

移动卫星网络中基于最小费用的切换算法

张涛 张军

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 对于移动卫星网络,合理的星地链路切换方案需要在保证最小切换时延的同时,能够最优地使用网络资源。该文通过引入业务的中断概率和费用模型,给出了切换过程中重路由的最优触发条件,提出一种基于最小费用的切换(SMCH)算法。该算法可在保证切换业务通信的连续性和时延等指标不被破坏的基础上,通过适当的触发重路由来降低切换费用。仿真表明该算法在保证切换业务的 QoS,降低切换费用以及适应性、灵活性等方面都优于同类切换算法。

关键词: 移动卫星网络; 卫星切换; 重路由; 服务质量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0924-05

A Minimum Cost Handover Algorithm for Mobile Satellite Networks

Zhang Tao Zhang Jun

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

Abstract: In mobile satellite networks, for the aim of shortening handover delay while using network resource efficiently, a proper handover scheme should be given. In this paper, by introducing the interrupting probability and the cost model of service, triggering schemes for path optimization in handover is given. Here, a novel mobile Satellite networks Minimum Cost Handover (SMCH) algorithm is proposed. This algorithm can assure the Quality of Service (QoS) parameters (such as delay) during the handover, as well as can minimize the handover cost. So it can use the network resource efficiently after the handover. Correlative simulation indicates that this novel algorithm is superior to other current algorithm in respect of guaranteeing the QoS and decreasing handover cost. Besides, it also has more adaptability and more practicability.

Key words: Mobile satellite networks; Satellite handover; Rerouting; QoS

1 引言

低轨道卫星网具有传输延迟低、用户终端实现简单和可通过星间链路组网实现全球通信等优点,成为下一代移动通信系统的重要组成部分。但系统同时也存在单颗卫星覆盖面积有限、可持续通信时间短等问题(如铱系统,单颗卫星对地面某个用户的最大可持续通信时间仅 10min^[1]),使得卫星与用户以及卫星与卫星间存在很大的动态性,需要解决卫星切换问题,以保证用户在这种动态条件下通信的连续性^[2]。

卫星切换包括星地链路切换和星间链路切换。其中,星地链路切换是指地面终端从卫星A覆盖区变化到卫星B覆盖区时,终端与这两颗卫星连接关系的变化,这种情况类似于地面移动通信中的跨区切换,但由于切换涉及两个不同的卫星节点,必然会造成原有的路由失效,需要利用重路由等方法来建立新的路由,以保证通信的连续性^[3]。

星地链路切换是目前卫星切换研究的重点,相关研究^[4]表明切换后的阻塞率与路径的优化状况很难一致,当使用处

理时延小的局部路由时,可以得到较好的切换阻塞,但不能保证切换后路径的最优;相反若切换后重新进行路由选路,可得到新的最优路径,但需要的处理时延较长,将导致大的切换阻塞,所以算法需要折中考虑这两方面的因素。这方面,最具代表的是文献[5]给出的FHRP(Footprint Handover Rerouting Protocol),该算法利用扩展路由快速建立切换后的新路由,并在适当的条件下利用覆盖区重路由算法建立新的最优路径。FHRP算法虽然简单快捷,但存在如下问题:(1)算法不能保证切换后的QoS;(2)算法过分依赖卫星的特点,适应性较差;(3)FHRP进行重路由的条件过于严格,网络中往往存在过多的非最优路径而导致资源浪费。后续的研究表明,进行重路由的概率会严重影响切换后网络的整体性能^[6],但该研究并没有给出在什么条件下进行重路由最合理,这正是本文的工作之一。

星间链路切换是指由于卫星间的相对运动而引起的卫星节点间链路的中断或重新建立,这种情况类似于网络中的链路故障,应尽量避免。这方面的具体研究将在另一篇文章中讨论,本文重点研究星地链路切换中的重路由问题,给出

一种基于最小费用的移动卫星网络切换(SMCH)算法, 并重点讨论了重路由的触发条件。与 FHRP 相比, 该算法有如下改进: (1)算法以满足业务的 QoS 和保证切换费用最小为条件来决定是否进行重路由, 可保证切换后业务的 QoS, 降低切换费用; (2)以抽象的卫星网络模型为基础, 算法可适用于各种移动卫星网络; (3)在切换费用中考虑星间链路切换的影响, 所得的算法可更好地适应移动卫星网络的动态性。

2 重路由触发条件及其数学模型

这里将星地链路切换给网络带来的额外费用称为切换费用, 包括切换后非最优路径带来的网络资源浪费和重路由时的信令消费等, 其大小与网络链路费用模型、重路由的信令消费以及重路由的概率等因素有关, 下面首先分析卫星网络链路的费用模型, 并由此给出基于切换费用最小的重路由触发条件。

2.1 卫星网络链路的费用模型

定义 1 移动卫星网是一个各边权值都是以时间为变量的周期函数的无向图(若两节点不相邻, 则权值为 ∞), 其模型为 $G(V, E, D(t))$, 其中 V 是有限节点集; E 是有限边集, $E \subseteq V \times V$; $D(t) = \{d_{ij}(t)\}$, $d_{ij}(t)$ 是一个以时间为变量, T 为周期的函数, 表示节点 i 与 j 间的时延, T 为网络 G 的周期。

t 时刻网络 G 中两个不相同节点 V_k 与 V_i , 若 $d_{ik}(t) \neq \infty$, 则称 V_k 是 V_i 在 t 时的邻居。 V_i 的全部邻居组成的集合称为 V_i 在 t 时的邻居集, 记作 $\Gamma_i(t)$ 。

$\Gamma_i(t)$ 是一个随时间变化的函数, 其变化反映了网络拓扑的时变性。这里, 引入一个新的概念: 生成时间, 用来表示两节点间可持续通信的时间, 记为 $TL_{ij}(t)$, 且有如下关系存在: 若在周期 T 内节点 i 与 j 一直相连(如轨内星间链路), 则 $d_{ij}(t)$ 为一连续函数, $TL_{ij}(t) = \infty$; 若节点 i 与 j 会发生切换(如轨间星间链路), $d_{ij}(t)$ 为以切换时间为分段点的分段函数, 设分段点为 t_1, t_2, \dots , 若 $t \in [t_1, t_2]$ 且 $d_{ij}(t) \neq \infty$, 则 $TL_{ij}(t) = t_2 - t$ 。

t 时刻, 若 η 为任意边 $e(i, j)$ 上的某一业务流, 且该业务还需要持续的时间为 x , 如 $x > TL_{ij}(t)$, 则该业务将会因星间链路切换而中断, 将这种中断的概率定义为业务 η 的中断概率, 记为 $P_\eta(t)$, 其大小由 t 时刻该业务的持续时间分布模型 ξ 和 $TL_{ij}(t)$ 决定, 可表示为: $P_\eta(t) = f(\xi, TL_{ij}(t))$, 这里, ξ 由不同的业务决定, 如 Poisson 模型(语音通信)等。

星间链路切换将会造成整个通信链路的的中断, 直接威胁到通信的可靠性和有效性, 需要采用路径保护等方法来避免或减轻这种中断对通信业务的影响, 但这会给网络带来的巨大额外开销。因此, 对于卫星网络 G , 某业务在边 e_{ij} 上的费用不仅与该业务需要占用的带宽等因素有关, 还需要考虑

因星间链路切换带来的额外开销。其中前者与传统网络中业务的费用一样, 这里称为正常费用 c , 且对于同一业务, 本文假设各跳的 c 相同; 对于后者, 其大小与 $P_\eta(t)$ 有关, 且这种关系不是线性的, 当 $P_\eta(t)$ 越接近 1, 这种影响将越明显, 这里假设这种关系为指数关系, 则可定义卫星网络某链路 $e(i, j)$ 针对业务 η 的费用模型为: $c_\eta(t) = \frac{e^{P_\eta(t)}}{1 - P_\eta(t)} \times c$, 当 $P_\eta(t) = 0$ 时, $c_\eta(t) = c$, 当 $P_\eta(t) \rightarrow 1$, $c_\eta(t) \rightarrow \infty$ 。

为了便于研究和描述, 本文假设: 给定时刻 t , $G(V, E, D(t))$ 和业务 η 。则与时间 t 有关的函数都可用一个常数来表示(如 $P_\eta(t)$ 可表示为 P_η)。

2.2 最小切换费用的重路由触发条件分析

切换费用可表示切换对网络的影响程度, 若费用越小, 则切换带来的影响就越小, 相应的算法就越有效。

对于星地链路切换, 在重路由发生前, 切换费用主要是由于路径中存在非最优路径而造成的网络资源的浪费, 其大小决定于路由扩展后新路径的费用, 记为 C_{augment} ; 在重路由后, 其切换费用与新的最优路径费用和重路由时的信令费用有关, 记为 C_{reroute} 。因此, 合理的切换算法必须要在 C_{augment} 和 C_{reroute} 中寻求平衡, 即: 一方面网络不因存在过多的非最优路径而浪费过多的资源, 另一方面网络也不因频繁的重路由而消耗过多的信令资源, 这就需要寻找合适的重路由触发条件。

这里 C_{augment} 即是切换后所得扩展路径的费用, 当扩展路由结束后, 该值也就可相应求得, 其值可表示为:

$$C_{\text{augment}} = \sum_{e \in U'(i, j)} c'_\eta, \text{ 其中 } U'(i, j) \text{ 为扩展后的路径, } c'_\eta \text{ 为 } U'(i, j)$$

上各链路的费用值, 由于切换后各链路的 P_η 值将不同于切换前, 因此切换后各链路的费用值也不同于切换前, 这里用 c'_η 表示。

对于 C_{reroute} 其大小需要在重路由后才可得到, 在重路由之前只能得到估计值。为了便于研究, 假设:

(1)由于(a)地面移动用户的运动速度远小于卫星节点的速度, 可近似认为地面移动用户是静止的, 造成切换的原因主要是卫星的运动; (b)卫星运动是有规律的, 可认为大多数情况下切换后的最优路径和初始的最优路径是相似的^[5](如跳数、生成时间等)。因此, 这里简单地假设重路由后新的最优路的费用 C_{new} 等于初始最优路的费用 C 。

(2)设重路由时所需的信令费用为 C_{signal} , 令 $C_{\text{signal}}/C_{\text{new}} = \gamma$ 。

由如上两个假设, 可得 C_{reroute} 的估计值: $C_{\text{reroute}} = C_{\text{signal}} + C_{\text{new}} = (1 + \gamma)C$ 。

由上面的论述, 可以得到基于最小切换费用的重路由触发条件: 当星地链路切换发生后, 若存在 $C_{\text{reroute}} < C_{\text{augment}}$, 即 $C_{\text{augment}}/C > 1 + \gamma$, 则触发重路由。

3 SMCH 算法设计

与 FHRP 类似, SMCH 算法也将切换分为路由扩展和重路由两阶段, 在路由扩展阶段, 仅需要寻找切换后的节点到原有路径中某一点的直接连接, 该阶段计算简单, 可直接在卫星节点上实现; 重路由阶段包括触发重路由条件判断和重路由, 在路由扩展阶段完成后, 算法首先需要判断是否需要重路由, 如需要, 则进行相应的 QoS 路由计算、申请、预留等工作, 并最终将现有路径切换到新的最优路径, 这个阶段计算比较复杂, 一般由地面网关节点完成, 并将结果提交给卫星节点(修改星上路由表等), 具体算法实现流程为:

设某移动终端 a 通过卫星 S 接入卫星网, 并通过目的卫星 T 与另一终端 b 相连, 其最优路径为 U , 费用为 C (记录在相应的地面网关节点), 当前路径为 U_1 (U_1 可能不同于 U), t 时刻 a 进入切换状态, 则整个切换算法包括如下 3 个步骤:

第 1 步 切换准备 首先, 卫星 S 将切换所需的必要信息(如 U_1), 发给卫星 S' ; 若 S 与 S' 处于不同的网关节点, S 的网关节点将终端 a 的信息传给 S' 的网关节点, 包括 C 、用户 QoS 信息等; 然后, S' 为终端 a 分配相应的信道。本文重点研究切换对路由的影响, 这里假设 S' 总可以为 a 提供相应的信道。

第 2 步 路由扩展 该阶段主要由卫星 S' 完成, 当 S' 收到 U_1 并为终端 a 分配信道后, 将调用路由扩展算法, 迅速建立由 S' 到目的卫星的路由, 并记录扩展后的路径为 U_1 , 将 U_1 相关信息传给网关节点。

第 3 步 重路由 该阶段主要由卫星 S' 的网关节点完成, 当路由扩展阶段结束后, 网关节点根据相关信息, 如 C 、用户 QoS 信息、 U_1 等, 判断是否需要触发重路由, 若需要则计算新的 QoS 路径, 触发相关的信令, 建立新的最优路径, 并记录该路径为 U_1 (该信息需传给 S') 费用为 C 。

路由扩展算法采用修改 U_1 的方法快速建立新路径, 其具体实现方法如下:

(1) 检查 S' 是否属于 U_1 , 若属于, 则截取 S' 到目的卫星的这段路径为当前路径 U_1 , 并结束当前的切换算法;

(2) 若 S' 不属于 U_1 , 则在 U_1 中从目的卫星开始, 依次检查各节点是否为 S' 的邻居, 若节点 x 为 S' 的邻居, 则在 S' 上添加针对 a 业务的路由信息, 使信息直接由 S' 流向 x ; 若 U_1 中所有节点都不是卫星 S' 的邻居, 则路由扩展失败;

(3) 根据(2)路由扩展的结果生成相应的消息。若路由扩展成功则记录扩展后的路径为 U_1 , 并将 U_1 相关信息传给网关节点; 否则生成路由扩展失败消息, 并通知网关节点。最后, 算法进入重路由阶段。

重路由阶段在适当的条件下能触发重路由, 来优化当前

路径 U_1 。其具体的实现方法如下:

网关节点首先根据相关信息判断是否需要重路由, 其判断依据如下:

(1) 检查路由扩展结果信息, 若路由扩展失败, 则需要重路由;

(2) 若路由扩展成功, 则判断 U_1 是否满足用户 a 的 QoS(如时延), 如不满足, 则需要重路由;

(3) 若满足 QoS, 则计算 U_1 的费用 C_{augment} , 并判断是否满足重路由触发条件: $C_{\text{augment}}/C > 1 + \gamma$, 若满足, 则需要重路由;

若上面判断为不需要重路由, 则结束当前的切换算法; 否则需要重新进行路由, 包括基于 QoS 的路由计算、资源申请与预留等, 其方法与初始路由生成方法一样, 这里就不深入讨论了。

4 性能分析与仿真比较

为了保证切换过程中呼叫的连续性和相应的时延指标不被破坏, 要求切换造成的时延越小越好, 同时, 由于星上处理资源有限, 也要求算法执行时间越小越好。对于本算法, 影响切换时延的主要是路由扩展算法, 该算法非常简单, 因而算法计算复杂度和执行时间都非常小。具体来说, 若设 U_1 由 L 个节点组成, 卫星 S' 当前的邻居集 Γ 大小为 N , 则算法最多需要进行 $L \times N$ 次比较, 这里 L 和 N 都很小(一般小于 10)。因此算法可以直接运行于星上节点, 并可获得很好的切换时延性能。这方面, 本算法与 FHRP 算法性能相当。

本算法计算复杂度主要体现在重路由阶段, 其复杂度与具体使用的 QoS 路由算法有关, 一般都比较大, 可由相应的地面网关节点执行。

对卫星切换算法的另一个要求是切换带来的额外消费应尽可能的小, 这样才能保证切换后网络资源的有效利用, 这对于网络资源相对昂贵的卫星网来说是很重要的。本算法重点针对这方面的性能, 通过适当的重路由来优化切换后的路径, 得到最小的切换费用, 下面给出算法在这方面性能上与 FHRP 算法的仿真比较。

所给的仿真实验设计如下: (1) 实验所用的卫星网络轨道参数选用美国的 Teledesic 移动卫星系统, 共 288 颗卫星均匀分布在 12 个轨道面, 轨高 1375km, 每颗星周围有 8 颗邻居, 为十字架状分布; (2) 业务 η 为简单流, 其平均业务持续时间 $\mu=5\text{min}$, 则 G 中边 $e(i, j)$ 的中断概率可表示为: $P_{\eta} = e^{-(\tau L_{ij}/\mu)}$; (3) 每颗卫星的地面移动用户在其覆盖区内为均匀分布; (4) 针对该卫星网每次实验都随机选取 1000 条通信链路(当某一条链路通信结束, 实验将随机产生一条新的通信链路), 统计其切换费用、重路由次数以及 QoS 等参数, 实验运行时间为 30min, 仿真步长为 1min, 每次实验针对不同的测量内容可得到 1000 个数据/仿真步长, 最终的结果取这些数据的均值。仿真测试分为如下 3 组。

4.1 两种算法的切换费用比较

切换对网络的影响情况是描述切换算法性能好坏的一个重要方面, 本组实验给出了本算法和 FHRP 算法在这方面的对比结果, 主要考虑切换费用和切换后链路因星间链路切换而被中断的概率 (P_{η}) 两种因素。其中 SCr 为切换费用比, 表示本算法比 FHRP 算法节省的切换费用比, $SCr=1 - (\text{本算法切换费用}/\text{FHRP 算法切换费用})$; SPPr 为切换中断概率比, 表示两种算法得到的路径因星间链路切换而被中断的概率差, $SPPr=(\text{FHRP 算法得到的路径的 } P_{\eta}) - (\text{本算法得到的路径的 } P_{\eta})$ 。

由图 1 可得本算法因切换带来的额外消费比 FHRP 算法降低了近 15%, 而算法得到的路径的 P_{η} 比 FHRP 算法减少近 10%, 因此与 FHRP 算法相比, 本算法在降低切换对网络的影响方面得到了明显的改善。

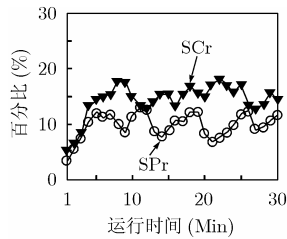


图 1 SCr, SPPr 实验结果

4.2 两种算法 QoS 保证情况比较

本组实验给出了本算法和 FHRP 算法在 QoS 保证方面的性能比较, 并以时延为参数(这里时延主要是指两用户节点间的传输时延), 比较两种算法在不同的时延约束下的 QoS 性能。

切换将会造成业务通路特性的改变(如时延等), 这对切换后路径的 QoS 保证提出了新的要求, 需要算法在切换时考虑这种情况, 图 2 表明与 FHRP 算法相比, 本算法在保证切换路径 QoS 方面具有明显改善, 图 2(a)中, 针对不同的时延约束, 本算法得到的平均时延都明显低于 FHRP 算法, 而在图 2(b)中可进一步看出, 当时延约束比较严格时, FHRP 算法得到的路径将有近 50%超过时延约束(即不满足 QoS), 而与此同时, 对于本算法, 也将有近 10%的路径将因切换后不存在满足时延约束的路径而被拒绝。

4.3 γ 值的选取与切换后重路由概率的关系

γ 值表示业务路由时所需的信令费用相对大小, 它与具

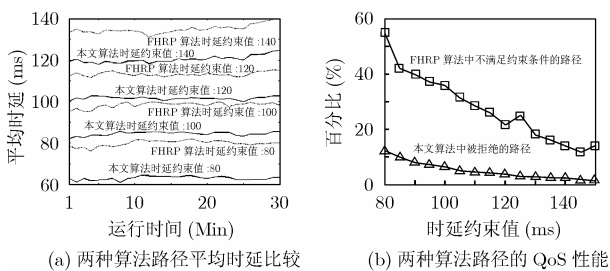


图 2

体的业务有关。本组实验给出了 γ 值与切换后重路由概率的关系, 由此可得出不同的业务 γ 值可能的取值。

由图 3 可得当 γ 很小时, 每次切换后重路由的概率很大, 而随着 γ 的增加, 切换后重路由的概率迅速下降。实验表明, 对于某些业务, 如数据业务(不需要额外的信令消费, $\gamma=0$ 或很小)或视频业务(业务所需带宽远远大于信令带宽, γ 很小)等, 算法将尽量保证切换后路径的最优性, 以降低由于存在非最优路径而造成的对网络资源的浪费, 这时切换后重路由的概率较大; 而对于某些业务(如语音业务), 由于信令消费相对于业务费用较大, 频繁的重路由将会带来巨大的信令消费, 降低对网络的有效利用, 算法切换后重路由的概率将大大降低。由此可见, 对于不同业务, SMCH 算法可通过 γ 自动调整切换后重路由的概率, 这种自适应设计可以使得算法对于不同业务都能取得很好的性能, 因此, 本算法比采用固定重路由概率的 FHRP 算法要具有更好的适应性和灵活性。

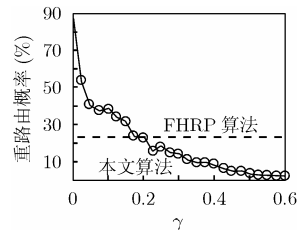


图 3 γ 值与重路由率的关系

5 结束语

星地链路切换不仅影响该切换业务的通信性能, 还会对整个移动卫星网络性能造成影响, 寻找一种既可保证业务快速、无缝切换, 又可以尽量不影响其他业务性能的切换算法一直是移动卫星通信需要解决的难题。

本文重点研究星地链路切换中的重路由问题, 给出基于最小费用的移动卫星网络切换算法, 该算法利用路由扩展的方法来保证切换业务通信的连续性, 并利用在适当的时候进行重路由的方法来有效地降低切换对网络性能的影响。算法充分考虑了卫星网络的拓扑时变特性, 在给出的业务的费用模型中同时考虑了星间链路切换的影响, 并由此给出基于最小切换费用的重路由触发条件。仿真结果表明, 与 FHRP 算法相比, 算法不仅在保证切换业务的 QoS、降低切换对网络的影响等方面得到了明显的改善, 还具有更好的适应性、灵活性和实用性。

参考文献

[1] Lemme P W, Glenister S M, and Miller A W. Iridium aeronautical satellite communications[J]. *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, 1999, 14(11): 11-16.
 [2] Akyildiz I F and Uzunalioglu H. Handover management in low earth orbit (LEO) satellite networks[J]. *Mobile Networks*

- and Applications*, 1999, 4: 301-310.
- [3] Werner M, Delucchi C, and Vogel H J, *et al.* ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(1): 69-82.
- [4] Gkizeli M, Tafazolli R, and Evans B. Performance analysis of handover mechanisms for non-geo satellite diversity based Systems[A]. IEEE GLOBECOM'01[C]. San Antonio, TX: 2001: 2744-2748.
- [5] Uzunalioglu H, Akyildiz I F, and Yesha Y, *et al.* Footprint handover rerouting protocol for LEO satellite networks[J]. *ACM Wireless Networks*, 1999, 5(5): 327-337.
- [6] 王亮, 张乃通. LEO 网络中卫星切换的动态概率路由优化策略[J]. *通信学报*, 2002, 23(9): 8-15.
- Wang Liang and Zhang Nai-tong. Dynamic probability path optimization strategy for satellite handoff in LEO networks[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2002, 23(9): 8-15.
- 张 涛: 男, 1973 年生, 博士后, 研究方向为移动通信, 卫星网络通信.
- 张 军: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 北京航空航天大学电子信息工程学院院长, 研究方向为天空地一体化网络通信.