

基于 GEO/LEO 卫星通信网的路由策略研究

王莹,胡修林,胡伟圣,曾喻江

WANG Ying, HU Xiu-lin, HU Wei-sheng, ZENG Yu-jiang

华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉 430074

Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

E-mail: wangy_hust@163.com

WANG Ying, HU Xiu-lin, HU Wei-sheng, et al. Research on routing strategies of satellite communication networks based on GEO/LEO constellations. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(34): 153-155.

Abstract: The architecture of satellite communication networks based on GEO/LEO constellations is presented considering the optimization of network management. Management subnet and service subnet are separate physically in this architecture, which makes centralized routing strategy more adapted than that in terrestrial networks. In order to strengthen the reliability of the architecture, spare routing strategy decreasing computation load is constituted making use of the characteristics of satellites' regular movement and regular array of Inter Satellite Links (ISL). At last the performances of two routing strategies are validated through simulations.

Key words: satellite communication; routing; network management

摘要:从优化卫星网络管理的角度,提出了 GEO/LEO 卫星通信网络体系结构,该结构将管理子网与业务子网在物理上相互分离,体现了与地面网络不同的集中式路由策略的优势,同时利用卫星运行的规律性和星际链路分布的规则性,制定了极大降低运算量的备用路由策略,保证了 GEO/LEO 卫星网络体系结构的可靠性,通过仿真验证了两种路由策略的性能。

关键词:卫星通信;路由;网络管理

文章编号:1002-8331(2007)34-0153-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP393

1 引言

卫星通信由于具有覆盖面积大、接入速度快、易于实现广播和多播等特性,在通信发展过程中日益受到人们的重视。宽带移动多媒体通信业务的迫切需求和卫星设备制造技术的提高使卫星通信从单星、纯转发式的工作模式向多星、具备星上处理能力的网络模式迈进^[1]。与同步轨道(GEO)卫星相比,采用非同步轨道卫星(中轨道 MEO 卫星、低轨道 LEO 卫星)具有较小的传播时延和较低的用户终端 EIRP 要求,因此包含多颗非同步轨道卫星、具备星上处理能力和星际链路成为目前卫星通信网络设计方案的共同特点。由于空间立体性的固有特征,处于不同轨道的卫星组成的网络具有不同的优势,混合轨道卫星网络成为卫星通信领域研究的热点,如 GEO/MEO/LEO 卫星网络^[2]和 MEO/LEO 卫星网络^[3,4]。在已有的混合轨道卫星网络方案中,大多从业务互补和覆盖区域互补的角度进行设计,所有卫星可同时充当业务的接入节点和转发节点,不同层次的卫星之间、同层的不同卫星之间均具有星际链路,不同层次的业务流量管理信息通过被选为域管理者的卫星的星际链路传输,因此动态的路由算法收敛较慢,并且,采用的分布式管理方法不能快速及时地发现网络中出现故障的节点。

本文从优化管理的角度利用空间立体性的特点,提出 GEO/LEO 混合轨道卫星网络体系结构,将管理子网与业务子网进行物理分离,充分体现了集中式管理的优势,基于此体系结构研究混合轨道卫星网络中的路由策略,制定卫星网络拓扑可变下的动态路由算法,最后通过仿真验证路由策略的性能。

2 GEO/LEO 卫星网络体系结构

GEO/LEO 混合轨道卫星网络是一种高层、低层和地面三层结构的通信网络,如图 1 所示。GEO 卫星星座组成管理子网,

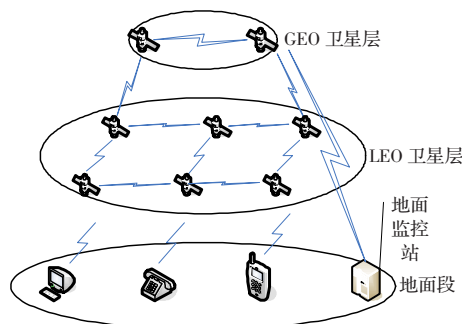


图1 GEO/LEO 卫星网络体系结构

基金项目:国家部委基金资助项目。

作者简介:王莹(1980-),女,博士研究生,讲师,主要研究领域为卫星通信;胡修林(1945-),男,教授,博导,主要研究领域为卫星通信、计算机网络;胡伟圣(1980-),男,硕士,主要研究领域为卫星通信;曾喻江(1975-),男,博士,主要研究领域为卫星通信系统。

LEO 卫星星座组成业务传输子网,地面监控站对整个卫星移动通信网进行监视和控制。

GEO 卫星星座由若干颗 GEO 卫星组成, 互相之间通过 ISL 构成网络, 每颗 GEO 卫星下天线采用多波束天线, 以构成与 LEO 卫星间的数据传输链路。由 GEO 卫星星座组成的管理子网负责收集业务传输子网的状态信息(业务状态、链路状态、设备状态等), 根据先验知识, 按照一定的网络管理模型和算法对这些信息进行处理后对业务子网实施控制, 同时将这些信息连同管理子网自身的状态信息发回地面监控站。当业务传输网络的负荷过重时, 管理子网还可以分流部分非实时数据业务, 以减轻业务子网的负载, 保证网络的 QoS。

LEO 卫星星座由几十颗 LEO 卫星组成, 它们之间也通过 ISL 构成网状连接, 保证网络具有满足可靠性要求的连通度。由 LEO 卫星星座组成的业务子网负责地面移动用户的接入和业务数据的交换与传输, 同时业务子网还需要向管理子网报告自身的网络运行状态信息, 并接受相应的网络管理(如更新的路由表)。

地面监控站可以随时通过高层管理子网对整个卫星移动通信网的运行状况进行监视, 也可以很方便地通过注入功能修改或控制高层管理子网的管理模式, 以适应技术发展和应用需求的变化。

GEO/LEO 混合轨道立体卫星网络将管理子网和业务传输子网进行物理上的分离, 摆脱了面状网络对网络管理的限制, 更充分的体现出了集中式网络管理的高效和精确的优越性, 有利于 QoS 保障。

3 GEO/LEO 卫星网络的路由策略

影响路由选择的因素主要有路径传播时延、节点排队时延、链路剩余带宽等参数。其中路径传播时延由网络的物理拓扑构型决定, 称为静态参数; 其余的参数均与网络的动态业务量相关, 称为动态参数。由静态参数决定的路由称为静态路由, 静态路由经动态参数修正以后的路由称为最终路由。静态路由的选择策略在离线(off-line)阶段确定, 最终路由的选择在运行(online)阶段确定, 因此动态参数的收集直接影响最终路由的选择。在 GEO/LEO 卫星网络中, 形成以 GEO 卫星为中心、LEO 卫星为节点的集中式结构。每当路由更新时, 各 LEO 卫星沿层间 ISL 发送路由报告, 路由报告中包含用于计算链路权值的必要信息, GEO 卫星根据路由报告算出各个节点的路由表, 并通过层间 ISL 下传给各节点。这样 LEO 卫星的主要工作就放在数据交换和转发上, 而 GEO 卫星可以了解全网链路信息, 更好地承担网络管理的任务。

在 GEO/LEO 卫星网络中采用集中式路由具有以下优点:

(1) 集中采集路由状态信息, 减少了路由建立时间, 在卫星网络拓扑动态可变的环境里相当于增加了路由维持时间, 降低路由切换概率;

(2) 当出现拥塞、全网负荷不均及链路或节点故障等情况时能做出快速应对, 重新计算路由表, 提高链路的利用率。

集中式路由的主要缺陷是过多依赖主控中心, 抗毁性较差。尽管多颗 GEO 卫星构成网络增加了冗余度, 在一定程度上改进了这一缺陷, 但为彻底地屏蔽缺陷, 本文提出主备用路由策略, 主路由策略采用集中式路由, 备用路由策略利用卫星运行的规律性和星际链路分布的规则性两大特点, 使得每颗 LEO

卫星能够自行进行路径选择, 从而使得主路由策略失效的情况下, 网络仍然能够正常运行。

3.1 网络拓扑离散化处理

对卫星网络 G , 将其周期 T 分割成时间片 $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$, 从而得到离散时间序列 $St = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n\}$ 。离散时间序列的选择准则为:

(1) 链路的切换时间 $t \in St$;

(2) 在时间片 $[t_i, t_{i+1}]$ 内, 设某条路径由 N 条边组成, 在时间

t , 该路径的时延 $D(t) = \sum_{k=1}^N w_{k-1,k}$, $w_{k-1,k}$ 为路径上相邻节点间的时延, 对于 $\forall t \in [t_i, t_{i+1}]$, $\forall \Delta t \in [0, t_{i+1} - t]$, 满足 $|D(t + \Delta t) - D(t)| \leq \Delta w_{\max} \cdot N = \Delta S_{\max} \cdot N/c \leq \delta$, 其中, Δw_{\max} 为边时延变化最大值, ΔS_{\max} 为链路长度变化最大值, c 为光速, δ 为限定的路径时延变化最大值。

由上得, $\Delta S_{\max} \leq \delta \cdot c/N$, 又 $\Delta S_{\max} \leq \left| \frac{\partial S(t)}{\partial t} \right|_{\max} \cdot (\Delta t)_{\max}$, $S(t)$

为链路长度, 令 $\left| \frac{\partial S(t)}{\partial t} \right|_{\max} \cdot (\Delta t)_{\max} = \delta \cdot c/N$, 从而可以得到时间片的最大值 $(\Delta t)_{\max}$ 。 $[t_i, t_{i+1}]$ 的选取要符合前面两个条件, 且使 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 最大化, 进而可以确定离散时间序列 St 。

3.2 集中式路由的实现

集中式路由综合考虑带宽、链路利用率和时延等参数, 计算链路综合权重。卫星网络中传输时延与链路长度有关, 以 PW (Propagation Weight) 表示传输权值, 定义

$$PW = \frac{L}{c}$$

L 表示链路长度。

链路利用率与信道容量及其上的流量有关, 考虑物理链路传输质量以及差错控制过程, 假设有效传输的数据量为信道容量的 α 倍 ($\alpha < 1$), 以 TW (Traffic Weight) 表示流量权值, 定义

$$TW = \left(1 - \frac{f}{C \times \alpha}\right)^{-1}$$

C 表示信道容量, f 表示流量。

可以得到链路权值 LW (Link Weight)

$$LW = \left(\frac{L}{c}\right) \left(1 - \frac{f}{C \times 0.5}\right)^{-1}$$

GEO 卫星在收集到各链路更新报告后应用 Dijkstra 算法得到各节点路由表, 然后下发给各节点, 实现集中式路由管理。

3.3 备用路由策略的实现

一旦集中式路由策略失效, 网络业务数据的转发就依赖于各 LEO 卫星的处理能力, 因此备用路由策略要尽量简单。根据卫星网络拓扑结构的特点, 备用路由策略采用缩水最短路径路由算法, 按照最少跳数下最短路径的路由选择原则, 使得各卫星节点可独立决定业务数据的下一跳节点。

3.3.1 一些定义

假定 LEO 层采用极轨星座, 极轨星座的卫星运行轨道倾角接近 90° , 为便于抽象分析, 本文假定倾角为 90° , 则从极点观察, 极轨卫星网络具有如图 2 所示的拓扑结构。

假定卫星网络由 N 个均匀分布的轨道面组成, 每轨道面上均匀分布 M 颗卫星, 每颗卫星与同轨道面内的邻居卫星有两条面内星际链路, 与两个临近轨道面的邻居卫星有两条面间星际链路。采用虚拟节点策略屏蔽卫星网络拓扑的时变性, 则

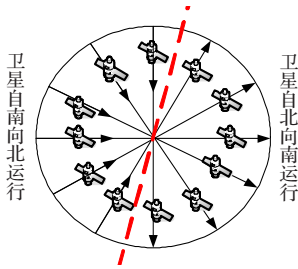


图2 极轨卫星网络拓扑结构北极视图

地球表面被不同的轨道面和轨道面上不同的卫星节点划分成若干扇形逻辑小区。逻辑小区和运行卫星之间的切换时刻可由卫星的运行规律预先计算, 这里仅对代表逻辑小区的逻辑节点组成的网络拓扑进行讨论。

将虚拟网络拓扑沿赤道划分为北半球与南半球, 逻辑节点的坐标用 $(pole, R, \theta)$ 表示^[9], 其中:

$pole$: 表示逻辑节点所在的南北极面, 0 表示北极面, 1 表示南极面;

R : 表示逻辑节点所在的同心圆半径, 取为整数, 最小为 0, 最大为 $(M/4)-1$, 假定 M 是 4 的整数倍;

θ : 表示逻辑节点所在的角度, 选定基准线为 0° 后, 从基准线逆时针 (东经经度) 旋转为正, 反之为负, θ 取值为 $[-N, N-1]$ 内的整数。

若定义南北两个极面的角度和半径相同的逻辑节点为共轭节点, 则南半球上的各节点可看作是北半球各节点的共轭。

假定数据包所在的当前节点为 $from$, 目的地节点为 to , 目的地节点对当前节点的相对地址定义为:

$$\begin{cases} pole = pole_{from} \oplus pole_{to} \\ R = R_{to} - R_{from} \\ \theta = MOD_{2N} \begin{cases} (\theta_{to} - \theta_{from}), & -N \leq (\theta_{to} - \theta_{from}) \leq N-1 \\ (\theta_{to} - \theta_{from}) - 2N, & (\theta_{to} - \theta_{from}) \geq N \\ (\theta_{to} - \theta_{from}) + 2N, & (\theta_{to} - \theta_{from}) < -N \end{cases} \end{cases}$$

3.3.2 算法的实现

缩水最短路径路由算法的两条原则如下:

- (1) 两点之间的路径经过的跳数最少;
- (2) 在相同跳数的情况下, 地理位置最短, 即在选择 Inter-ISL 时尽量选择位于高纬度的 Inter-ISL。

计算两点之间不穿过极区与穿过极区时的路径跳数之差, 记作 $hops_{diff}$, 给出静态路由的选择算法:

步骤 1 如果 $pole=0$, 则

(1) 如果 $\theta=0$, 则

- $R>0$, 则当前卫星在内环, 向外环方向做下一跳
- $R<0$, 则当前卫星在外环, 向内环方向做下一跳
- $R=0$, 则当前卫星即是目的地卫星
- $R>0$, 则当前卫星在内环, 向外环方向做下一跳
- $R<0$, 则当前卫星在外环, 向内环方向做下一跳
- $R=0$, 则当前卫星即是目的地卫星

(2) 否则

如果 $hops_{diff} \geq 0$, 则选择穿过极点的路径, 向内环方向做下一跳;

如果 $hops_{diff} < 0$, 并且如果 Sat_{from} 在极区内, 则向外环方向做下一跳; 如果 Sat_{from} 不在极区内, 则

$$\begin{cases} R \geq 0, \text{选择 Inter-ISL, 则} \begin{cases} \theta > 0, \text{逆时针做下一跳} \\ \theta < 0, \text{顺时针做下一跳} \end{cases} \\ R < 0 \begin{cases} \text{内邻居不在极区, 向内环方向做下一跳} \\ \text{内邻居在极区, 则} \begin{cases} \theta > 0, \text{逆时针做下一跳} \\ \theta < 0, \text{顺时针做下一跳} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

步骤 2 如果 $pole=1$

(1) 若 $R \geq 0$, 则将目的节点映射到当前节点所在极面上的共轭节点, 然后按照步骤 1 中所述寻找下一跳;

(2) 否则

- 若 $R_{from} < R_{most}$, 则向外环方向做下一跳
- 若 $R_{from} = R_{most}$, 则向另一极面做下一跳

4 GEO/LEO 卫星网络的仿真性能分析

本文仿真运行在主频 2.5G 的 PC 机上, 采用 STK (Satellite Tool Kit) 和 OPNET 两种平台, 由 STK 得到仿真参考星座的轨道参数, 将轨道参数导入 OPNET 中, 对比分析两种路由策略。仿真对象为由 3 颗静止轨道卫星和一个极轨星座组成的 GEO/LEO 卫星网络参考模型, 具体参数如表 1 所示。

表 1 GEO/LEO 卫星网络参考模型参数

轨道类型	轨道高度/km	轨道平面个数	卫星个数/轨道平面	轨道倾角/ $^\circ$
GEO	35 800	1	3	0
LEO	784	6	12	90

假定每颗 GEO 卫星与其覆盖范围内的每颗 LEO 卫星建立星际链路, 每颗 LEO 卫星与其同轨道平面的前后两颗卫星、不同轨道平面的左右两颗卫星分别建立星际链路, 选择源端: 北京 ($116.39^\circ\text{E}, 39.91^\circ\text{N}$), 目的端: 悉尼 ($151.03^\circ\text{E}, 33.89^\circ\text{S}$), 计算在 LEO 卫星运行一个周期内源端接入卫星和目的端接入卫星之间分别依据集中式路由策略与备用路由策略所选择的路径时延 (已经包含了重路由的过程), 如图 3 和图 4 所示。

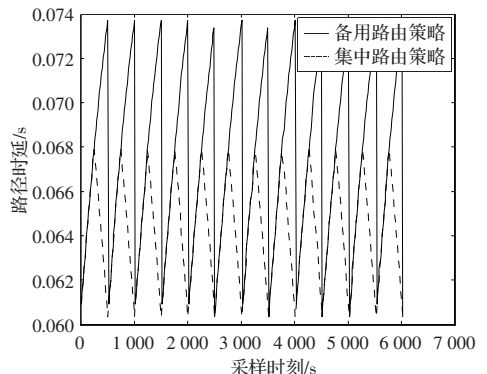


图 3 流量均匀分布时路径时延比较

由图 3, 图 4 可以看出, 从业务流量均匀分布到某一节点流量突然增加, 两种路由策略都会产生稍微的抖动, 另一方面, 备用路由策略与集中路由策略相比, 路径时延性能虽然略低, 但算法的运算复杂度降低了很多。集中路由策略重点考虑动态参数的影响, 在选择最优路径的过程中对全网范围内的每条链路进行搜索, 而备用路由策略为简单起见, 主要考虑由静态参数决定的最少跳数下的最短路径, 仅通过比特的比较运算即可确定下一转发节点。因此, 在集中路由策略失效的情况下, 备用路由策略能够保证业务数据的正常转发, 同时不降低 LEO 卫星节点对业务数据的处理能力。