

基于 PETRI 网模型的 LEO/ MEO/ GEO 三层卫星网络的性能分析

洪志国¹, 吴凤鸽², 范植华¹, 李 磊¹, 孙富春²

(1. 中国科学院软件研究所, 北京 100080; 2. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 基于 Petri 网模型方法和仿真方法, 对一种低轨/ 中轨/ 同步地球轨 (LEO/ MEO/ GEO) 三层卫星网络进行了性能分析. 首先建立了卫星网络的广义随机 Petri 网 (GSPN) 模型, 采用 SPNP6.0 软件进行了网络性能分析. 然后, 将分析结果与采用 OPNET 软件对该三层卫星网络模拟的结果进行了比较, 验证了模型的正确性, 并得出了诸如在高网络负载的情况下三层网络结构的性能优于单层等新的结论.

关键词: 卫星通信; LEO/ MEO/ GEO 卫星网络; GSPN 模型; 性能分析; OPNET

中图分类号: TP393. 02 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 02-0354-04

A Petri Net-Based Performance Analysis of a Triple-Layered LEO/ MEO/ GEO Satellite Network

HONG Zhi-guo¹, WU Feng-ge², FAN Zhi-hua¹, LI Lei¹, SUN Fu-chun²

(1. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The performance evaluation on a triple-layered LEO/ MEO/ GEO satellite network is carried out by Petri Net-based analysis and software simulation. The GSPN model of a triple-layered satellite network is constructed, and then used to evaluate the network performance with SPNP (Stochastic Petri nets Package) 6.0 software. The effectiveness of the results obtained by Petri Net-based analysis is verified in comparison with these by network simulation using OPNET, and some new results, such as the performance of the triple-layered network is better than that of LEO one under high load, are derived thereby.

Key words: satellite communication; low earth orbit (LEO)/ medium earth orbit (MEO)/ geosynchronous earth orbit (GEO) satellite network; generalized stochastic petri nets (GSPN) model; performance analysis; optimum network performance (OPNET)

1 引言

近年来, 国内外对卫星网络的性能评价多集中在用排队论分析卫星网络星际链路的传播时延等问题^[1,2]. 然而, 排队网络模型不能刻画卫星网络中信息业务的并行性、异步性等特点. 文献[3]假设卫星网络不存在处理延迟和传播延迟的情形下, 利用 SPN (Stochastic Petri Nets)^[4]分析了具有半双工通信方式的单层 LEO (低轨) 卫星网络在不同的星际链路下的性能. 但实际的卫星网络具有大时延、高误码率等特点, 延迟因素对卫星网络的影响不能被忽略; 此外, 半双工通信也不适合于未来建立的卫星通信网络.

20 世纪 90 年代以来, 在卫星通信领域掀起了采用 LEO/ MEO (中轨) 星座的热潮, 但其实现复杂度远远高于 GEO (静止轨) 卫星通信系统, 而且对优质视像多媒体综合业务的传输基本无能为力. 因此, 在 LEO、MEO 和 GEO 层进行多层混合布星, 利用层间链路建立一个立体的卫星通信网络, 具有较高的

空间频谱利用率等优点, 可实现各自优势互补, 现在已经成为卫星通信研究的热点. 所以建立比较准确的 LEO/ MEO/ GEO 三层网络的 SPN 模型, 并对其进行性能分析是一个迫切的、急需的研究课题. 本文的主要创新点为: (1) 采用广义随机 Petri 网 (Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN)^[5]理论建立了 LEO/ MEO/ GEO 三层卫星网络的模型; (2) 将对 Petri 网的求解分析结果与采用 OPNET 软件对 LEO/ MEO/ GEO 三层卫星网络模拟的结果进行了比较, 验证了 Petri 网模型的分析结果; (3) 得出了在高网络负载的情况下三层网络结构的性能优于单层.

2 LEO/ MEO/ GEO 三层组网模式

LEO/ MEO/ GEO 特性比较表^[6]:

	LEO	MEO	GEO
轨道高度 H	500 ~ 2000km	5000 ~ 20000km	35786km
时延	10 ~ 40ms	100ms 左右	250 ~ 280ms

收稿日期: 2004-03-08; 修回日期: 2004-11-26

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No. 2003AA712030)

以分层结构为基础,兼顾 LEO、MEO 和 GEO 的优势,提出了一种如图 1 所示的 LEO/MEO/ GEO 三层卫星网络结构^[7].在此结构中,采用多层设计的思路,GEO 卫星作为管理星,MEO 作为骨干星,LEO 作为接入星.

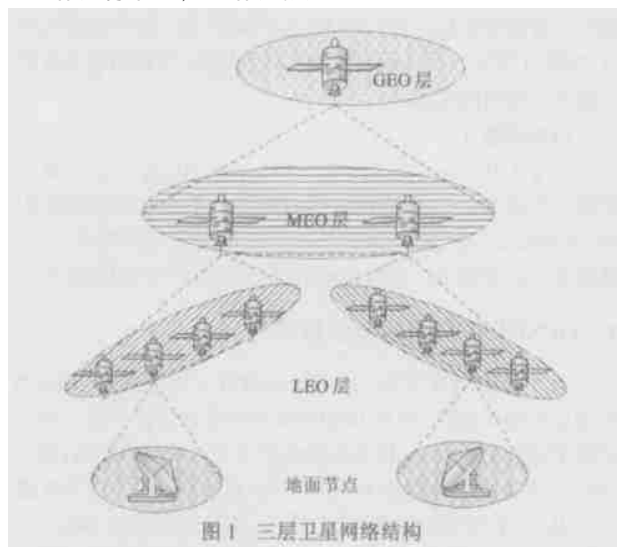


图 1 三层卫星网络结构

2.1 GEO 管理星的设计

GEO 卫星层由几颗 GEO 组成,它们之间构成网状连接,负责管理星的数据传输,收集交换路由信息. GEO 卫星星下天线采用多波束天线,提供多颗 MEO 骨干星的接入.

2.2 MEO 骨干星的分域设计

MEO 卫星层由几颗到十几颗 MEO 卫星组成,它们之间构成网状连接,可以保证网络具有较高的连通度,MEO 卫星星下天线采用多波束天线,可以与多颗 LEO 接入星连接,作为骨干网络交换节点,负责骨干网络的数据传输,收集交换路由信息和计算路由表.

2.3 LEO 接入星的分域设计

每个 LEO 卫星作为接入节点,按照一定的分域策略与 LEO 和 MEO 通信,为地面站提供接入服务.在这样设计的 LEO/MEO/ GEO 三层卫星网络中存在六种链路:

(1) ICLs (Inter-GEO Links): GEO 卫星之间的链路.用于管理星网络的数据传输和交换路由信息. GEO 星间链路主要用于实现全球中继通信卫星网络^[8].

(2) GLs (GEO-MEO Links): GEO 和 MEO 卫星之间的链路.用于 MEO 骨干星的接入骨干网络和接收计算好的路由表信息.

(3) MLs (Inter-MEO Links): MEO 卫星之间的链路.用于 MEO 层的数据传输和交换路由信息.

(4) LLs (Inter-LEO Links): LEO 卫星之间的链路.用于传输无需经过 MEO 层的数据.

(5) MLLs (MEO-LEO Links): MEO 和 LEO 卫星之间的链路.用于 LEO 卫星接入 MEO 层和接收计算好的路由表信息.

(6) UDLs (User Data Links): 地面用户和卫星之间的链路.

3 基于模型的三层卫星网络性能分析

首先给出设计的 LEO/MEO/ GEO 三层卫星星座. MEO 卫星层与 LEO 卫星层都采用 Walker 星座,相应的 Walker 参数分别为 8/4/3 和 66/11/3,以保证卫星在运动过程中的相对位置不变,有助于实现稳定的路由^[9].

表 1 为卫星星座的参数设计,其中存在的六种链路均为全双工链路.

采用如下的路由策略:

(1) MEO 卫星只能和其逻辑域的 MEO 卫星通信,并且只能和覆盖其时间最长的 GEO 卫星通信.

(2) LEO 卫星只能和其逻辑域的 LEO 卫星通信,并且只能和覆盖其时间最长的 MEO 卫星通信.

(3) GEO 卫星之间、MEO 卫星之间通信均采用最短路径原则.

3.1 LEO/MEO/ GEO 三层卫星网络的 GSPN 模型

为了简化卫星网络的分析,本文作如下的假设:

(1) 网络中 LEO、MEO 和 GEO 卫星分别具有相同的结构,其中每颗 LEO 卫星所覆盖的地面站数目相同^[10].

(2) 所设计的六种卫星链路具有相同的带宽和平均时延.

(3) 每个 LEO 卫星从地面接收的信息服从 Poisson 分布且信息传递彼此独立.

(4) 不予考虑星上处理信息的时间延迟和星上缓冲区长度对延迟时间的影响.

卫星网络的延迟是评价卫星网络性能的一个重要参数.我们将采用 GSPN 模型来研究信息从地面产生,到达卫星进行传输直到离开卫星回到地面这段时间内的平均时间延迟.

图 2 表示为 GEO 卫星 G_1 和 G_2 、MEO 卫星 M_1 和 M_2 (M_1 和 M_2 分别在 G_1 和 G_2 的逻辑覆盖域内)以及 LEO 卫星 L_1 和 L_2 (L_1 和 L_2 分别在 M_1 和 M_2 的逻辑覆盖域内)进行通信的 GSPN 模型.

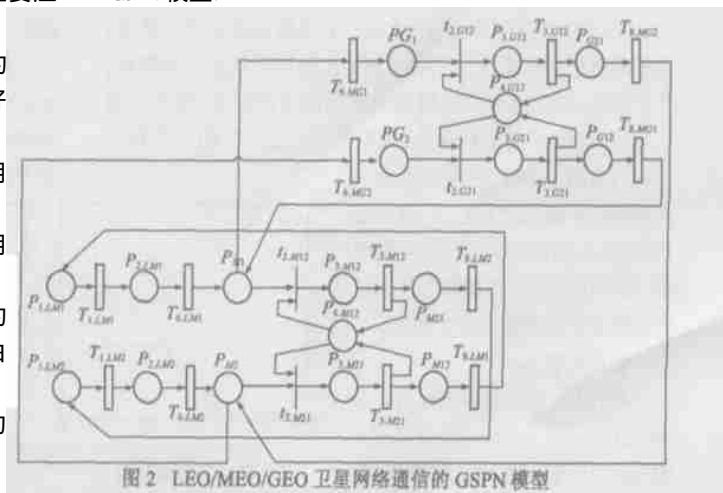


图 2 LEO/MEO/GEO 卫星网络通信的 GSPN 模型

表2 GSPN 对象表

名 称	意 义	标志数/ 速率/权值
$P_{1, LMi}$	从地面站获取消息	S
$P_{1, Mi}, P_{2, LMi}$	消息在进行处理,等待传输链路	0
$P_{2, Mi}, P_{3, LMi}$	消息获取传输链路	0
$P_{3, Mij}$	消息在 MEO 链路上传输,方向是 M_i 到 M_j	0
$P_{3, Gkp}$	消息在 GEO 链路上传输,方向是 G_k 到 G_p	0
$P_{4, Gkp}$	G_k 与 G_p 之间链路的带宽	n_G
$P_{4, Mij}$	M_i 与 M_j 之间链路的带宽	n_M
$P_{L, LMi}$	LEO 之间链路带宽	n_L
$P_{5, LMi}$	消息从 LEO 向 M_i 的上行链路上传输	0
$P_{5, MGk}$	消息从 MEO 向 G_k 的上行链路上传输	0
$P_{6, MGk}$	MEO 与 GEO 间上行链路带宽	n_{MG}
$P_{6, GMk}$	MEO 与 GEO 间下行链路带宽	n_{GM}
$P_{6, LMi}$	LEO 与 MEO 间上行链路带宽	n_{LM}
$P_{6, MLi}$	LEO 与 MEO 间下行链路带宽	n_{ML}
$P_{7, LMi}$	消息从 M_i 到 LEO 的下行链路上传输	0
$P_{7, MGk}$	消息从 G_k 向 MEO 的下行链路上传输	0
P_{Gk}	GEO 缓冲区长度	b_G
P_{Mi}	MEO 缓存区长度	b_M
P_{LMi}	LEO 缓存区长度	b_L
$T_{1, Mi}$	消息进行处理,等待传输链路	1
$T_{1, LMi}$	获取消息	
$T_{2, LMi}$	等待传输链路	
$T_{3, LMi}$	在 LEO 链路上传输	
$T_{3, Mij}$	在 MEO 链路上传输,方向是 M_i 到 M_j	2
$T_{3, Gkp}$	消息在 GEO 链路上传输,方向是 G_k 到 G_p	3
$T_{6, MGk}$	从 MEO 向 G_k 的上行链路上传输	4
$T_{6, LMi}$	从 LEO 向 M_i 的上行链路上传输	6
$T_{8, LMi}$	从 M_i 到 LEO 的下行链路上传输	8
$T_{8, MGk}$	从 G_k 向 MEO 的下行链路上传输	9
$t_{2, Mij}$	M_i 向 M_j 转发消息	Mij
$t_{2, Gkp}$	G_k 向 G_p 转发消息	Gkp
$t_{5, LMi}$	LEO 向 M_i 转发消息	5
$t_{5, MGk}$	MEO 向 G_k 转发消息	10
$t_{7, LMi}$	M_i 向 LEO 转发消息	7
$t_{7, MGk}$	G_k 向 MEO 转发消息	11

3.2 仿真结果分析

采用 SPNP (SPN Package) 6.0 对上述简化模型进行仿真。由于随着地面站接收信息的增加会出现模型状态空间爆炸,为了反映 LEO/MEO/GEO 模型在高负载下的特征,给与位置 $P_{4, M12}$ 相连的弧加上权值 q ,表示从 $P_{1, LMi}$ 产生的一个标志(信息)占用 q 个带宽。我们主要关心模型的平均时间延迟,它可以通过 Little 规则和平衡原理^[11]来确定。以下几个实验都是通过改变不同参数来研究模型的时延情况。

仿真实验 1

在 $S = 5, n_M = n_G = 50, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.25, \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_8 = \alpha_9 = 0.5, \alpha_{10} = 100$ 情况下考察随着 q 的增加,整

个网络的平均时间延迟(如图 3 所示)。我们看出当负载较小的时候,负载的变化对延迟影响不大,当 $q \geq 26$ 后,其变化显著。

仿真实验 2

在 $q = 10, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.25, \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_8 = \alpha_9 = 0.5, \alpha_{10} = 100$ 情况下考察随着标志数的增加,在不同带宽下的平均延迟情况(如图 4 所示)。可以看出随着负载的增加,带宽的增加有利于减少平均时间延迟。

仿真实验 3

在 $q = 10, \alpha_4 = \alpha_6 = \alpha_8 = \alpha_9 = 0.5, \alpha_{10} = 100, n_M = n_G = 50$ 的情况下考察 MEO 之间链路延迟对模型的平均时间延迟的影响。分别给出三种情形(如图 5 所示)。从图中可以看出,改善链路之间的延迟可以有效地减少整个模型的平均时间延迟。

4 OPNET 仿真建模与性能评价

为了验证所建立的 LEO/MEO/GEO 三层卫星网络 GSPN 模型分析的正确性,采用 OPNET 软件对前面所建立的三层卫星模型进行模拟仿真。仿真实验中使用了 6 种卫星链路:每个 GEO 卫星通过 ICLs 与其相邻的 GEO 相连;每个 GEO 卫星通过 GMLs 与其相邻的 MEO 相连;每个 MEO 卫星通过 IMLs 与 4 颗相邻的 MEO 相连;每个 LEO 卫星通过 ILLs 与 4 颗相邻的 LEO 卫星相连;每个 LEO 卫星与具有最长覆盖时间的 MEO 卫星通过 MLLs 相连;每个地面节点通过 UDLs 与 LEO 卫星相连。

设定 6 种链路的带宽属性分别为:

ICLs	GMLs	IMLs	ILLs	MLLs	UDLs
1Gb/s	155Mb/s	655Mb/s	155Mb/s	155Mb/s	2Mb/s

实验中的地面节点设置如下:首先在北京(东经 116.46 度,北纬 39.92 度)设立中心节点,然后在相同纬度上,每隔 15 度设立节点,共设立 12 个节点。每个节点都向北京的节点不断发出 ping 请求,用于测量端到端延迟。

我们做了两个实验,分别比较了在低网络负载和高网络负载情况下的单层 LEO 和 LEO/MEO/GEO 三层星座的节点端到端延迟。在实验中,链路利用率低于 95% 被认为是低网络负载,反之则为高网络负载。链路利用率通过调整链路的背景流量来设置。节点间的端到端延迟是运行 24 小时模拟时间后取的平均值。图 6、7 是运行后的仿真结果。

从仿真结果可以看出,在低负载的情况下(链路利用率为 90%),由于传输延迟起决定性作用,单层结构的性能优于三层结构。在高负载的情况下(链路利用率为 97%),处理延迟和排队延迟起决定性作用,此时三层结构的高带宽的优势开



图3 负载变化图

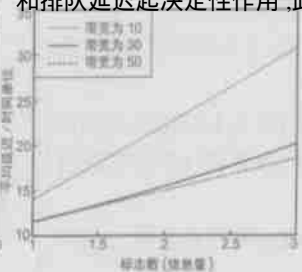


图4 不同带宽比较图

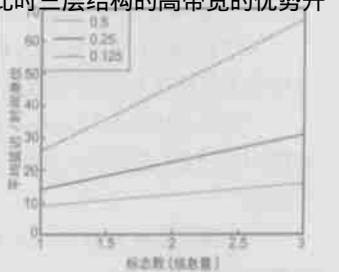


图5 不同链路延迟比较图

始显现,性能优于单层结构。

5 结束语

通过建立 LEO/MEO/GEO 三层卫星网络的 GSPN 模型,并将分析的结果与采用 OPNET 软件对该三层卫星网络模拟的结果进行比较,我们可以得出:在三层网络中 MEO 的高带宽在高负载的情况下可以有效地减少平均时间延迟,而其链路之间的传输延迟则是提高整个系统性能的瓶颈。所以随着网络负载的增加,LEO/MEO/GEO 三层卫星网络的性能明显优于单层 LEO 卫星网络。

参考文献:

- [1] C J Wang. Delivery time analysis of low earth orbit satellite work for seamless PCS[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(2): 389 - 396.
- [2] 胡剑浩,等.具有星际链路的 LEO/MEO 卫星移动通信网络性能分析[J].电子学报,1999,27(11):65 - 68.
HU Jian-Hao, WU Shi-Qi, LI Le-Min. Performance analysis for LEO/MEO mobile satellite communication systems with intersatellite link [J]. ACTA Electronica Sinica, 1999, 27(11): 65 - 68 (in Chinese).
- [3] C J Wang. Performance modeling of a class of low earth orbit satellite networks[A]. IEEE in Houston. GLOBECOM 1993 [C]. USA: IEEE Press, 1993. 1: 569 - 573.
- [4] M A Marsan. Stochastic petri nets: An elementary introduction[A]. Rozenberg G Lecture Notes in Computer Science [C]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990. 1 - 29.
- [5] M A Marsan, et al. A class of generalized stochastic petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems [J]. ACM Trans, 1984, (2): 93 - 122.
- [6] F Vatalaro, et al. Analysis of LEO, MEO, and GEO global mobile satellite systems in the presence of interference and fading[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(2): 291 - 300.
- [7] J W Lee, et al. Satellite over satellite (SOS) network: A novel concept of hierarchical architecture and routing in satellite network[A]. Proceedings of 25th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2000) [C]. Tampa, Florida, USA, 8 - 10 November, 2000. 392 - 399.
- [8] 马凯学,等.星间通信技术发展及共性问题研究[J].空间电子技术,2002,3:18 - 23. MA Kai-Xue, et al. Research on the development of inter-satellite communication technology and some common problems[J]. Space Electronic Technology, 2002, 3: 18 - 23.

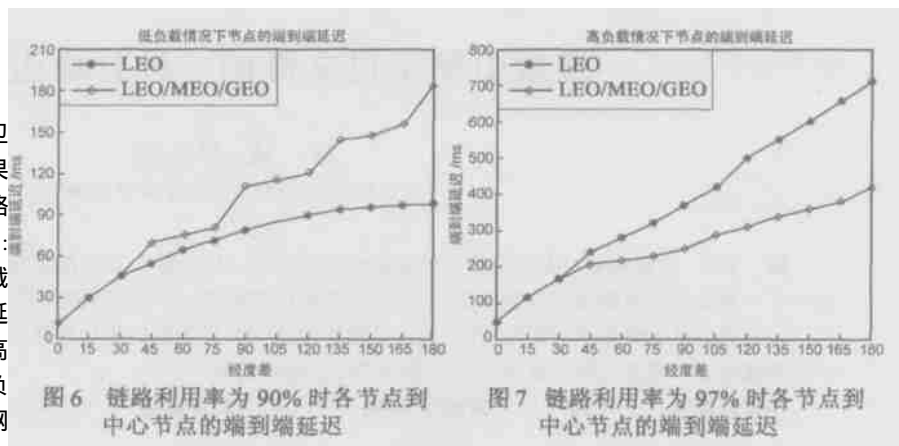


图 6 链路利用率为 90% 时各节点到中心节点的端到端延迟

图 7 链路利用率为 97% 时各节点到中心节点的端到端延迟

- [9] J G Walker. Satellite constellations [J]. J British Interplanetary Soc, 1984, 37: 559 - 571.
- [10] J F Ereau, et al. Modeling & simulation of a satellite constellation based on petri nets [A]. Reliability and Maintainability Symposium [C]. International Symposium on Product Quality and Integrity Annual, IEL on-line, Las Vegas, NU, USA, 22 - 25 Jan 1996. 66 - 72.
- [11] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
Chuang Lin. Stochastic Petri Nets and System Performance Evaluation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (in Chinese).
- [12] Ian F Akyildiz, et al. MLSR: A novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks [J]. IEEE Trans, 2002, 10(3): 411-424.

作者简介:



洪志国 男, 1977 年 2 月出生于湖北省黄冈市, 现在为中国科学院软件研究所博士研究生, 研究兴趣有并行处理、Petri 网络、网络性能分析和网络管理等。E-mail: hong_zhi_guo@yahoo.com.cn.



吴凤鸽 女, 1979 年月出生于河南省信阳市, 现在为清华大学计算机系博士研究生, 研究兴趣有卫星网络性能评价和网络控制等。