

多层卫星网络链路中断容忍路由策略设计

郭炎鑫 郑刚

(中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 链路中断和接续对卫星网络路由有重要影响, 该文针对多层卫星网络, 设计了链路中断容忍路由策略, 利用非均匀时间段内卫星网络拓扑结构的可预测性进行路由表计算, 采取动态的拥塞控制机制和洪泛策略, 解决由于卫星运动、通信设备故障引发链路中断情况下的路由问题。仿真结果表明, 该路由策略具有较高的链路利用率, 能够减少动态路由计算中时延信息收集和星上路由表生成给卫星节点带来的时空开销。

关键词: 多层卫星网络; 时延可容忍网络; 中断可容忍性; 星间链路; 路由算法

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1892-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01048

Design of a Link Disruption Tolerant Routing Strategy in Multilayered Satellite Network

Guo Yan-xin Zheng Gang

(Institute of Software Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: Link disruption and connection have a considerable impact on satellite networks routing issues. A link disruption tolerant routing strategy is proposed for multilayered satellite networks. In this strategy, the route table is calculated by means of the topology predictability of satellite networks in nonuniform slots to resolve the routing problems under link disruption circumstances caused by satellite movements, and a dynamic congestion control mechanism and a flood strategy are suggested to ensure the packets' correct forwarding during system failure period. The simulation results show that this strategy has higher link utilization and less time-space cost of dynamic route calculation, including delay information collection and route table generation.

Key words: Multi-layered satellite network; Delay Tolerant Network (DTN); Link disruption tolerant network; Interstellar links; Routing algorithm

1 引言

卫星网络是由不同轨道上多种类型的卫星互相连接构成的系统, 卫星节点通过星间链路(ISL)提供通信路径, 实现传送信号、提供路由和转发数据包^[1]。充分发挥高、中、低轨卫星性能来构建能够为全球范围内的用户提供宽带的综合业务, 保证服务质量(QoS)的多层卫星网络(Multi-layered satellite network)已经成为未来卫星通信网络发展的趋势。因此, 开发适合于多层卫星网络的路由策略成为卫星通信领域研究的重点。

典型的多层卫星网络路由方法包括分层的 QoS 路由协议(HQRP)^[2]、多层卫星路由算法(MLSR)^[3]、卫星分组和路由协议(SGRP)^[4]。HQRP 适用于面向连接的多层卫星网络(SOS), 能够提供长距离依赖

(LDD)业务的服务质量保证。MLSR 适用于 LEO/MEO/GEO 3 层 IP 卫星网络, 通过收集时延信息, 高层卫星分布计算路由表。SGRP 适用于 LEO/MEO 双层 IP 卫星网络, 采用快照和分组决策的策略, 根据时延报告计算最小路径。这些多层卫星网络路由算法都是动态地进行时延信息收集和路由表计算的, 随着网络规模的增大和卫星数量的增多, 将会给卫星网络带来较大的时空开销, 路由计算的时延和出错的概率也会急剧增大。卫星网络具有长距离无线链路通信的高时延性和信道传输数据率的不对称性, 卫星运动、空间环境影响或其它故障性因素会引发卫星网络链路的断开, 因此卫星网络又可被看做一种典型的延时可容忍网络^[5,6](Delay Tolerance Network, DTN)。Jain 等人明确定义了 DTN 网络中的路由问题^[7]。Zhang^[8]又将 DTN 路由策略分为确定性路由方案和随机性路由方案。虽然这些研究成果对研究卫星网络路由有一定的启示作

2009-07-24 收到, 2010-03-19 改回

中国科学院创新基金(CXJJ-09-S03)资助课题

通信作者: 郭炎鑫 xin305@163.com

用, 但是它们还没有专门针对卫星网络自身运动的规律性和可预测性来考虑路由方法。

卫星网络中, 由卫星节点的规律性运动所引起的链路中断和接续是可预测的, 测算它可以获知整个卫星网络的动态拓扑变化, 从而为卫星网络通信路由的计算提供有利条件; 由空间环境或通信设备故障所引起的链路断开是不可预测的, 属于故障性中断, 要求路由策略能够提供一定的冗余路由机制来确保分组在系统故障期的正确转发。本文以提供对卫星网络链路可预测性中断和故障性中断的可容忍性为目标, 设计了一种基于链路状态的多层卫星网络链路中断容忍路由策略(Disruption Tolerant Routing Strategy, DTRS)模型。其基本思想是利用非均匀时间段内卫星网络的空间可预测性进行路由表的计算, 从而解决卫星网络的可预测性中断问题, 并提供动态的拥塞控制机制和基于洪泛思想的故障性中断容忍机制。它不但能够减少卫星节点进行时延信息收集和路由表计算所带来的时空开销, 解决卫星资源受限的问题, 而且保证对卫星节点或星际链路失效时网络中断的可容忍性。

2 多层卫星网络链路预测模型

2.1 多层卫星网络结构

本文中所探讨的多层卫星网络(Multi-Layered Satellite Network, MLSN)结构是一种 3 层卫星网络结构。网络结构可以分为 LEO, MEO, GEO 3 层, 如图 1 所示。GEO 层由 N_G 颗高轨卫星组成; MEO 层是由中轨卫星星座组成, 共有 N_M 颗中轨卫星; LEO 层是由低轨卫星星座组成的, 共有 N_L 颗低轨卫星。MLSN 体系结构中主要包括两种链路: 星间链路 ISL 和用户数据链路 UDL。其中星间链路可分为层内和层间两种。层内星间链路又分轨道内和轨道间两种。

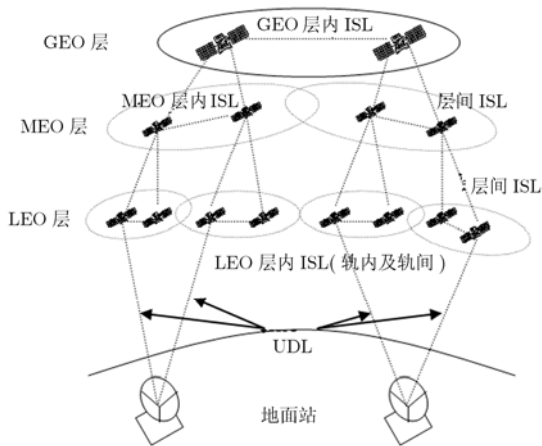


图 1 多层卫星网络结构示意图

2.2 多层卫星网络星间链路预测模型

假设每颗卫星在地心坐标系中的位置矢量 $r = (x, y, z)$, 卫星位置在地心坐标系中的坐标可由下式计算:

$$\begin{cases} x = R \cos \gamma \cos \beta \cos \alpha - R \sin \gamma \sin \beta \\ y = R \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + R \sin \gamma \cos \beta \\ z = R \cos \gamma \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中 R 为卫星轨道半径; α 为卫星轨道倾角; $\beta = i\pi/n$, 为卫星所在轨道与赤道平面交线与 y 轴正半轴的夹角, n 为轨道条数, i 为轨道编号; $\gamma = \omega t + \gamma_0$, 为 t 时刻卫星相位, γ_0 为初始相位, ω 为角速度, t 为卫星的运行时间。

地心到星间链路所在直线的距离与地球半径的差值为 Δh , 则星间可见条件如图 2 所示。

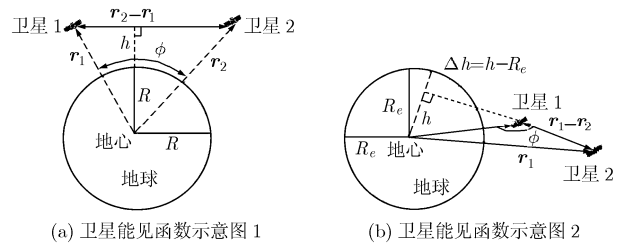


图 2 星间可见条件

在图 2(a)中 Δh 为正, $h = \frac{|r_1| \cdot |r_2| \cdot \sin \phi}{|r_2 - r_1|}$, 其中

$$\phi = \arccos \left(\frac{(r_1 \cdot r_2)}{|r_1| \cdot |r_2|} \right)$$

为连接地心与两颗卫星的两个位置矢量之间的夹角。这样, 描述两颗卫星相互之间是否可见的可见函数可表示为: $\Delta h = h - R$ 。只要 $\Delta h \geq H$ 就表示两颗卫星是可见的。 H 为避开云层等干扰层面的最低可见高度。

在图 2(b)中 Δh 为负: $\phi = \arccos \left(\frac{r_1 \cdot (r_1 - r_2)}{|r_1| \cdot |r_1 - r_2|} \right)$

$> 90^\circ$ 时两颗卫星就是可见的, 其中 ϕ 为 r 和 $r_1 - r_2$ 的夹角。

两颗卫星满足可见条件就可以建立链路进行通信。通过卫星任意运行时刻的位置可以计算它们之间的链路长度。

3 基于链路状态的多层卫星网络链路中断容忍路由策略

DTRS 路由模型首先将卫星网络拓扑分解为若干离散的静态网络拓扑图, 解决卫星网络实时变化的问题; 基于卫星网络链路的可预见性和规律性在地面站上预先计算好卫星的路由信息, 并将这些信

息在卫星被发射之前就存入卫星存储器中,从而解决卫星链路的可预测性中断问题。在计算路由表的过程中,充分考虑到卫星网络中大部分业务的实时性要求和低层数据转发跳数过多导致的时延过长等因素,采用传播时延和排队时延作为链路权值,并引入适当的跳数限制在转发跳数和路径传输时延之间进行折中。最后针对网络拥塞情况和链路故障的可能性,分别采用次优路由和分组洪泛机制提供卫星网络的冗余路由,保证系统能够提供故障期的路由转发服务和对卫星网络故障性中断的可容忍性。

3.1 拓扑周期离散化

DTRS 利用卫星网的分时静态拓扑的特性,将系统周期性地划分为有限个非均匀时间段,每个时间段内网络拓扑结构不变。时间段的选取不仅要保证能够及时地反应卫星网络拓扑结构的变化,同时要尽量减少路由表的数目,从而降低对星上存储空间的要求。对 MLSN, 本文将周期 T 分割为非均匀的时间片 $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$, 从而得到离散时间序列 $S_T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n\}$ 。卫星链路的通断仅发生在离散时间点 t_1, t_2, \dots, t_n , 即在 t_i 时间点上, 必然存在某条链路连通或断开。在时间间隔 $[t_i, t_{i+1})$ 内, 卫星的动态拓扑结构映射为固定拓扑结构。具体计算过程如下: (1) 初始化离散时刻集合 $S_T = \phi$ 以及链路通断时刻集合 $T = \phi$; (2) 根据 2.2 节卫星可见性计算, 得到卫星运行周期内所有链路的通断时间及链路维持时间, 将每条链路的通、断时刻加入集合 T 中; (3) 将 T 中时刻按照先后顺序排列即得离散时间序列 $S_T = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ 。

3.2 最优、次优路由选择

对 3.1 节中得到的离散序列集合中的每个时刻可以利用卫星运行的轨道进行链路信息的预测, 这样就获知了整个卫星网络的拓扑信息, 包括链路的通断信息、星际链路长度。DTRS 将所有的卫星同等对待, 从而根据生成的瞬时卫星网络拓扑结构图来计算最优路径。

一方面, 由于卫星网络中的大部分业务对实时性都有不同程度的要求, 所以保证数据转发的低时延就显得尤为重要。在 DTRS 中基于链路状态计算路由表的过程中, 所使用的链路权值主要是链路的传播时延, 即选取时延最短的路径作为最优路径存入路由表中。另外, 卫星是快速运动的, 如果数据转发的时间过长可能导致现在所使用的链路很快又失效, 所以在链路权重中加入剩余时间因素。另一方面, 随着跳数的增多会相应地增大星上处理时延和排队时延, 因此必须在转发跳数和路径传输时延之间进行折中, 如果通过低层卫星链路进行传输的

跳数过多, 那么就选择高层链路进行传输会更加可靠和快速, DTRS 通过在链路权值中引入适当的排队时延和一定的跳数限制来实现的。

假设在一个系统周期内卫星 s 和卫星 d 之间的链路 $ISL_{s \rightarrow d}$ 发生 N 次通断切换。那么在 t 时刻 $ISL_{s \rightarrow d}$ 的剩余时间定义为

$$T_{s \rightarrow d}(t) = \begin{cases} t_{s \rightarrow d}^{\text{off}}(k) - t, & t_{s \rightarrow d}^{\text{on}}(k) \leq t < t_{s \rightarrow d}^{\text{off}}(k) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $t_{s \rightarrow d}^{\text{on}}(k), t_{s \rightarrow d}^{\text{off}}(k)$ 分别为第 k 次链路建立和断开的时间, $k = 0, 1, \dots, N$ 。

卫星 s_1, s_2, \dots, s_n 以及它们之间的星间链路 $ISL_{S_1 \rightarrow S_2}, ISL_{S_2 \rightarrow S_3}, \dots, ISL_{S_{n-1} \rightarrow S_n}$ 构成一条完整的传输路径 P , 则该路径的权重定义为

$$W(P) = w_1 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{D(S_i)}{T_{S_i \rightarrow S_{i+1}}} + w_2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{D(ISL_{S_i \rightarrow S_{i+1}})}{T_{S_i \rightarrow S_{i+1}}} \quad (3)$$

其中 $D(S_i)$ 为数据包在卫星节点 S_i 上的排队处理时延, 在路径选择算法中设为固定值, $D(ISL_{S_i \rightarrow S_{i+1}})$ 为 $ISL_{S_i \rightarrow S_{i+1}}$ 链路的传播时延, w_1, w_2 为路径加权系数, 且 $w_1 + w_2 = 1$, 仿真中均设置为 0.5。

根据路径权重的定义, 对 3.1 节 S_T 中的时间序列分别利用 Dijkstra 算法从源卫星 s 到目的卫星 d 的路径集合 $p(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)\}$ 中选取时延最短的最优路径为

$$P_{s \rightarrow d}(t) = \begin{cases} P_1(t), & \exists P_1(t) \text{ s.t. } W(P_1(t)) = \min\{W(P_i(t)), \\ & P_i(t) \in p(t)\} \wedge (H(P_i(t)) \leq 4) \\ P_2(t), & W(P_2(t)) = \min\{W(P_i(t)), \\ & P_i(t) \in p(t)\} \wedge (H(P_i(t)) > 4) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $H(P_i(t))$ 为路径跳数, 设置为 4。

假设最优路径为 $P_{s \rightarrow d}(t) = \{(s, s_1), (s_1, s_2), (s_2, s_3), (s_3, s_4), (s_4, d)\}$, 要求得从源卫星 s 到目的卫星 d 的次优路径, 首先将已经求得的最优路径上的所有链路从卫星网络拓扑结构图中删除, 从而形成一张新的卫星网络拓扑结构图, 再次利用 Dijkstra 从源卫星 s 到目的卫星 d 的新的路径集合 $p'(t) = \{P'_1(t), P'_2(t), \dots, P'_m(t)\}$ 中选择时延最短路径即为次优路径

$$P'_{s \rightarrow d}(t) = \begin{cases} P'_1(t), & \exists P'_1(t) \text{ s.t. } W(P'_1(t)) = \min\{W(P'_j(t)), \\ & P'_j(t) \in p'(t)\} \wedge (H(P'_j(t)) \leq 4) \\ P'_2(t), & W(P'_2(t)) = \min\{W(P'_j(t)), \\ & P'_j(t) \in p'(t)\} \wedge (H(P'_j(t)) > 4) \end{cases} \quad (5)$$

3.3 拥塞控制机制

网络中卫星链路的可预测性变化使得卫星网络

拓扑结构的变化,但由于卫星通信的大时延特性,数据包在到达目的卫星之前要经历相对较长的时间,DTRS 是根据分组到达时间和目的卫星来确定下一跳的,这样就保证了业务数据传输的连续性和正确性。

但是,如果某条链路上的流量负载增加过快,可能导致该链路发生拥塞^[9]。本文通过监测卫星出口队列占用情况来判断网络是否拥塞。

定义卫星出口队列空闲比: $R = 1 - U/T$, 其中 U 表示已占用队列长度, T 为总队列长度。

λ 为拥塞门限,规定空闲队列的最小长度,其值根据网络承载流量进行配置。 $R \leq \lambda$ 意味着该链路流量负载增加过快。值得注意的是某链路发生故障性中断也可以引发该链路上出口队列空闲比较大,所以必须借助于简单的链路状态报告机制获知该链路是否中断,从而判断该链路是拥塞还是故障性中断。如果 $R \leq \lambda$ 且链路无中断则说明该链路发生拥塞,否则就是故障性中断的情况,下一节将详细讨论。针对链路拥塞情况,将后续到达分组路由到次优路径下一跳卫星链路上,从而缓解发生拥塞链路的业务转发强度。如果到次优路由下一跳卫星的链路仍然拥塞,那么就将动态选择一跳出口队列空闲比最大的链路进行转发,选择过程如下:(1)使用简单的链路状态报告机制获得当前时刻卫星 s 的所有邻接卫星 $S_A(s) = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, $\exists \text{ISL}_{s \rightarrow s_i}$; (2)计算到所有邻接卫星的出口队列空闲比 R_i , 确定其中最大者 $R_{\text{next}} = \max\{R_i\}$, 对应的邻接卫星为 s_{next} ; (3)如果 $R_{\text{next}} = 1$, 则将分组通过 $\text{ISL}_{s \rightarrow s_{\text{next}}}$ 转发,否则将分组挂到 $\text{ISL}_{s \rightarrow s_{\text{next}}}$ 队列中。

3.4 故障性中断容忍机制

从 3.3 节可知,如果某条链路出口队列空闲比 $R \leq \lambda$, 并且通过简单的链路状态报告机制获知该链路已经发生中断,那么卫星网络发生了不可预测的故障性中断。DTRS 采用类似洪泛的机制来解决卫星网络不可预测的中断。具体过程如下:

(1)如果分组要从卫星 d_1 发往卫星 d_2 , t_k 时刻到达卫星 s , 该卫星到最优下一跳卫星 $s(P_{s \rightarrow s_1}(t_k))$ 和次优路径下一跳卫星 $s(P'_{s \rightarrow s_1}(t_k))$ 的链路均发生了中断,则启动洪泛路由过程;

(2)使用简单的链路状态报告机制获得当前时刻卫星 s 的所有邻接卫星 $S_A(s) = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, $\exists \text{ISL}_{s \rightarrow s_i}$;

(3)卫星 s 向所有邻接卫星节点发送洪泛消息;

(4)邻接卫星节点 s_i 收到洪泛消息后就查询路由表,如果当前时刻经过路由转发成功,就发送成功应答消息回到卫星 s , 否则邻接卫星节点 s_i 启动

洪泛路由过程;

(5)洪泛发起节点收到第 1 条成功应答消息就完成洪泛过程,如果该节点还有上一级洪泛发起节点,那么就向上一级洪泛发起节点发送成功应答消息,如果收到的全部是失败应答消息,则向上一级洪泛发起节点发送失败应答消息。

4 路由策略仿真及性能评价

4.1 仿真设置

本文是基于 HLA 框架的多层卫星网络仿真^[10]系统来实现路由策略的仿真。仿真时间为 1440 min,即一天时间。采用的 LEO/MEO/GEO 3 层卫星网络的轨道参数如表 1 所示。

表 1 卫星轨道参数

参数	卫星层		
	GEO	MEO	LEO
卫星数目(颗)	3	10	48
轨道高度(km)	35786	10355	1400
轨道倾角($^{\circ}$)	0	45	52
轨道周期	24h	6h	114 min
轨道数目	1	2	8
星座类型	同步轨道	Walker delta	Walker delta

4.2 仿真结果及性能评价

仿真主要是对比 DTRS 路由策略和 MLSR 路由策略的性能,分以下几个方面进行:

(1)端到端平均时延 通过全球均匀分布的 300 对用户相互转发数据,发送数据的流量模型为近似的 Poisson 分布,统计到的端到端平均时延如图 3 所示,由于 DTRS 对每颗卫星同等对待,链路权重中传播时延和传输时延起确定性作用,而 MLSR 仅在各层的卫星簇内严格按照最短路径算法计算路由,所以 DTRS 路由策略的端到端平均时延要比 MLSR 路由策略的短很多。

(2)总链路利用率 如图 4 所示,DTRS 路由策略的总的链路利用率接近 100%,而 MLSR 路由策略的总链路利用率不足 50%。MLSR 路由策略将每个 LEO 卫星簇看做一个 LEO 卫星节点来形成网络拓扑图,许多 LEO 与 GEO 卫星之间不可直达,不同卫星簇内卫星之间必须经过上层卫星,不论它们之间是否存在时延更短的层内路由,所以并没有充分利用层内链路,而且会给层间链路造成一定的瓶颈;DTRS 路由策略是将 3 层所有卫星融汇到一张拓扑图中进行最短路径的计算,能够更加均衡的使用星际链路。

(3)LEO 层内链路利用率 如图 5 所示, DTRS 路由策略比 MLSR 路由策略的 LEO 层内链路利用率大很多, 因为与总链路利用率中相同的原因, MLSR 将 LEO 卫星分簇后, 许多分属于不同簇的 LEO 卫星实际上存在时延较小的路径甚至是直达链路, 而 MLSR 却将它们之间的路由下一跳都设置为它们的 MEO 层管理者卫星, 这样不仅降低了 LEO 层内链路利用率, 而且会增加端到端时延。

(4)MEO 层内链路利用率 如图 6 所示, DTRS 路由策略下的 MEO 层内链路利用率较大, 原因与 LEO 层内链路利用率的原因相同。

(5)GEO 层内链路利用率 如图 7 所示, DTRS 路由策略和 MLSR 路由策略下的 GEO 层内链路利用率相等都几乎为 100%, 这是因为两种策略对 GEO 层内路由的计算方法一样。

(6)LEO-MEO 层间链路利用率 如图 8 所示,

DTRS 路由策略的 LEO-MEO 层间链路利用率较大。

(7)MEO-GEO 层间链路利用率 如图 9 所示, DTRS 路由策略下的 MEO-GEO 层间链路利用率较大, 但是 MLSR 策略下的 MEO-GEO 层间链路利用率相对 LEO-MEO 层来说又提高了很多, 这是因为 MLSR 中 GEO 与 LEO 之间的路由很多要经过 MEO 卫星进行中转。

(8)LEO-GEO 层间链路利用率 如图 10 所示, DTRS 路由策略下的 LEO-GEO 层间链路利用率很大, MLSR 路由策略下的 LEO-GEO 层间链路利用率不超过 20%。

一方面, 从以上仿真结果可知本文的 DTRS 算法所得出的时空路由端到端平均延时不超过 100 ms, 已经满足语音业务的最大时延要求, 可以在多层卫星网络中对语音数据包进行路由转发; 另一

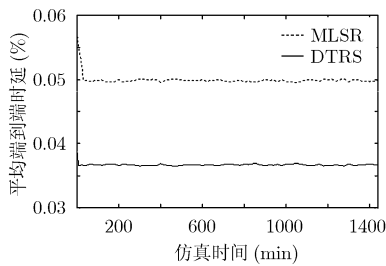


图 3 端到端平均时延变化

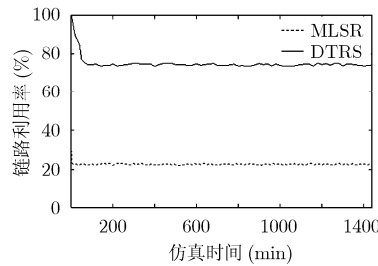


图 4 总链路利用率变化

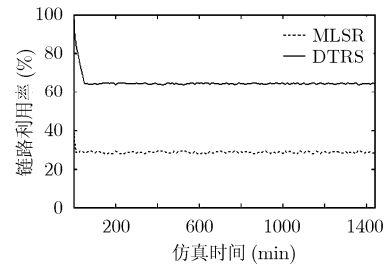


图 5 LEO 层内链路利用率变化

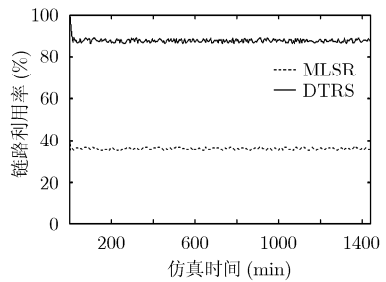


图 6 MEO 层内链路利用率变化

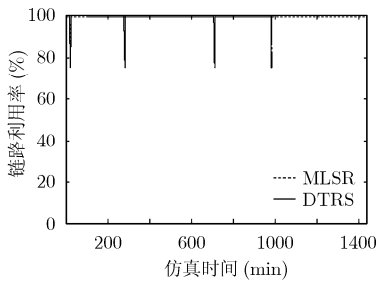


图 7 GEO 层内链路利用率变化

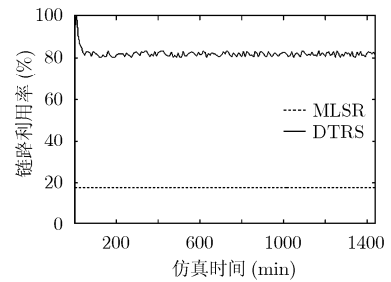


图 8 LEO-MEO 层间链路利用率变化

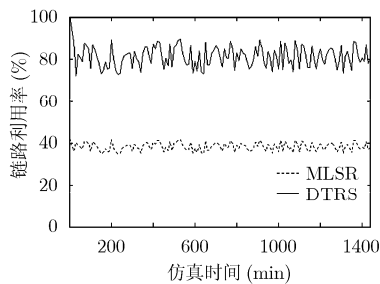


图 9 MEO-GEO 层间链路利用率变化

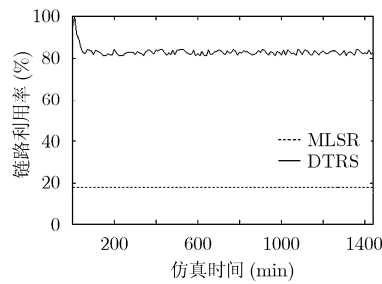


图 10 LEO-GEO 层间链路利用率变化

方面, 本文的 DTRS 算法所得出的路由在链路利用率方面相对 MLSR 路由策略得到了一定程度的均衡

化, 这样就减小了卫星节点通信瓶颈发生的概率。

再次, 分析 DTRS 路由策略的时空特性。DTRS

时间复杂度包括两部分, 对拓扑结构测算的时间和用 Dijkstra 算法进行路由选择的时间。后者是 $O(N^2)$, 前者也为 $O(N^2)$, N 为卫星的数目。这种运算复杂度对于地面站来说并没有压力, 而对于其他的星上路由算法, 都要根据卫星网络拓扑连接矩阵计算路由表。以 Bellman 最短路径算法为例, 平均算法时间复杂度为 $O(N \lg N)$, 最坏情况下为 $O(N^3)$; DTRS 算法空间复杂度为 $O((N-1) \times K_t)$, 其中 N 仍然为卫星的个数, K_t 表示划分的离散时间段的个数。而其他路由机制至少需要一个大小为 $O(N^2)$ 的网络连接矩阵和一个大小为 $O(N)$ 的路由表, 因此 DTRS 算法对星上存储要求较低。

5 结束语

链路中断是卫星网络的重要特征, 它对卫星网络路由策略有重大影响。本文路由模型不仅能够提供对卫星链路中断的可容忍机制, 而且节省了星上资源, 减轻了卫星通信和计算负担, 同时一定程度上提高了链路的利用效率。下一步的研究工作将会着重考虑对星上不同业务 QoS 的保证能力, 进一步细化 QoS 参数模型和研究针对不同 QoS 要求的最优路径算法。

参考文献

- [1] Werner W, Jahn A, Lutz E, and Bottcher A. Analysis of system parameters for LEO/ICO-satellite communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995, 13(2): 371-381.
- [2] Lee J and Kang S. Satellite over satellite(SOS) network: A novel architecture for satellite network[C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM, Tel Aviv, 2000: 315-321.
- [3] Akyildiz I F, Ekici E, and Bender M D. MLSR: A novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(3): 411-424.
- [4] Chen C, Ekici E, and Akyildiz I F. Satellite grouping and routing protocol for LEO/MEO satellite IP networks[C]. Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia, Atlanta, 2002: 109-116.
- [5] Kevin F. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM. USA, ACM Press, 2003: 27-34.
- [6] Lin Chien-shiu, Chang Wei-shyh, Chen Ling-jyh, and Chou Cheng-fu. Performance study of routing schemes in delay tolerant networks. Proc. IEEE AINAW, Okinawa, 2008: 1702-1707.
- [7] Jain S, Fall K, and Patra R. Routing in a delay tolerant network[C]. SIGCOMM'04, Portland, Oregon, USA, 2004, Vol 34: 145-148.
- [8] Zhang Z. Routing in intermittently connected mobile Ad hoc networks and delay tolerant networks :overview and challenge[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 1stQuarter, 2006: 24-37.
- [9] Caini C, Cornice P, Firrincieli R, and Lacamera D. A DTN approach to satellite communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special issue on Delay and Disruption Tolerant Wireless Communication*, 2008, 26(5): 820-827.
- [10] 徐颖, 郑刚. 卫星网络建模与分布式仿真[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(2): 65-69.

郭炎鑫: 女, 1983年生, 硕士生, 研究方向为空间网络应用技术。
郑刚: 男, 1974年生, 副研究员, 研究方向为组网与通信技术。