LEO/MEO 双层卫星网的分层动态路由算法

苑 喆 张 军 柳重堪

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 由低轨 LEO(Low Earth Orbit)和中轨 MEO(Medium Earth Orbit)卫星构成的双层卫星网络具有较好的组网通信性能. 利用 MEO 和 LEO 卫星在长、短距通信中的优势,提出一种分层、分布式的双层卫星网动态路由算法. 通过控制链路状态信息的洪泛,LEO 卫星只需掌握局部拓扑即可完成短距业务通信,长距通信业务则由 MEO 卫星承载. 将星间链路的剩余生存时间因素引入路径权重中,路由计算的路径是综合考虑了时延与持续时间双重因素的最优路径. 仿真结果表明该算法在时延、路由开销、网络业务流分布等方面都具有较好的性能,并且易于系统实现.

关 键 词: 卫星通信系统; 网络协议; 星间链路; 路由算法

中图分类号: TN 927

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0788-05

Dynamic routing algorithm for LEO/MEO double-layered satellite networks

Yuan Zhe Zhang Jun Liu Zhongkan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Double-Layered satellite networks consisting of LEO(low earth orbit) and MEO(medium earth orbit) satellites have advantages on networking and communication performances. Based on the advantages of MEO and LEO satellites in long-distance and short-distance communications respectively, a hierarchical and distributed dynamic routing algorithm named DLRA (double-layered satellite-network routing algorithm) was proposed. By controlling flood of link state information, LEO satellites could acquire local topology information to route the short-distance traffics. The long-distance traffics were routed in MEO layer. The residual lifetime of the ISL (inter-satellite link) was considered in the path weight calculation in this algorithm. The selected path was optimal in path delay and duration. The simulation results show that DLRA has better performances in end-to-end delay, routing overhead and traffic flow distribution, and is easy to be applied.

Key words: satellite communication systems; network protocols; inter-satellite links; routing algorithm

中、低轨道卫星利用星间链路 ISL(Inter-Satellite Link)进行组网可以为地面用户提供方便快捷的全球性通信服务,成为未来卫星通信的重要发展方向[1]. 由低轨 LEO(Low Eanth Orbit)和中轨 MEO(Medium Eanth Orbit)卫星组成的双层卫星通信网络具有较好的组网通信性能,为国内外的学者所关注,并已取得了一定的研究成果[2-4]. 其中最典型的是 Ian F. Akyildiz 等人在参考文献[2]中提出的一种基于分层分群结构的多层卫星网及多层卫星网络路由 MLSR(Multilayered Satellite-networks Routing)算法. 但是 MLSR 算法在进行路由计算时只是单纯地选择传输时延最小的路径而没有考虑到该路径可继续保持的时间,即路径的剩余生存时间. 而且 MLSR 算法在实现上比较复杂,高层节点的计算负荷较重.

本文提出了一种适用于 LEO/MEO 双层卫星组网结构的动态路由算法——双层卫星网路由算法 DLRA(Double-Layered satellite-network Routing

收稿日期: 2005-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10377005)

作者简介: 苑 喆(1977-),男,辽宁大连人,博士生,yuan _ zhe1977@ yahoo. com. cn.

Algorithm). 在 DLRA 算法中充分利用 LEO 和 MEO 卫星各自的优势,短距通信业务的数据包尽可能只通过 LEO 层进行传输,而长距通信业务的数据包由 LEO 卫星负责接入,中间的多条转发由 MEO 层完成. 算法将星间链路的剩余生存时间因素引入路径的权重中,路由计算出的路径是综合考虑了时延与持续时间双重因素的最优路径.

本文首先对单层 MEO 卫星网和 LEO 卫星网的网络传输时延进行了比较和分析,然后详细介绍了 DLRA 算法及实现步骤,最后对算法进行了仿真分析并给出了相应的结论.

1　单层卫星网的时延性能分析

利用 LEO 卫星组网一般需要几十颗甚至几百颗卫星. 在长距离通信中,随着构成端到端路径所需卫星数量的增多,由于多节点累积效应的存在,数据包在单颗卫星路由器节点上的处理时延和排队时延不能被忽略,造成路径传输时延明显增加;同时,由于路径经过的 LEO 卫星数增多,路径发生切换的概率增大. 这些都会降低 LEO 卫星网的性能. 如果利用 MEO 卫星组网,只需要很少卫星就可以构成端到端路径,避免了单星排队处理时延的累积,端到端时延性能会好于 LEO 卫星网络. 并且 MEO 卫星星间链路相对稳定,路径发生切换的概率小,系统的稳定性较高.

分别选取 Iridium 系统和 ICO 系统作为典型的 LEO 和 MEO 卫星网进行仿真分析. 在仿真中设置上海、香港、新加坡、悉尼、巴黎、纽约以及布宜诺斯艾利斯等城市与北京间的数据通信. 由于通信距离不同,数据传输途经卫星节点的个数也不同(如表 1). 假设数据包在每个卫星节点上大约需要经历 10 ~ 15 ms 的处理与排队时延.

表 1　北京与各城市间数据经卫星网的转发跳数

城市对	Iridium	ICO
北京-上海	1	1
北京-香港	1 ~ 2	1
北京-新加坡	2 ~ 3	1
北京-悉尼	4	1 ~ 2
北京-巴黎	4 ~ 5	2
北京-纽约	7	2 ~ 3
北京-布宜诺斯	≥7	3

从图 1 所示的仿真结果可以看出在传输短距离(如北京到上海、香港、新加坡)通信业务中,Iridium 比 ICO 具有明显的时延指标优势. 但在长距离(如北京到悉尼、巴黎、纽约、布宜诺斯艾利斯等城市)通信业务的传输中,ICO 比 Iridium 具有更好的时延性能. 对于 Iridium 系统来说这个区分长短距离通信的跳数值 N 约为 4,N 因网络星座参数(如高度、卫星分布等)的不同而不同.

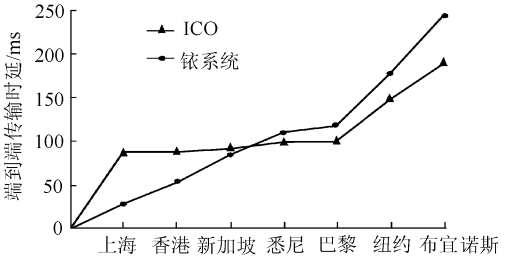

图 1　北京与各城市间通信的端到端时延比较

2　双层卫星网路由算法

MEO 和 LEO 卫星在长、短距通信中具有不同的优势,在它们组成的双层星座网络中应该充分利用这一点. DLRA 算法的基本原则是:短距通信业务的数据包尽可能只通过 LEO 层进行传输;长距通信业务的数据包由 LEO 卫星负责接入,中间的多条转发由 MEO 层完成. 在 DLRA 算法中,LEO 路由节点只需要掌握节点范围在 N 跳内的局部拓扑,这可以通过在链路状态通告中增加一个“跳数限制”字段以控制通告只在 N 跳范围内进行洪泛来实现. 这样可以明显地减少路由协议的开销,加快路由的收敛速度.

DLRA 算法包括链路状态洪泛、动态路由计算、业务数据包选路以及卫星路由器失效情况下的处理等 4 个部分的内容.

2.1　定　义

定义 1　ISL 的剩余生存时间:在一个系统周期内卫星 S_i 与卫星 S_j 间的 ISL L_{S_i,S_j} 会发生 M 次的通断切换. 假设在 $t^{\mathrm{ON}}_{S_i\to S_{i,k}}(k=1,2,3,\cdots,M)$ 时刻 L_{S_i,S_j} 建立,在 $t^{\mathrm{OFF}}_{S_j\to S_{i,k}}(k=1,2,3,\cdots,M)$ 时刻 L_{S_i,S_j} 断掉. 在 t 时刻 ISL L_{S_i,S_j} 的剩余生存时间定义为

$$T(L_{S_i,S_j},t)=\begin{cases} t^{\mathrm{OFF}}_{S_j\to S_{i,k}}-t & t^{\mathrm{ON}}_{S_j\to S_{i,k}}\leqslant t\leqslant t^{\mathrm{OFF}}_{S_j\to S_{i,k}} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{1}$$

其中,$k=1,2,3,\cdots,M$.

定义 2　路径的剩余生存时间:卫星 $S_1,S_2,\cdots,S_n$ 以及它们之间的星间链路 $L_{S_1,S_2},L_{S_2,S_3},\cdots,L_{S_{n-1},S_n}$,构成一条完整的传输路径 P,则在 t 时刻路径 P 的剩余生存时间为所有星间链路 $L_{S_i,S_{i+1}}(i=1,2,\cdots,n-1)$ 的剩余生存时间 $T(L_{S_i,S_{i+1}},t)$ 中最小的一个,即

$$T_t(P)=\min_{i=1}^{n-1}\left\{T(L_{S_i,S_{i+1}},t)\right\} \tag{2}$$

定义 3　路径的权重:卫星 $S_1,S_2,\cdots,S_n$ 以及它们之间的 ISL $L_{S_1,S_2},L_{S_2,S_3},\cdots,L_{S_{n-1},S_n}$ 构成一条完

整的传输路径 P,则该条路径 P 的权重 $W(P)$ 为路径时延与剩余生存时间的加权和,即

$$W(P) = w_1 \times \frac{D(P)}{D_{\max}} + w_2 \times \frac{T_{\max}}{T(P)} =$$

$$w_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{D(S_i)}{D_{\max}} + w_1 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \frac{D(L_{S_j,S_{j+1}})}{D_{\max}} +$$

$$w_2 \cdot \max_{k=1,\cdots,n-1} \left\{ \frac{T_{\max}}{T(L_{S_k,S_{k+1}})} \right\}$$

其中,$D(S_i)$ 为数据包在各卫星节点 S_i 的排队处理时延;$D(L_{S_i,S_{i+1}})$ 为 ISL $L_{S_i,S_{i+1}}$ 的传播时延;$D_{\max}$ 为系统最大 ISL 传播时延;w_1 为路径时延加权系数;w_2 为路径剩余生存时间加权系数,且 $w_1+w_2=1$.

2.2 链路状态的洪泛

DLAR 算法中网络链路状态信息的洪泛过程分6步完成:

1) LEO 卫星链路状态信息的收集:LEO 卫星 L_i 通过与邻近卫星相互间交换呼叫分组,如地面开放最短路径优先 OSPF(Open Shortest Path First)协议中的 hello 分组,或根据星历计算获得本节点与邻近卫星 L_j 间的连通状态信息,构成 L_i 的本地链路状态集,包括 L_i 的轨内链路、轨间链路以及与 MEO 间的各层链路等各条 ISL 的传播时延及剩余生存时间等状态信息.

2) 卫星链路状态通告的生成及发送:LEO 卫星 L_i 根据自己的本地链路状态集生成卫星链路状态通告卫星链路状态报告 SLSA(Satellite Link State Advertisement). SLSA 的数据报格式可以参照 OSPF 协议中链路数据报告的定义进行适当的简化. 在 SLSA 中增添一个"跳数限制"(Hop Limit)的字段,其初始化值为 N. 路由协议通过该字段来实现对 SLSA 在 LEO 层内洪泛范围的限定. 卫星 L_i 将 SLSA 向每一个与它建立了 ISL 的邻居节点发送,包括 LEO 邻居节点和 MEO 邻居节点(这里的邻居不是从距离的远近上考虑的,而是从拓扑连通关系上定义的).

3) SLSA 在 LEO 层内的洪泛:每个接收到 SLSA 的卫星节点都将该 SLSA 中"跳数限制"字段值减1. 如果跳数限制字段为0,则卫星节点将该 SLSA 丢弃;如果不为0,则通过对 SLSA 年龄和序列号等字段进行判断来决定如何处理该 SLSA,判断准则与 OSPF 协议相同. 通过上述机制,可以控制 SLSA 在 LEO 层内的洪泛范围,使每颗 LEO 卫星节点都恰好只掌握其跳范围内的局部拓扑信息.

4) MEO 卫星链路状态信息的收集:MEO 卫星 M_k 通过与邻近 MEO 卫星相互间交换呼叫分组或根据星历计算获得本节点与邻近 MEO 卫星间的连通状态信息,构成 M_k 的本地链路状态集,包括 M_k 的轨内链路和轨间链路等各条 ISL 的传播时延及剩余生存时间等状态信息.

5) MEO 卫星建立分区拓扑信息集:MEO 卫星 M_k 通过层间 ISL L_{M_k,L_i} 接收到所有与其建立有 ISL 的 LEO 卫星 L_i 发来的本地链路状态集,连同自身生成的链路状态集一起构成 M_k 的 MEO 分区拓扑,其中包含该分区中所有存在的 ISL 的状态信息.

6) SLSA 在 MEO 层内的洪泛:在 MEO 层内,各个 MEO 卫星之间通过 SLSA 相互交换各自掌握的分区拓扑信息. 最终,每颗 MEO 卫星都得到了整个卫星网络的拓扑信息.

2.3 路由计算及选路策略

卫星链路状态信息的洪泛结束后,每个卫星节点需要根据掌握到的网络拓扑信息计算本地路由表.

1) MEO 卫星的路由计算:MEO 卫星根据自己掌握的全网拓扑信息,利用 Dijkstra 算法以及式(3)中的权重值来计算本星到各 LEO 卫星的所有存在的路径,并将各条路径按路径时延 $D(P)$ 值由小到大设为首选、第一备选、第二备选等路径. MEO 计算路径的中间节点只能是 MEO 卫星,而不包含 LEO 卫星节点,以减轻 LEO 卫星的业务负载,降低 LEO 层发生拥塞的机率.

2) LEO 卫星的路由计算:LEO 卫星根据自己掌握的层内局部拓扑状态信息,利用 Dijkstra 算法以及式(3)中的权重值来计算到各个可达 LEO 卫星的路由;不可达的 LEO 卫星,其对应的路由表项的下一跳都设置为邻居 MEO 卫星.

当业务数据包到达,用户接入 LEO 卫星节点在路由表中查找到达目的端卫星节点的下一跳卫星地址,并向该卫星转发数据包. LEO 层卫星承载的业务量比 MEO 层多(见第3节),其发生拥塞的概率较高. 为了避免拥塞,在向 LEO 层转发数据包前先判断该方向上是否拥塞,这可以通过检测对应链路输出缓冲的使用率来确定(如果大于某个阈值则说明将要发生拥塞). 如果没有发生拥塞,则向该 LEO 卫星路径上发送数据包;如果有拥塞发生,为了缓解 LEO 层内的拥塞、降低丢包率,将该数据包向上层的 MEO 卫星转发,由 MEO 卫星来为数据包选取新的路由发送.

2.4 卫星故障处理

网络中卫星节点的故障会导致原有的传输路

径不可用,同时引起网络拓扑的变化. DLRA 是一种链路状态路由算法,它可以响应网络拓扑的变化完成路由更新. 但由于卫星通信的大时延特性,链路状态信息的洪泛时间可能相对较长. 为了保持业务数据传输的连续,在网络重路由过程完成之前,为业务数据包选择一条临时路径进行传输,待重路由结束后再使用新的最优路径.

3　仿真及分析

利用 OPNET 仿真软件对 LEO/MEO 双层卫星网进行了建模与仿真分析. LEO 层采用 Iridium 系统的星座结构,MEO 层采用 ICO 系统的星座结构. 网络中的动态路由协议利用剪裁的 OSPF 协议,并根据 DLRA 算法进行了适当的修改,路径权重中的系数 w_1 和 w_2 均设为 0.5.

1) 时延分析. 参照第 1 节配置了北京与上海、香港、纽约等 7 个城市间的通信业务,对采用了 DLRA 算法的端到端时延进行了仿真. 系统的跳数限制值 N 设为 4. 从图 2 的仿真结果来看,采用了 DLRA 算法的双层卫星网在传输短距通信业务中具有与 Iridium 相当的时延性能,在长距通信业务的传输中具有好于 Iridium 且接近 ICO 的时延性能.

2) 路由协议开销. MLSR 算法对于最优路径的计算只考虑了时延指标,为业务选择一条时延最小的传输路径. DLRA 算法将 ISL 的剩余生存时间引入路径代价函数中,为业务选择一条时延较小且相对稳定的最优传输路径. 由于 DLRA 计算选择的路径比较稳定、路径可持续时间长,所以在网络系统运行过程中路径切换的频次要比 MLSR 算法低大约 35% (如表 2). 图 3 比较了使用两种算法的网络在仿真过程中为重建路由而产生的动态路由协议数据包的数量,DLRA 算法比 MLSR 算法平均要少大约 20%,最多达 46.2%.

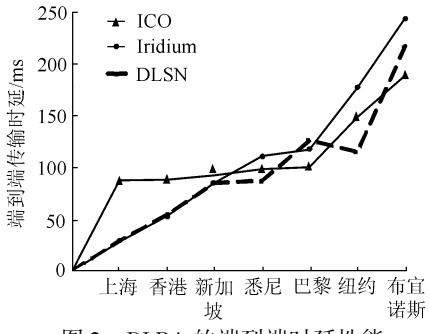

图 2　DLRA 的端到端时延性能

表 2　DLRA 和 MLSR 算法在仿真时间内的平均路径切换次数比较

路由算法	DLRA	MLSR
平均切换次数/次	15	23

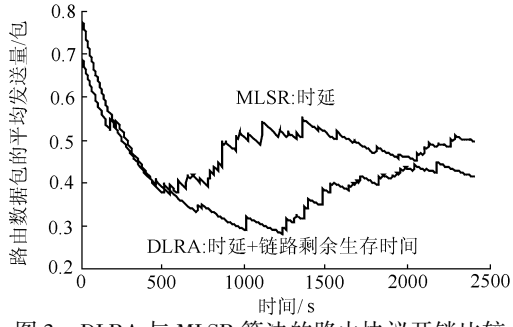

图 3　DLRA 与 MLSR 算法的路由协议开销比较

3) 网络业务流量分布分析. 参照文献[5] 建立网络的业务分布模型(如表 3 和图 4). 大洲间业务流向分布如文献[6].

表 3　密度等级与流量(10^6 min/a)大小的对照关系

等级	1	2	3	4	5	6	7	8
流量	1.6	6.4	16	32	95	191	239	318

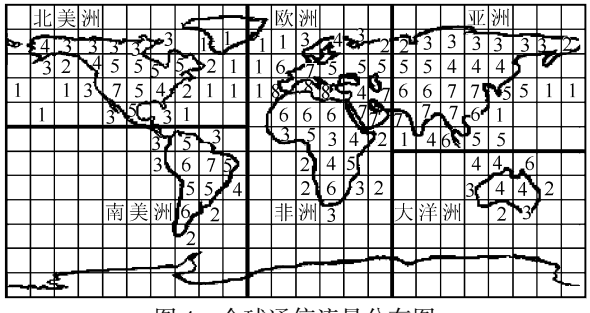

图 4　全球通信流量分布图

基于此业务模型,场景 3 对采用 DLRA 算法的双层卫星网络进行了仿真分析. 从图 5 可以看出,当跳数限制 N 为 2 时,近 80% 的业务流量通过 MEO 层传输. 随着 N 的增大,业务数据包通过 LEO 层的概率增大,MEO 层的承载比例减小,N=3 时约为 56.6%,N=4 时约为 32.6%,N=5 时约为 17.2%,而当 N=6 时只有 2.1%.

网络中本地业务居多,短距通信流量在总业务流量中的比重很大. 当跳数限制 N 为 2 时,相

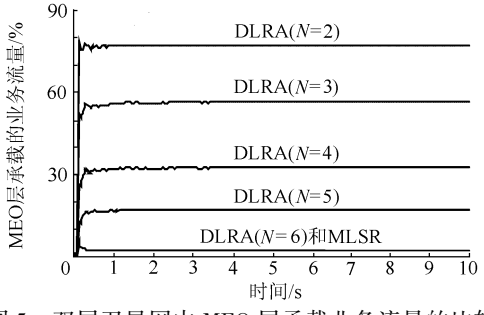

图 5　双层卫星网中 MEO 层承载业务流量的比较

当一部分短距通信业务会通过 MEO 层传输,使得端到端传输时延过大. 随着 N 的增大,短距通信业务选择 LEO 层的概率增加,端到端时延逐渐改善,直到 N 达到某个阈值. 如果继续增大 N 值则会使得部分长距通信业务通过 LEO 层内路由进行传输,导致端到端时延性能变差. 如图 6,本仿真中 N 的阈值为 4,与第 1 节的分析一致. 此时 MEO 层和 LEO 层承载的业务流量比为 1∶2.

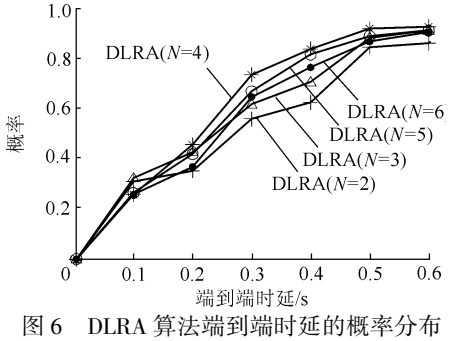

图 6 DLRA 算法端到端时延的概率分布

4) 路由计算开销. 在 MLSR 算法中,MEO 卫星除了计算自己的路由表,还要为其管理的每颗 LEO 卫星计算路由,因此 MEO 层的路由计算开销很大,每一次重路由都会消耗大量的星上处理资源. 相比之下,DLAR 算法采用了分布式路由计算策略,每颗卫星只计算自己的路由表,而且 LEO 卫星只需要计算局部路由,这些都使得总的路由计算开销较 MLSR 算法低很多(如图 7 所示).

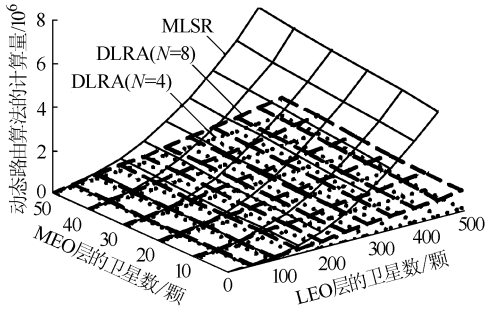

图 7 双层卫星网络中路由计算开销总量比较

4 结 束 语

本文提出了一种适用于 LEO/MEO 双层卫星网络的分层动态路由算法——DLRA 算法. 通过在链路状态通告中增加一个“跳数限制”字段来控制通告的洪泛范围,使每颗 LEO 卫星只掌握自己周围跳内的网络拓扑,而 MEO 卫星需要收集权网络的拓扑状态信息. 通过这种方法使得网络中短距通信业务的数据包通过 LEO 层进行传输,而长距通信业务的数据包由 LEO 卫星负责接入,中间的多条转发由 MEO 层完成. DLRA 算法在系统仿真中体现了较好的时延性能,具有较低的协议及计算开销. 该算法可以在剪裁的 OSPF 协议基础上适当修改,易于实现.

参考文献 (References)

[1] Ercetin O, Ball M O, Tassiulas L. Next generation satellite systems for aeronautical communications[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22(2): 157-179

[2] Akyildiz I F, Ekici E, Bender M D. MLSR: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424

[3] 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] // Titsworth F M. Proceedings of LCN 2000, USA: the Printing House, 2000: 392-399

[4] 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[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 31-35
Hu Jianhao, Li Tao, Wu Shiqi. Routing of a LEO&MEO double layer mobile satellite communication system[J]. Journal of Electronics, 2000, 28(4): 31-35(in Chinese)

[5] Voilet M D. The development and application of a cost per minute metric of the evaluation of mobile satellite systems in a limited-growth voice communications market[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1995

[6] Svigelj A, Mohorcic M, Kandus G, et al. Routing in ISL networks considering empirical IP traffic[J]. IEEE Journal on Selected Aeas in Communications, 2004, 22(2): 261-273

(责任编辑:张 婧)