

基于 ns2 的 LEO 卫星网络路由算法模拟

金信苗

(浙江警官职业学院 杭州 310018)

摘要 空间组网技术是卫星技术发展的重要方向之一,它能够覆盖全球并支持多种业务,其关键技术之一是在具有星间链路的卫星网络中进行分组路由。本文简单分析了 LEO 卫星网络的路由特性,讨论了在卫星环境下进行模拟仿真的方法,具体介绍了 ns2 对卫星网络模拟的支持,并针对两种不同的路由算法进行了模拟与分析。

关键词 LEO 卫星网络,路由算法,ns2,网络模拟

Routing Protocol Simulation for Satellite Networks Based on NS-2

JIN Xin-Miao

(Zhejiang Police Vocational Academy, Hangzhou 310018)

Abstract Space network technology is one of the important directions of the technical development of the satellite. It can provide global coverage and support a lot kind of services. Packet routing in the satellite networks which have inter-satellite links is one of its key technology. This paper analyzes the routing issues in LEO satellite networks and discusses the methods of simulation experiments for satellite networks. Introduces the ns2 support to network simulation of the satellite networks concretely and implements two simulation experiments aiming at two kinds of different route algorithms.

Keywords LEO satellite network, Routing algorithm, ns2, Network simulation

1 引言

卫星网络在全球数据通信中正变得越来越重要。卫星网络不仅能够提供全球覆盖,具有连续的高带宽性能,而且还支持灵活和可扩展的网络配置^[1]。当前,全球有一半以上的区域不能通过地面网络覆盖,但通过使用卫星接口,在本地构建的网络可以很方便地与世界其他地方实现互联,并且卫星网络也可以作为地面网络的一个可选备份。由于在带有 ISL 的卫星网络中,每颗卫星可能同时与多颗其它卫星通过 ISL 相连接,信息可以通过多种不同的路径传输,并且由于 LEO 卫星的高速运动以及卫星网络拓扑的快速动态变化,因此构建卫星网络的一个技术挑战是开发特殊的路由算法。由于卫星网络环境的特殊性,使得所研究的路由算法应该具有使用较小的通信开销和处理能力计算出最优路径,并能够适应网络拓扑结构动态变化等特点,保证一定的服务质量。

模拟实验是网络研究领域中的一个具有特殊意义的方面,是研究过程中的重要工具。而模拟环境的假设、参数的设定或是模拟工具的选择等环节,在模拟实验中都会影响到实验结果^[2]。由于卫星网络本身的特点,使得物理实验研究方式的可行性不高。在很多情况下,采用数学方法对卫星网络进行建模和分析是一种有效的研究手段,但是现代卫星网络的复杂性使得网络数学建模难度增加,数学模型的很多前提假设难以成立,从而限制了数学模型方式的应用。而网络模拟仿真方式则克服了上述的缺点,能够方便地布置不同规模的卫星网络拓扑,灵活实现不同候选方案的替换,实时地控制实现的进度,因此,被广泛应用于卫星网络的性能分析、协议设计等方面。

本文简单概述了 LEO 卫星网络路由算法的研究现状,研

究了 ns2 关于卫星网络模拟的内部实现机制,并利用 ns2 进行对两种不同的 LEO 卫星网络路由算法进行了模拟。

2 LEO 卫星网络路由技术分析

2.1 LEO 卫星网络路由设计的难点

在卫星网络中实现路由的最大挑战是网络拓扑具有时变特性和太空环境对硬件技术的限制。其 ISL 的动态变化是卫星网络路由问题求解难点的根源,主要体现在以下几个方面:

1) ISL 的空间几何参数不断变化。ISL 长度、指向仰角和指向方位角等参数的不断变化使得路由算法优化参数不确定性增加。

2) ISL 可持续通信时间受限。受到星载设备跟踪能力和卫星间可见性条件的限制,轨道面间 ISL 在越缝(Cross-seam)或者经过极地高纬度地区及卫星间可视角过小时,ISL 就会断开。

同时,由于受空间自然条件的影响,星上设备的处理能力和存储容量都受到大大限制,而且卫星一旦发射就很难进行硬件升级,这就决定了路由算法的实现必须尽量简单。

虽然 ISL 持续变化增加了路由问题的难度,但 ISL 的规律性同时也为解决路由问题提供了有利条件^[3]。这些规律性主要表现为可预见性,周期性和固定性。

2.2 LEO 卫星网络路由算法的研究现状

LEO 卫星网络路由算法是研究其他类型卫星网络路由算法的基础,典型的参考模型是 Iridium^[4] 和 Teledesic^[5] 卫星星座。根据采用的网络层机制,可以把卫星网络的路由技术分为面向连接的卫星网络路由和面向非连接的卫星网络路由。面向连接的路由指在星上实现 ATM 交换或类似 ATM 的交换,面向无连接的路由则指在星上实现分组的分布式转

发。表1从多方面比较了现有典型LEO卫星网络路由算法^[6]。

表1 主要LEO卫星网络路由算法比较表

算法名称	DT-DVTR	AR	FSA	DDR	IRSN
路由类型	ATM	链路交换	链路交换	IP	IP
链路分配	离散化,周期	单跳	离散化,周期	未限定	未限定
切换	需要,较少	需要,较多	需要,较多	不需要	需要,较多
路由特征	源节点	本地节点	源节点	本地节点	本地节点
优化目标	切换率	ISL利用率	网络流量	时延	利用率
网络机制	连接	连接	连接	非连接	非连接

3 ns2 中卫星网络模拟的实现机制

3.1 ns2 特点

ns 是美国 DARPA 支持的项目 VINT 开发通过的多协议网络模拟软件,通过为网络研究者提供一套模拟工具,促进各种新的网络协议的设计和和实施。目前的最高版本是 UC Berkeley 发布的 ns2。

功能上,ns2 支持有线网络和无线网络的协议模拟。有线网络模拟包括路由协议、传输协议、流量生成、队列算法、

QoS 支持等模块。无线网络模拟支持包括 Ad Hoc 网络路由协议,移动 IP, sensor-MAC, 卫星网络等模块。ns2 主要特点如下:

- 1) 基于离散时间驱动的仿真方式,仿真效率高。
- 2) 使用两种语言 C++ 和 Otel 编写代码,兼顾效率和灵活性。C++ 执行效率高,用于编写底层网络协议的代码,Otel 交互性好,用于编写网络结构配置和网络模拟场景的代码。
- 3) 面向对象的建模方式,易于对现实网络进行建模。
- 4) 真实网络交互。仿真 Emulation 接口提供与真实网络交互功能。可以实时地从真实网络中导入流量,或者将流量导出到真实网络中。
- 5) 动画显示结果。ns 与 nam 软件结合,能够动画显示 ns 的模拟结果。
- 6) 多平台的支持。ns 可以运行在 FreeBSD、Linux、Windows、Mac 等平台上。

3.2 ns2 对卫星网络的支持

ns2 提供一定程度的卫星网络支持,可以模拟地球同步卫星和极地 LEO 卫星,模拟的内容包括 MAC 协议、数据链路、传输协议和路由协议等。图 1 显示了 ns2 对卫星网络模拟支持的总体框架^[7]。

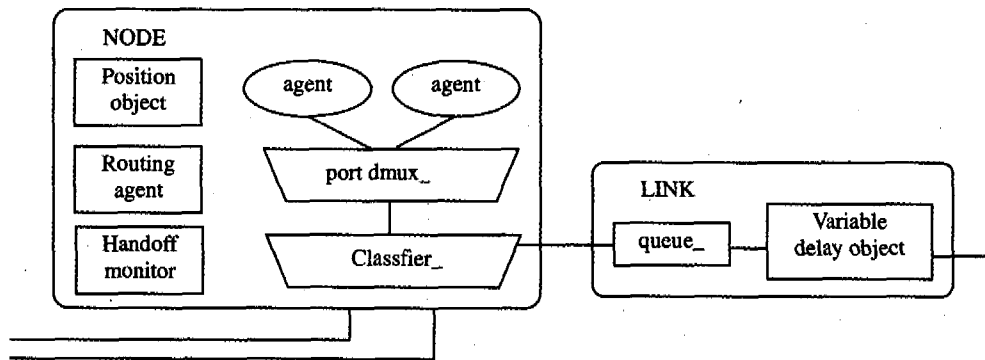


图1 ns2 对卫星网络支持的总体框架

具体说来,ns2 在如下方面对卫星网络模拟进行了扩展:

1) 节点定义:增加了对对象 SatNode,用于定义三种节点,同步卫星节点,非同步卫星节点和地面节点。卫星节点中有一个统一的入口(entry_)指向一个地址分类器(classifier),每个节点中都包含一个或几个链路栈,这个栈的入口是一个

SatLinkHead 对象,这个对象为应用程序提供了一个统一的访问链路栈的接口,通过它再来访问链路栈中的各层对象。当一个分组经过链路栈中的各层自上而下的离开一个链路,它被发送往对应的另一个节点的入口。节点结构如图 2 所示。

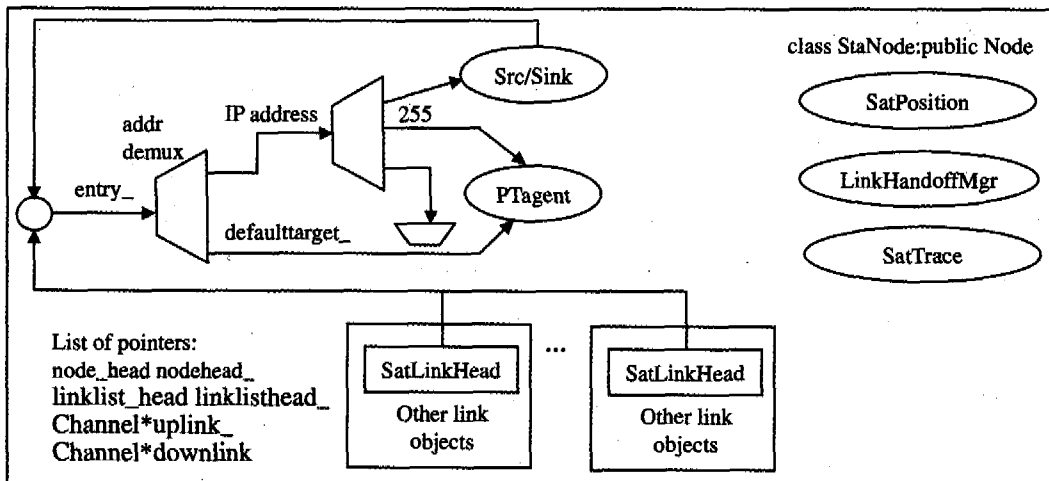


图2 卫星节点的结构示意图

2) 星座定义:增加了对对象 position,用于定义卫星星座参数,包括高度,轨道平面数,轨道倾角,星间链路,星地链路,地

面仰角等。地面节点的 position 对象包含经度和纬度参数；同步卫星节点的 position 对象包含地面经度、地面纬度和地面高度参数；非同步卫星节点的 position 对象包含轨道高度、轨道倾角和轨道纬度参数。

3)链路定义:ns2 从两个方面定义星间和星地的卫星链路。一方面,节点通过 add-interface 过程设置链路的网络接口;另一方面,模拟程序通过 add-isl 设置星间链路的信道,通过 add-gsl 设置星地链路的信道。一个卫星节点相关的每一条链路都是以一个网络接口栈的形式来定义的,通过管道(channel)连接已建立起链路的两个节点,该管道实际连接到网络接口栈的物理层。一个链路栈的入口是一个 SatLinkHead 对象,它是 LinkHead 的子类,目的是提供一个统一的应用程序接口。其中包含了指向栈中各层对象的指针,如:LL, Queue, MAC, Error model, 以及两个 phy 对象。通过 SatLinkHead 还可以知道对应的链路是星间链路(isl)还是星地链路(gsl)。最后,对象 SatLinkHead 中包含一个 bool 型的变量 linkup_用来指示该链路是否已至少连接了一个节点,即该链路是否就绪。

图 3 显示了一个链路栈的结构图。

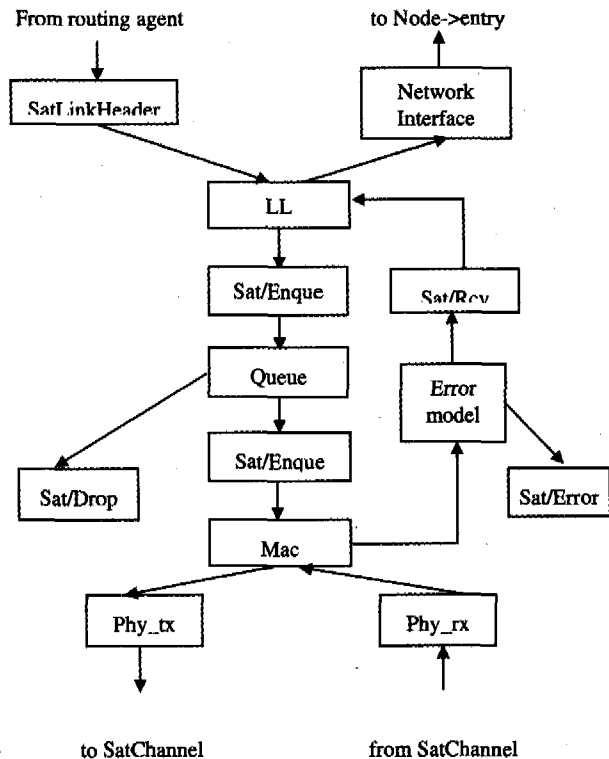


图 3 链路栈的内部结构

4)切换管理:对象 HandoffManager 负责卫星链路的切换。ns2 处理三种链路切换,分别为星地链路切换、越缝链路切换和极地地区链路关闭。

5)分组路由:卫星网络中的路由不能使用所有的 ns2 中的路由协议,这是因为 ns2 中的很多路由协议都要求使用 ns2 中传统的链路模型,但是对于卫星网络的链路模型来说这是不适合的。当前 ns2 中支持的卫星网络路由协议是一种集中式的路由协议,它完全是用 C++ 代码来实现的。当网络的拓扑结构发生变化时,一个集中式的路由计算引擎收集整个网络的拓扑结构信息,为所有节点计算新的路由信息。同时将这个路由信息填入每个节点(包括地面终端节点)的分组转发表中。

除此之外,ns2 标准包中也给出了若干卫星网络模拟的例子,包括 Iridium 系统的模拟实现,Teledesic 系统的模拟实现,极轨道和地球同步卫星混合星座的模拟实现。

总的来说,ns2 功能比较全面,并且公开源代码,开放性非常好。但是,ns2 对卫星网络提供的支持仍然有限,为利用 ns2 模拟其他卫星网络路由协议,需对其进行扩展,并重新编译,在开发路由算法时,开发者需要较大的工作量来修改各种链路接口的定义。

4 ns2 卫星网络路由算法模拟和结果分析

分别模拟 ns2 中自带的卫星网络集中式路由算法和一种基于分时模型的 LEO 卫星网络路由算法(Discrete Time based Routing Algorithm,DTRA)。DTRA 根据卫星网络拓扑变化的周期性、规律性和可预测性,采用分时模型,将系统周期分为若干个时间片。在每个时间片内,使用无环多路径算法在地面为各颗卫星集中计算路由表,卫星节点只需根据加载好的路由表进行数据转发。DTRA 不仅能够用于极地星座,也能够用于倾斜星座。

模拟环境 1 在地球上随机取两点,每隔两秒钟随即改变这两点的位置,并且由它们之间发 ping,时间跨度为 20000 秒,输出结果为对于不同的节点对,ping 报文的传输延迟时间。分别采用集中式路由协议和 DTRA 路由协议,模拟结果如图 4、图 5:

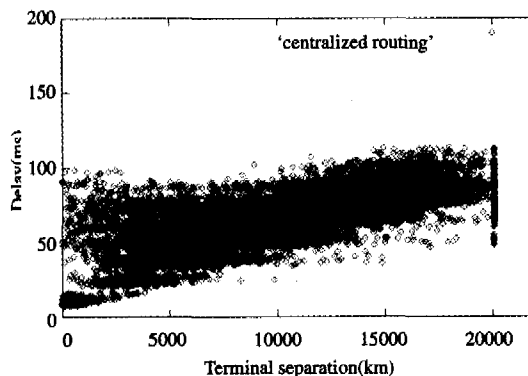


图 4 集中式路由实验 1 模拟结果

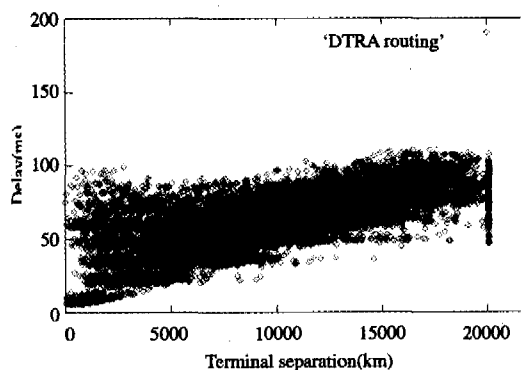


图 5 DTRA 路由实验 1 模拟结果

模拟环境 2 每隔两秒随机地选择两颗卫星节点进行分组的发送,为检测网络负载较大时的性能,引进背景流量,使网络中有足够多的其他数据在传输,使要考察的分组发生拥塞的概率增加。我们选择背景总量为随时间离散增加,队列长度取 50 个分组,模拟表明 DTRA 算法的丢包率为

0.2722%，而集中式路由算法的丢包率为 0.3896%，而且随着背景流量的不断增加，DTRA 算法的丢包率性能更加明显优于集中式路由，同时时延性能也在一定范围内有所提高。

模拟结果表明，在网络负载较低的情况下，集中式路由和 DTRA 路由性能基本一致；但当网络负载增大时，DTRA 路由的时延性能、丢包率性能都明显优于集中式路由，而且链路利用率也较高。可见，DTRA 算法通过备份路由，充分利用了网络资源，缓解了拥塞问题。

结束语 对卫星网络路由算法的模拟由于其特殊的网络环境一直以来都是一个比较活跃的研究课题。利用 ns2 进行卫星网络协议的模拟与仿真是一个非常复杂的过程，需要大量时间和工作的积累。同时，在具体的模拟过程中也需要结合卫星网络技术的发展不断改进和调整模拟仿真的手段和方法，以便能够指导和推动整个卫星网络的综合模拟与仿真。卫星网络协议的模拟与仿真是卫星网络实际应用的重点和难点，值得不断深入探讨和研究。

(上接第 33 页)

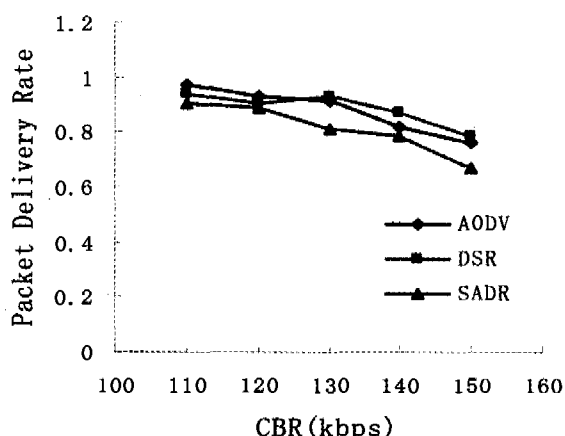


图 7 分组传递率随 CBR 的变化

结论 本文提出了一种安全匿名的按需路由协议 SADR。通过对安全性和匿名性的分析，SADR 可以阻止重放、伪造、篡改等等的攻击。并且在保证安全性的同时，也实现了身份保密、强位置保密和路由匿名性，使得恶意节点的被动攻击难于实施。当然 SADR 也存在不足之处，比如对新加入节点与网络中其它节点之间的共享密钥的协商问题，还有在性能效率上有待进一步的提高的问题，这些将是以后研究的方向。

致谢 在此，我们向对本文的工作给予支持和建议的同行，尤其是华中科技大学信息安全实验室各位老师和同学表示感谢。

参考文献

- Papadimitratos P, Haas Z J. Secure routing for mobile ad hoc networks. In: SCS Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (CNDS 2002), January 2002. 2~21
- Sanzgiri K, Dahill B, Levine B N, et al. A secure routing protocol for ad hoc networks. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2002. 78~87
- Yang H, Meng X, Lu S. Self-organized network-layer security in mobile ad hoc network. In: Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security, 2002. 11~20
- Hu Y C, Perrig A, Johnson D B. Ariadne: A secure ondemand routing protocol for ad hoc networks. In: Proceedings of the

参考文献

- 王鹏, 白建军, 卢泽新. 卫星网络协议的仿真与模拟技术研究. 计算机工程与科学, 2004, 26(5): 4~6
- 续欣, 等. 卫星信道性能的网络模拟. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 1056~1059
- Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I, et al. IP Routing Issues in Satellite Constellation Networks[J]. International Journal of Satellite Communications, January/February 2001, 19(1): 69~92
- Brunt P. IRIDIUM: Overview and Status[J]. Space Commun., vol. 14, no. 2, 1996, 14(2): 61~68
- Sturza M A. Architecture of the TELEDESIC Satellite System [C]. In: Proceedings of International Mobile Satellite Conference, 1995. 212~218
- 孙利民, 卢泽新, 吴志美. LEO 卫星网络的路由技术. 计算机学报, 2004, 27(5): 659~667
- Henderson T R, Katz R H. Network Simulation for LEO Satellite Networks[A]. In: Proceeding of 18th International Communication Satellite Systems Conference[C]. Oakland, CA, Apr 2000
- Hu Y, Li V O K. Satellite-based internet: A tutorial[J]. IEEE Communications Magazine, March 2001, 39(3): 154~162

- Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2002), 2002. 12~23
- Hu Y C, Johnson D B, Perrig A. SEAD: Secure efficient distance vector routing for mobile wireless ad hoc networks. In: Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 2002), June 2002. 3~13
- El-Khatib K, Korba L, Song R, et al. Secure dynamic distributed routing algorithm for ad hoc wireless networks. In: International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'03), 2003. 359~366
- Kong J, Hong X. ANODR: Anonymous on demand routing with untraceable routes for mobile ad-hoc networks. In: Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'03), 2003. 291~302
- Zhu Bo, Wan Zhiguo, Kankanhalli M S, et al. Anonymous secure routing in mobile ad-hoc networks. Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference, 2004. 102~108
- Hopcroft J E, Ullman J D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. Addison-Wesley Publishing Company, 1979
- Reed M G, Syverson P F, Goldschlag D M. Anonymous connections and onion routing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, (Special Issue): 482~494
- Raymond J F. Traffic analysis: Protocols, attacks, design issues, and open problems. In: DIAU00, Lecture Notes in Computer Science 2009, 2000. 10~29
- Pfitzmann A, Pfitzmann B, Waidner M. ISDN-MIXes: Untraceable communication with very small bandwidth overhead. In: Proc. GI/ITG-Conference "Kommunikation in Verteilten Systemen" (Communication in Distributed Systems), 1991. 451~463
- Berthold O, Federrath H, Kohntopp M. Project anonymity and unobservability in the internet. In: Computers Freedom and Privacy Conference 2000 (CFP 2000), Workshop on Freedom and Privacy by Design, 2000
- Kesdogan D, Egner J, Bsckes R. Stop-and-go-MIXes providing probabilistic anonymity in an open system. In: Second International Workshop on Information Hiding, Lecture Notes in Computer Science 1525, 1998. 83~98
- 蒋宗礼, 姜守旭. 形式语言与自动机理论. 北京: 清华大学出版社, 2003
- Gong L, Needham R, Yabalom. Reasoning about Belief in Cryptographic Protocols. In: Proceeding of the 1990 IEEE Symposium on Research in Security and Privacy, IEEE Computer Society Press, 1990. 234~248
- Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. Mobile Computing Systems and Applications, 1999. In: Proceedings WMCSA '99. Second IEEE Workshop, 1999. 90~100
- Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. Mobile Computing, 353, 1996