳数超出一定阈值或者卫星网络链路利用率超过某个门限范围时, 才利用上层 GEO 卫星进行中转传输, 仿真结果表明, 所提路由算法可以实现更低的时延、延迟抖动以及更优的服务质量性能。

**关键词:** 低地球轨道和静地球轨道星座; 分层分簇; 负载均衡; 链路利用率; 拥塞避免; 触发更新

**中图分类号:** TN 927

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.09.27

## Dynamic routing technique based on LEO&GEO double-layered satellite network

YAO Ye<sup>1,2,3</sup>, LIANG Xu-wen<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Engineering Center of Micro-Satellite, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The coverage and inter-satellite-link (ISL) performances of low earth orbit & geo-synchronous Earth orbit (LEO&GEO) double-layered satellite network are first introduced in detail. Then layering and clustering level management is proposed, which can simplify the ISL connectivity because just the head satellite of a cluster has the connectivity to GEO satellite. Under the network model, a dynamic routing algorithm which considers path delay and ISL link load is proposed. Compared with single layer satellite networks, multilayer satellite networks distribute traffic more evenly and they can distribute traffic through GEO satellite just when the route hops exceed the threshold or the network link utility exceeds the threshold. Simulation results show that the proposed routing algorithm results in low delay, small delay jitter and provides excellent performance for the quality of service.

**Keywords:** low Earth orbit & geo-synchronous Earth orbit (LEO&GEO) constellation; layering level and clustering level management; load balancing; link utilization; congestion avoidance; event-triggered update

## 0 引言

由卫星通信的发展趋势可以看出, 卫星通信逐步由单层卫星组网方式发展到多层卫星组网方式。由相同轨道高度的卫星组成的星座为单层卫星组网方式, 由两个或多个不同轨道高度上的卫星组成的星座称为多层卫星组网方式。

文献[1]最早提出构建双层卫星网络(double layered

satellite constellation, DLSC) 的设想, 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。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 ISL 和在自己“视距”内的所有 LEO 卫星相连。文献[1]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。

文献[2-3]提出了两层卫星网络路由协议(two-layered satellite routing, TLSR),系统星座由16颗MEO卫星和63颗LEO卫星组成,与DLSC结构类似。

文献[4]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,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,灵活地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(inter-layer-link, IIL)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IIL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卫星或静止地球轨道(geo-synchronous Earth orbit, 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ISL进行具体描述。

文献[5]提出比双层卫星网络更复杂的3层卫星网络结构MLSN(multi-layered satellite network)。MLSN结构由GEO、MEO和LEO组成,其中同层卫星之间和不同层卫星之间均具有ISL。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。

在多层卫星组网结构中,按照网络的层次划分,可以分为两层网络结构和3层网络结构,两层网络结构包括:GEO/LEO、MEO/LEO、GEO/MEO,3层网络结构包括:GEO/MEO/LEO。GEO/MEO/LEO。3层星座网络建设复杂、成本较高、实现难度大,MEO/LEO双层星座网络较3层网络结构简单,但为了达到全球覆盖,所需要的MEO卫星数目较多,并且MEO卫星与LEO卫星之间存在高速相对运动关系,导致层间星间链路建立和维护非常困难,带来了系统成本的增加和系统实施难度的加大;相比较而言,结合了GEO卫星广域覆盖的特点以及LEO卫星优点(传输时延短、可以支持手持终端业务)的GEO/LEO双层卫星网络受到了更多关注,成为构建多层卫星网络的一种新思路<sup>[6-8]</sup>。

卫星网络的一个关键是构建卫星网络路由算法,以适应动态的卫星网络。在文献[2-4]中均提出了面向连接的

路由协议,在文献[2-3]中提出了双层卫星网络路由(two-layered satellite routing, TLSR)协议,在SoS<sup>[4]</sup>结构中提出了多层基于服务质量(quality of service, QoS)保证的路由协议(hierarchical quality of service routing protocol, HQRP)。这两种路由协议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,基于因特网协议(Internet protocol, IP)路由的包交换路由策略<sup>[5,7-12]</sup>逐渐应用到卫星网络中。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<sup>[13-18]</sup>对于卫星网络来说是必须考虑的。其中文献[16-18]着重介绍了如何对卫星网络中的流量进行统一调度,实现网络负载的均衡传输。文献[16]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,在人口多、经济发达的地区意味着网络负载业务就比较多,相反地,人口稀少、经济落后的地区则意味着网络业务负载量就比较少。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[17-18]在文献[16]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。

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,本文采用由GEO卫星和LEO卫星组成的混合轨道星座作为研究对象,对其网络拓扑结构和组网特性进行分析,提出一种基于负载均衡的动态路由算法,并对其进行了仿真分析。

## 1 LEO&GEO 双层卫星网络模型

在此系统结构中,采用3颗静止卫星和低轨星座组成系统空间段。系统星座参数如表1所示。

表1 LEO&GEO 卫星通信网络参数

卫星轨道	卫星数/颗	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	轨道周期/s	轨道数	轨道内 ISL/(条·颗 <sup>-1</sup> )	轨道间 ISL/(条·颗 <sup>-1</sup> )	层间链路状态	同层链路状态	最小通信仰角/(°)
GEO	3	35 786	0	86 164	1	1	0	非永久性	永久性	10
LEO	24	1 450	30	6 840	3	2	2	非永久性	永久性	10

在此系统组网模式下,高轨星分别位于东经0°、120°、240°,可以覆盖全球,低轨星座支持用户接入,高轨卫星作为中继星在对低轨卫星可见时,为用户提供数据中继服务,低轨星座每

颗卫星具有4条ISL,两条轨内ISL,两条轨道间ISL,低轨卫星与静止星之间有层间链路。低轨星在即将进入“中继区”时,可及时调整自身天线的方位角和仰角,以对准静止星。

## 2 网络特性分析

### 2.1 覆盖特性分析

(1) 单层 LEO 卫星星座覆盖特性分析

24 星低轨方案地面站仰角为 10° 的情况下的通信时间、覆盖性能和多重覆盖性随纬度变化的情况,如图 1~图 3 所示。

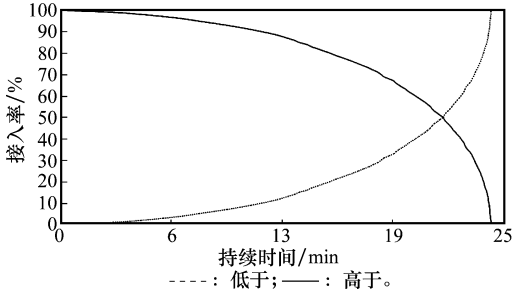


图 1 在全球区域范围内的通信时间变化情况

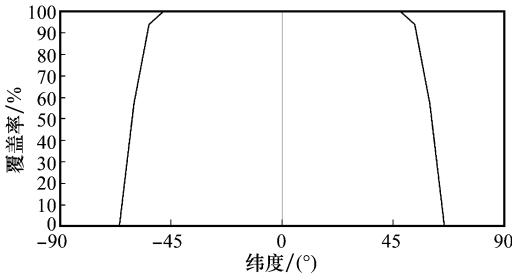


图 2 单重覆盖率随地理纬度变化

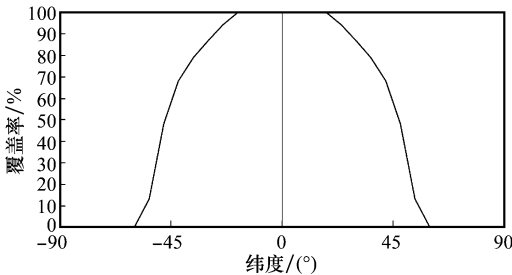


图 3 双重覆盖率随地理纬度变化

图 1~图 3 及相关的定量计算结果表明,由 24 颗低轨卫星(3 个轨道面,轨道倾角为 30°,轨道高度为 1 450 km)所构成的星座,其最大通信时间为 1 440 s,最小通信时间为 0 s; -66°~66° 范围内可以达到单重覆盖,在 -45°~45° 纬度带内,可以 100% 单重覆盖; -23°~23° 纬度带内,为双星或者多星覆盖。

图 4 仿真了在叠加 3 颗 GEO 卫星后双层星座的覆盖率随地理纬度的变化情况。通过图 2 与图 4 的对比可以发现,单层卫星网络仅能覆盖的区域范围为 -66°~66°,通过叠加 GEO 卫星,可以达到对 -84°~84° 区域的覆盖,可以实现除南北极小部分区域外的全球覆盖。双层卫星网络不仅可以扩大网络的覆盖范围,而且可以增大网络的业务容量,在网络业务量较大的情况下,通过选用上层卫星来减轻 LEO 层卫星的负担,路径选择更加灵活,替换链路多,网络抗毁性

强,业务 QoS 可以得到保证。

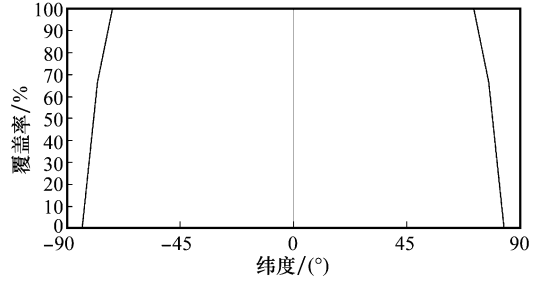


图 4 3 颗 GEO 卫星对全球的单重覆盖率随地理纬度变化

### 2.2 ISL 特性分析

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 ISL 特性的分析,通常用 ISL 的俯仰角、方位角以及 ISL 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。ISL 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、俯仰角以及星间链路的变化情况进行了仿真。

低轨道同层间 ISL 在同轨面和异轨面之间建立 ISL,其连接关系是固定的,同轨 ISL 距离为 5 991 km,异轨 ISL 距离在 4 900~6 800 km 变化。近似认为各 ISL 传播时延相等,约为 20 ms,方位角在 0°~360° 跳变。

在不同层间的 ISL 的变化情况如图 5 所示,星间距离在 30 000~50 000 km 变化,其通信时延为 100~167 ms。如此远的通信距离造成了很长的延迟,给 ISL 建链也带来了一定难度。

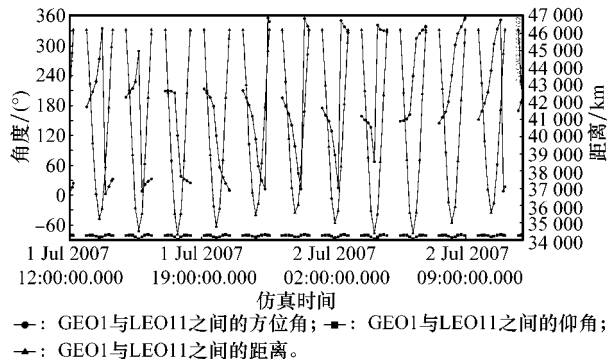


图 5 GEO1 与 LEO11 的星间链路俯仰角、方位角和星间距离变化示意图

图 6 仿真了 GEO 卫星与下层 LEO 卫星之间的连接变化情况。以 GEO1 与 LEO11 为例进行仿真,GEO1 与 LEO11 的连接时间为:最短连接时间为 4 573 s,最长连接时间为 5 101 s,平均连接时间为 4 871 s。GEO1 与 LEO15 的连

接时间为:最短连接时间为 778 s,最长连接时间为 5 091 s,平均连接时间为 4 305 s。经过一天的仿真可以看出:GEO1 与低轨道面 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,可以为动态路由算法的提出作为支撑。

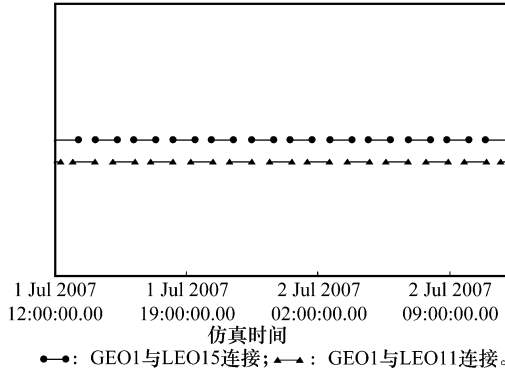


图 6 GEO1 与 LEO11、LEO15 的链接关系示意图

### 3 基于分层分簇的动态路由算法

#### 3.1 分层分簇的管理方法

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 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,为了实现数据的可靠传输,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。

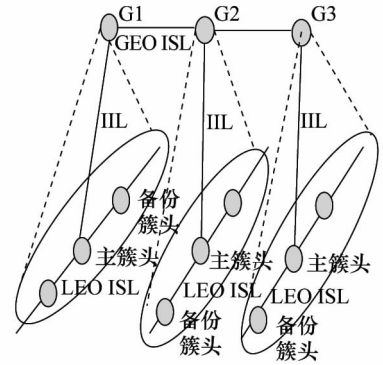
针对本文所提出的卫星网络模型,由于 GEO 卫星为 3 颗,LEO 轨道面也为 3 个,因此考虑每个轨道面对应一个簇,每个簇分别对应上层的一颗 GEO 卫星,如 GEO 卫星 G1,对应所管理的簇为低层 LEO 星座中的轨道面 1 的所有卫星,依次类推,GEO 卫星 G2 对应管理轨道面 2 的所有低层 LEO 卫星,GEO 卫星 G3 对应管理轨道面 3 的所有 LEO 卫星。那么,与之相对应,在簇头的选取时,应选取与相对应的 GEO 卫星覆盖时间最长的 LEO 卫星。

#### 3.2 静态路由表的计算

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:

- (1) 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;
  - (2) 地面信关站与 GEO 卫星之间有直接链路;
  - (3) 地面用户通过最小仰角原则选择接入 LEO 卫星。
- 双层卫星网络分层分簇划分示意图如图 7 所示。



G1 卫星管理簇 G2 卫星管理簇 G3 卫星管理簇

图 7 双层卫星网络分层分簇划分示意图

本文所提出的路由算法的基本原则:

对于源目的用户卫星处于同一个 LEO 卫星簇内的卫星,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;而对于远距离的用户,即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,则选择在 LEO 层或通过上层 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在 GEO 层传输还是在 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分群分簇的基于负载均衡的双层卫星网络动态路由算法。本路由算法首先要完成原始路由表的计算。

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,可以事先计算。因此,我们可以根据 3 颗 GEO 卫星对下层 LEO 卫星的连接关系,将卫星运行的周期离散化为  $N$  个时间间隔,在每个时间间隔内卫星的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 卫星的连接时间所决定。其计算步骤如下所示:

#### 步骤 1 LEO 卫星簇内卫星路由表的计算

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可以事先计算,根据最小跳数规则,由 LEO 卫星簇头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。

步骤 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,将路由表分发到各颗卫星。

步骤 3 LEO 簇间路由表的计算

簇间路由表根据简化设计的准则、最小跳数准则计算出 LEO 卫星簇间路由表,然后发给给各卫星。

步骤 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。

步骤 5 GEO 卫星层间拓扑表的查找

数据传输时,分为 3 种情况:簇内路由、簇间路由和层间路由。

第 1 种情况 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簇内路由表可以快速将数据送达目的卫星。

第 2 种情况 簇间路由

对于簇间路由表的计算,由于不同簇之间是通过异轨 ISL 连接的,而异轨 ISL 的连接关系是时变的,ISL 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 ISL 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。

第 3 种情况 层间路由

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同层卫星之间传输时时延增加,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载到目的卫星所在的簇头。其路由策略示意图如图 8 所示。

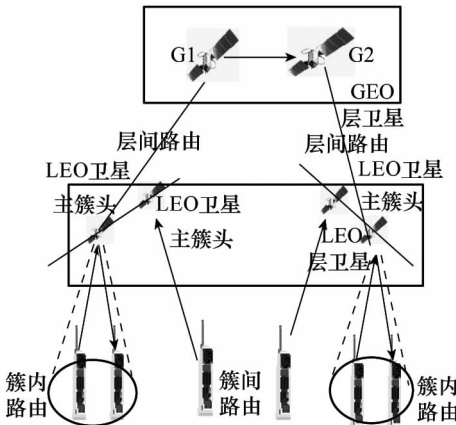


图 8 LEO&GEO 双层卫星网络结构的路由策略示意图

3.3 路由表的触发更新

由于 ISL 流量负载的动态变化,原始路由表计算之后,可能导致 LEO 卫星的 ISL 链路或 LEO 卫星与 GEO 卫星之间的层间 ISL 拥塞,因此需要采用一定的策略避免拥塞,达到业务均衡传输。

事先定义链路的拥塞门限为链路容量的  $\lambda\%$ ,如果链路缓冲占用情况超过拥塞门限,则认为该链路即将发生拥塞。对于层内 ISL 和不同层间 ISL,拥塞门限的取值不同,根据卫星网络的流量负载情况进行动态配置。在数据转发时,如果卫星监测到某条链路队列的分组数超过拥塞门限,就查找路由表,将分组转发至备选下一跳方向。对备选路径的下一跳出口缓冲队列进行判定,如果也超过了设置的拥塞门限,则进行路由表的触发更新。

3.4 算法描述

综上所述,双层卫星网络的动态路由策略计算步骤如图 9 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 LEO 层路由跳数大于门限值时,就将该业务转到 GEO 层传输。该策略根据卫星网络特点对业务进行区分处理,综合考虑了业务 QoS 特性和 ISL 带宽占用状况,选择的最优路径灵活可靠。

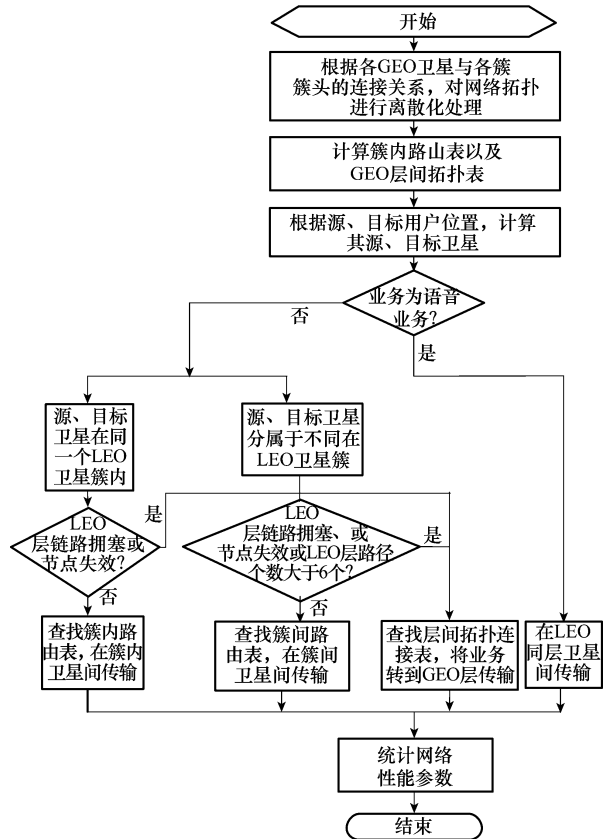


图 9 双层卫星网络路由策略计算步骤示意图

### 4 路由算法分析与仿真

在进行路由算法的仿真时,需要设定的参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设定

仿真参数	ISL 信道容量/(kbit/s)	网络总通信量/(kbit/s)	语音业务包平均长度/byte	数据业务包平均长度/byte	仿真时间/min	ISL 缓冲区/kbits	ISL 门限
数值	1 000~8 000	5 000~100 000	200	600	114/360	120	7

如图 10 所示,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。

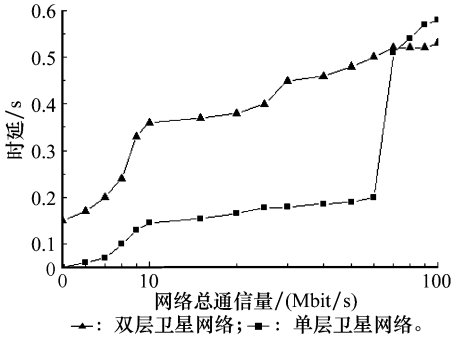


图 10 数据业务的平均端到端延迟

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 4 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  $D_P$ 。

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

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,再除以传输速度即可。

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<sup>[9]</sup>,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  $\mu$  和  $\nu$ 。当系统中已有超过  $\lambda\%$  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

$$\rho = \frac{\mu}{\nu} \quad (2)$$

数据包的平均处理和交换时延为

$$W = \frac{1}{\nu(1-\rho)} - \frac{m\rho^m}{\nu(1-\rho^m)} \quad (3)$$

根据上述的计算以及文献[9]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 25 ms 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 5 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 IIL 时延  $D_{IIL}$ 。

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

式中,  $D_{IIL}$  为高轨卫星的往返时延,根据第 2.2 节的分析,LEO 卫星到高轨卫星的单程通信时延为 100~167 ms,因此,此处取往返时延近似为 260 ms。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,拥塞的判决条件如第 3.3 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,而此时

$$T_{total} > T'_{total} \quad (5)$$

将式(1)和式(4)分别代入式(5),并近似认为 ISL 传输时延为 25 ms,排队和等待时延也为一条 IST 的时延,即 25 ms,不同层间的 IIL 传输时延近似认为 130 ms 左右,通过计算可以得出,  $N > 6$  时式(5)成立。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,并显现出双层卫星网络的优势。

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 IIL 即可完成数据传输,这时双层卫星网络的优势开始显现。

图 11 和图 12 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 11 中设定网络总通信量为 50 000 kbit/s,图 12 中设定 ISL 信道容量为 3 000 kbit/s。

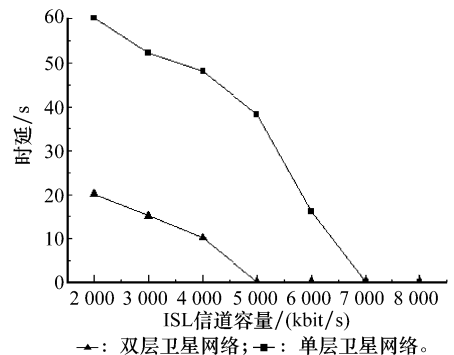


图 11 丢包率随 ISL 信道链路容量变化情况

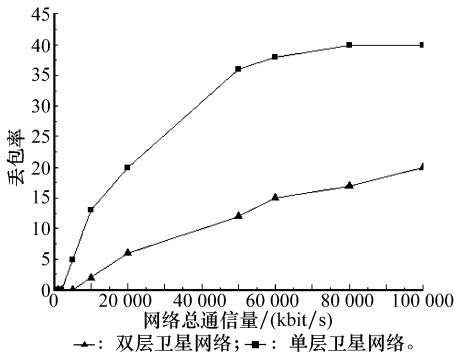


图 12 丢包率随网络通信量变化情况

由图 11 和图 12 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 13 和图 14 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 3 000 kbit/s,网络总通信量为 50 000 kbit/s,以 LEO11 为例进行仿真,图 13 仿真了在 LEO 单层卫星网络下,与 LEO11 相连的 4 颗卫星的 4 条 IST 以及 LEO 卫星层平均的负载变化情况;图 14 仿真了同样的 4 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,通过比较可以看出,双层卫星网络的动态路由策略较单层卫星网络对网络负载起到了很好的均衡作用。

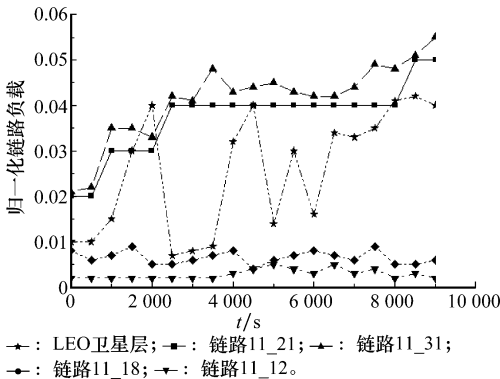


图 13 LEO11、LEO 卫星层归一化链路负载随时间变化情况示意图

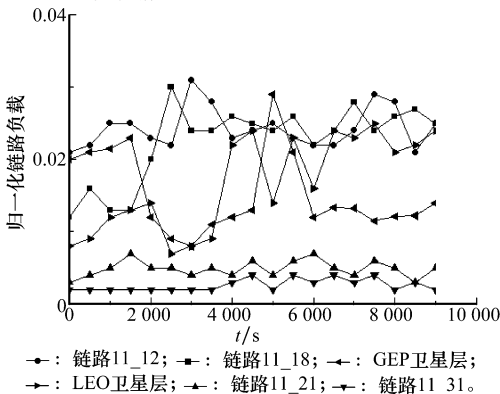


图 14 LEO11、LEO 卫星层、GEO 卫星层归一化链路负载随时间变化情况示意图

### 5 结 论

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、IIL 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、端到端链路时延和网络归一化链路负载。

### 参考文献:

- [1] Kimura K, Inagaki K. Double layered inclined orbit constellation for advanced satellite communications network[J]. *Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) Trans. on Communication*, 1997: 15 - 23.
- [2] Hu J H, Li T, Wu S Q. Research of LEO&MEO double-layered satellite network with intersatellite links[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(4): 31 - 35. (胡剑浩, 李涛, 吴诗其. 具有星间链路的 LEO&MEO 双层卫星网络路由策略研究[J]. 电子学报, 2000, 28 (4): 31 - 35.)
- [3] Hu J H, Yeung K L, Li T. Routing and re-routing in a LEO/GEO two-tier mobile satellite communications system with intersatellite links[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, 2000: 143 - 150.
- [4] Lee J W, Kim T W, Kim D W, et al, Satellite over satellite (SOS) network; a novel concept of hierarchical architecture and routing in satellite network[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications*, 2000: 315 - 320.
- [5] Akyildiz I F, Ekici E, Bender M D. MLSR: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. *IEEE Trans. on Networking*, 2002, 10(3): 411 - 424.
- [6] Durrresi A, Dash D, Anderson B L, et al. Routing of real-time traffic in a transformational communications architecture[C]// *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, 2004: 18 - 27.
- [7] Fei L, Zhian Y, Fuchun S. A multi-objective optimization based QoS routing algorithm for multi-layered satellite IP networks [J]. *IEEE Trans. on Networking*, 2010, 10(3): 31 - 37.
- [8] Dash D, Durrresi A, Jain R. Routing of VoIP traffic in multi-layered Satellite Networks[C]// *Proc. of the SPIE*, 2003: 65-75.
- [9] Li H, Gu X M. Adaptive routing measurement in multi-layered satellite communication network[J]. *Journal of Communications*, 2006, 27(8): 119 - 128. (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.)
- [10] Liang J, Zhang J W, Xiao N. Research and simulation on an autonomous routing algorithm for GEO-LEO satellite networks[C] //

- Proc. of the IEEE 4th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2011;657 – 660.
- [11] Pasquale P, Gianluca A. Routing and scalability issues for multi-layered satellite-HAPS networks [C] // *Proc. of the IEEE 2nd International Conference on Advances in Satellite and Space Communications*, 2010: 64 – 69.
- [12] Suzan B, Gurkan G, Faith A. Adaptive routing protocol for QoS in two-layered satellite IP networks [C] // *Proc. of the 2nd International Workshop in Satellite and Space Communications*, 2006;63 – 67.
- [13] Taleb T, Fadlullah Z M, Takahashi T, et al. Tailoring ELB for multi-layered satellite networks [C] // *Proc. of the IEEE International Conference Communication*, 2009;5109 – 5113.
- [14] Hiroki N, Yuta T, Nei K, et al. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks [J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2012, 23(1): 21 – 30.
- [15] Long F, Xiong N, Vasilakos A V, et al. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks [J]. *Wireless Network*, 2009, 16(6): 1657 – 1673.
- [16] Kudoh D, Kashibuchi K, Nishiyama H, et al. Load balancing method based on congestion prediction for IP LEO satellite networks [J]. *Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) Trans. on Communication*, 2009, 29(11): 3326 – 3334.
- [17] Tarik T, Daisuke M, Abbas J, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities [J]. *IEEE Trans. on Networking*, 2009, 17(1): 187 – 192.
- [18] Hiroki N, Daigo K, Naoto K. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(11): 120 – 130.

## 作者简介:

姚 晔(1980 -), 女, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为卫星网络路由交换技术。

E-mail: ye.yao@mail.sim.ac.cn

梁旭文(1969 -), 男, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究方向为卫星通信。

E-mail: liangxuwen@mail.sim.ac.cn