

文章编号 : 1000-6893(2007)04-0922-08

一种新的星间链路切换保护算法

张 涛, 张 军

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

Novel ISLs Handover Protection Algorithm

ZHANG Tao, ZHANG Jun

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

摘 要: 星间链路切换将严重影响卫星网络的通信性能,需要对切换链路加以保护,这方面的研究目前还很欠缺。为此,给出一种新颖的星间链路切换保护(ISL HP)算法,该算法可同时生成业务路径和备份路径,且具有最小的综合费用(包括备份费用和业务费用)。算法采用本地链路保护,为星间链路切换提供快速恢复,并利用星间链路切换的可预测性和备份资源的可共用性,通过降低需要保护的链路数,减少闲置的备份资源,来提高网络资源的利用率。仿真结果表明:该算法具有切换恢复时间短,网络资源利用率高等优点。

关键词: 计算机应用技术; 移动卫星网络; 星间链路切换; 重路由; 服务质量

中图分类号: TN927+.23 **文献标识码:** A

Abstract: The handover of inter satellite links (ISLs) may affect the performance of satellite network violently, so the handover links must be protected. In this paper, a novel ISLs handover protection (ISL HP) algorithm is proposed. To one of services, this algorithm can create the active path and backup paths at one time. And the costs of the active path and backup paths are the lowest. To make the handover links quick recovery, the local links protection mechanism is considered. However, this mechanism may be expensive in the additional network capacity needed, especially for satellite networks. By considering the predictive nature of the ISLs handover and the share restoration capacity of backup paths, the backup path number needed for one service and the backup resource which is idle can be decreased. So the network resource can be used efficiently in this algorithm. Correlative simulation indicates that this novel algorithm needs shorter recovery time, fewer back path number and additional cost.

Key words: computer application technology; mobile satellite network; inter satellite links (ISLs) handover; rerouting; QoS

移动卫星通信网由于具有传输延迟低、用户终端实现简单和可以通过星间链路组网实现全球无缝覆盖等优点,成为目前卫星通信发展的一个重要方向。但由于卫星节点的运动性,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拓扑条件下通信的连续性^[1]。

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 A 卫星覆盖区变化到 B 卫星覆盖区时,终端与这两颗卫星连接关系的变化,类似于地面移动通信中的跨区切换;星间链路切换是指由于卫星间的相对运动而引起的星间链路的的中断或重新建立,这种情

况类似于网络中的链路故障,将导致业务的中断和丢包,应尽量避免,并对相应链路加以保护。

卫星切换技术是未来高速移动卫星通信网的关键技术之一,人们在这方面做了大量的研究。但主要的研究成果都针对星地链路切换问题,而针对星间链路切换的研究还很少,相关的研究成果也主要集中在如何防止星间链路切换发生,以降低其对网络性能和通信业务的影响等,而对于切换发生后,如何保证业务的通信性能的研究还很少。例如基于概率的路由 (PRP)^[2],该方法为每个业务呼叫尽可能的选取一条在呼叫持续时间内不发生链路切换的路径;文献[3]给出的基于服务质量的路由 (QoSR) 算法,该算法通过选取一条持续时间最长的路径,来保证业务不会因链路切换而中断。

上述研究可有效降低业务呼叫过程中星间链

收稿日期:2006-07-13; 修订日期:2006-11-21
基金项目:国家自然科学基金(10377005,60532030)
通讯作者:张 涛 E-mail:zhtao73@163.com

路切换的概率,但并不能真正解决星间链路切换问题,所给出的算法无法完全避免业务在呼叫过程中发生星间链路切换。对此,一般的解决思路是简单地将这种切换当做网络故障来处理,利用现有的网络故障恢复技术来保证切换后业务通信的有效性。但由于星间链路切换具有不同于一般网络故障的特殊性,传统的方法往往得不到很好的效果,需要专门针对星间链路切换进行研究,这方面的成果目前还未见报道。

本文重点研究移动卫星网络中的星间链路切换问题,给出一种基于本地恢复模式的星间链路切换保护算法,解决移动卫星网络中星间链路切换带来的业务中断和丢包等问题。

1 问题描述

1.1 网络模型

定义1 具有星间链路的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 为有限节点集; E 为有限边集, $E \subseteq V \times V$; $D(t) = \{d_{ij}(t)\}$, $d_{ij}(t)$ 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^[4]。

$d_{ij}(t)$ 还可表示节点 i 与 j 间的连接关系,反映网络的拓扑时变性。这里,引入一个新的概念:生成时间来表示两节点间可持续通信的时间,记为 $T_{L_{ij}}(t)$,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, $T_{L_{ij}}(t) = \infty$;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 $d_{ij}(t) < \infty$,则 $T_{L_{ij}}(t) = t_2 - t_1$ 。

t 时刻,若 e 为任意 $e(i, j) \in E$ 上的某一业务流,且该业务还需要持续的时间为 x ,如 $x > T_{L_{ij}}(t)$,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 e 的中断概率,记为 $P_e(t)$,其大小由 t 时刻该业务的持续时间分布模型和 $T_{L_{ij}}(t)$ 来决定,可以表示为: $P_{e(i,j)}(t) = f(x, T_{L_{ij}}(t))$,这里, f 由不同的业务决定,如Poisson模型等。对于 e 的业务路径 U ,其中断概率为

$$P_{e,U}(t) = \min(P_{e,i}(t)), e \in U$$

为了便于研究和描述,假设:给定时刻 t , $G(V, E, D(t))$ 和业务 e ,则与时间 t 有关的函数都

可用一个常数来表示(如 $P_e(t)$ 可表示为 P_e)。

1.2 星间链路切换保护问题

星间链路切换将导致网络 G 中某链路 e 中断,使得所有经过 e 的业务被迫中断或丢包,它可看做是一种特殊的链路故障。而星间链路切换保护即是在这种特殊的链路故障发生时为受损的业务提供快速的保护和恢复能力,以保证业务通信的持续性。因此,移动卫星网络中的切换保护问题可以转化为网络 G 中切换链路 e 的故障恢复问题。

在链路发生切换故障时,为了保证受损业务的通信性能,要求网络 G 能迅速为该业务提供备份通道,以降低业务的丢包率,保证业务通信的实时性。这就需要针对切换故障预先建立备份路径(一般在业务路径建立时备份路径也同时建立),在切换发生时迅速地将业务路径上的业务转移到备份路径上,以实现切换的快速恢复。但备份路径的建立将造成大量的网络资源浪费,这对于网络资源相对昂贵的卫星网络,是十分不利的。因此,针对星间链路切换的特点,寻找一种基于最小网络资源耗费的路径建立算法(包括:业务路径和备份路径)是解决移动卫星网络中的切换保护问题的关键。

对于移动卫星网络 G ,带宽资源无疑是最重要的网络资源之一,因此,本文重点考虑带宽资源的耗费。设当前一源节点为 s ,目的节点为 t 的业务 e ,所需带宽为 b ,若其业务路径为 $U_a(s, t)$,费用为 C_a ,备份路径为 U_b ,费用为 C_b ,则业务 e 总的带宽耗费 $C = C_a + C_b$ 。

定义2 若 G 中任意边 $e(i, j) \in E$,存在非负的 d_{ij} 和 P_e ,则对于任一业务 e ,其星间链路切换保护(ISL HP)问题可描述为:

在网络 G 中,寻找一条从源节点 s 到目的节点 t 的业务路径 $U_a(s, t)$ 和备份路径 U_b ,满足: $P_{e,U_b} < P_{e,U_a}$,且 $\min(C)$ 。

2 ISL HP 算法设计

2.1 基于本地恢复的快速切换保护策略

目前,关于网络故障恢复方面的研究成果很多,相关的解决方案主要有重路由、全路径保护和本地恢复3种模式^[5]。其中重路由模式相对简单,且不需要浪费过多的网络资源,但其本质上要比后两者慢得多,恢复效果差;全路径保护和本地恢复模式都是利用事先建立的备份路径来进行故

障恢复,其中后者恢复速度最快,效果最好,但扩展性差,需要建立并维护的备份路径多,且很难实现对节点的保护,因此仅适用于规模较小的网络或进行局部链路保护。

对于卫星网络,采用恢复速度快的本地恢复模式来解决卫星网络切换保护问题可以取得更好的效果,这是因为:

(1) 由于网络中链路传播时延比较大,这使得无论是采用重路由还是全路径保护模式都会造成大量的丢包或业务中断,很难保证切换业务的性能(具体参见3.1节),而本地恢复模式由于采用切换故障本地发现、本地恢复的方式,可以很好地克服卫星网络链路传输时延大对切换业务性能的影响。

(2) 对于卫星网络,由于节点间信息的共享要比地面网络困难,节点很难准确地掌握全网的信息,因此,采用具有本地特性的本地恢复模式比具有全网特性的全路径保护模式更容易实现。

(3) 与一般网络故障相比,星间链路切换具有如下几个特点:故障发生是可预测的;仅为链路故障;故障具有局部性的特征。因此,星间链路切换符合本地恢复模式的适用条件。

2.2 基于最小耗费的链路费用模型

给出的 ISL-HP 算法正是以本地恢复模式为基础,对发生切换的链路实行本地恢复,以获得快速、有效的切换保护性能。但现有的本地恢复模式一般都存在备份路径复杂、网络资源的浪费严重等缺点,很难直接实用于网络资源相对昂贵的卫星网络。因此,本算法针对现有本地恢复模式的缺点,利用星间链路切换的特点,通过如下改进来有效地解决星间链路切换保护问题。

(1) 利用星间链路切换故障的可预测特性来降低备份费用。

对于网络 G 中的任一业务,设其业务路径为 U (U 由 n 个节点组成),若采用一般的本地路径恢复算法,则需要针对每一个链路 $e \in U$ 生成相应的备份路径,即需要生成 $n-1$ 条备份路径。而实际上,在传输过程中, U 至多有一两条链路发生切换,甚至所有链路都不发生切换,这样,网络中将存在严重的资源浪费情况。

对于卫星网络,由于切换发生是可预测的,因此,可根据路径 U 中各链路发生切换的可能性,决定是否需要以及哪些链路需要进行链路切换保护,这样可极大地降低由于切换保护而带来的资

源浪费。其具体设计思路如下:

对于网络 G 中的某一业务,若给定一门限概率 P ,在求解的业务路径 U 时,仅针对切换中断概率 $P_{e,U} > P$ 的链路,生成对应的备份路径。这样若 P 大小合适,业务所需的备份路径耗费将大大降低,同时,算法还可以通过调整 P ,得到针对不同业务类型最佳保护算法(即在业务性能和资源耗费方面得到最优的折中,见3.2节)。

(2) 对于卫星网络,由于某一时刻、某一链路发生切换故障的概率很小,因此对于网络 G 中的某一链路,其备份预留带宽往往可以作为多条链路上的不同业务共同的备份资源^[6]。利用这种特性,算法可以进一步降低备份所需的资源耗费。具体见式(2),由于 $A_{ij}^e \leq B_e$,因此业务在 e 上的备份路径耗费将小于等于该业务所需的带宽。

(3) 在网络 G 中,除了需要预留资源的面向连接业务,还存在一些优先级低的面向非连接的业务,这些业务对时延等 QoS 性能要求较低,因此,对于已分配的备份带宽资源,在平时不使用时可分配给这些优先级低的业务,当切换发生时则立即让出资源。这种设计可减少网络中空闲的备份资源,提高网络资源的利用率。这里引入系数 α 表示在这种情况下备份资源的平均使用率,来反映实际的备份资源耗费大小。对于备份费用为 C_b 的业务,实际耗费的备份资源可表示为 $(1-\alpha)C_b$ 。

(4) 建立链路费用模型。

对于网络 G 中的任一链路,其链路费用实际上应包括业务所需的带宽耗费以及基于该链路可能的备份费用,这里的备份费用大小与该链路的切换中断概率 $P_{e,U}$ (即是否需要备份路径)以及备份资源共享情况等因素有关,具体的链路费用模型描述如下:

模型中的相关符号: T_{ij} 为链路 $e(i,j)$ 总的带宽资源; A_{ij} 为所有经过链路 $e(i,j)$ 的业务路径所需的带宽耗费和; B_{ij} 为链路 $e(i,j)$ 上分配给备份路径的带宽耗费; $R_{ij} = T_{ij} - A_{ij} - B_{ij}$ 为链路 $e(i,j)$ 剩余的可用带宽资源;若链路 $e(u,v)$ 为链路 $e(i,j)$ 备份路径中的一条链路,则 A_{ij}^{uv} 为所有业务路径经过链路 $e(i,j)$ 且备份路径经过 $e(u,v)$ 的业务带宽耗费和。

对于网络 G 中的任一业务,其带宽需求为 b ,若该业务经过链路 $e(i,j)$,则链路 $e(i,j)$ 的费

用 $C(i, j)$ 可表示为

$$C(i, j) = \begin{cases} C_a(i, j) & P_{,e(i,j)} \leq P \\ C_a(i, j) + (1 - \alpha) C_b(i, j) & P_{,e(i,j)} > P \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} C_a(i, j) = \begin{cases} b & R_{ij} \geq B_e \\ R_{ij} & R_{ij} < B_e \end{cases} \\ C_b(i, j) = \sum_{e \in U_b} u_{ij}^e \end{cases}$$

式中: u_{ij}^e 为业务 i, j 在链路 e (若 e 为链路 $e(i, j)$ 备份路径中的一条链路) 上所需的备份带宽, 其大小为

$$u_{ij}^e = \begin{cases} 0 & A_{ij}^e + b \leq B_e \\ A_{ij}^e + b - B_e & A_{ij}^e + b > B_e, R_e \geq R_{ij} \\ R_e & R_e < A_{ij}^e + b - B_e \end{cases} \quad (2)$$

2.3 算法描述

针对具体的星间链路切换保护问题, 算法将首先针对需要保护的链路 ($P > P$), 求解该链路的备份路径 U_b , 满足 $P_{,U_b} < P$ 且需要的备份带宽资源最小; 利用式(1), 求解各链路所需的费用。最后, 针对该链路费用, 求解最短路径。

算法首先需要输入网络 G (包括 V, E, D 以及基于 $e \in E$ 的 B_{ij}, R_{ij}, A_{ij}^e), 业务所需带宽 b , 源节点 s 、目的节点 t 以及 P 和 α , 并在算法初始化时根据业务流类型和当前时间得到每条链路的

```
ISL HP ( G, b, s, t, P, \alpha )
1 Initialization
  T = V, L(t) = 0, L(j) = \infty \forall j \neq t,
  q(t) = \emptyset
  For e \in E
    P_{,e} = Get_interrupt_p ( G, current_t, )
2 L(k) = min{ L(j) | j \in T } If (k=s) go to Step 5
  T = T - {k}
3 For j \in T, e(j, k) \in E
  w(j, k) = Get_Link_Cost ( G, j, k, P, )
  If ( L(j) > w(j, k) + L(k) )
    L(j) = w(j, k) + L(k), q(j) = k
4 go to Step 2
5 Exit
```

$P_{,e}$ 。算法主模块 (ISL HP (G, b, s, t, p, \alpha)) 采用类似于 Dijkstra 算法的方法进行求解, 模块从节点 t 开始, 对网络中的节点进行逆向标号, 在标号过程中, 模块针对当前链路求解链路费用 (在模块 Get_Link_Cost (G, b, i, j, p, \alpha) 中实现), 建立最小费用树, 从而保证每个节点沿着该树到达节点 t 具有最小的费用, 直到找到节点 s 。

```
Get_Link_Cost ( G, b, i, j, P, \alpha )
1 If ( R_{ij} < B_e )
  C(i, j) = R_{ij}, go to Step 3
2 If ( P_{,e(i,j)} < P )
  C_b(i, j) = Get_Back_Route ( G, b, i, j, P )
  C(i, j) = b + (1 - \alpha) \times C_b(i, j)
  Else C(i, j) = b
3 Return C(i, j)
```

备份路径的求解在 Get_Back_Route (G, b, i, j, p) 模块中, 对于当前链路 $e(i, j)$, 设 $S(j)$ 为节点 j 到目的节点 t 的最短路径节点集, 若 $P_{,e(i,j)} > P$, 则模块需计算从节点 i 到节点 $x (x \in S(j))$ 基于备份费用 u_{ij}^e 的最短路径。

```
Get_Back_Route ( G, b, i, j, P )
1 Initialization
  T = V, L(i) = 0, L(n) = \infty \forall n \neq i,
  b(i) = \emptyset, x = j
  While q(x) = \emptyset
    m = q(x), x = m, S(j) = S(j) \cup {m}
2 L(k) = min{ L(n) | n \in T } If (k=j) go to Step 5
  T = T - {k}
3 For n \in T, e(k, n) \in E
  If ( P_{,e(k,n)} < P ) w(k, n) =
  \begin{cases} 0 & A_{ij}^{kn} + b \leq B_{kn} \\ A_{ij}^{kn} + b - B_{kn} & A_{ij}^{kn} + b > B_{kn}, \\ & R_{kn} \geq w(k, n) \\ R_{kn} & R_{kn} < A_{ij}^{kn} + b - B_{kn} \end{cases}
  If ( L(n) > w(k, n) + L(k) )
    L(n) = w(k, n) + L(k), b(n) = k
4 go to Step 2
5 Return L(j)
```

对于得到的备份路径,有时会出现业务回流的现象,如图1所示,对于当前路径中的某一链路 $e(a, b)$,若直接求备份路径 $a \rightarrow b$,当切换发生时,业务将先流到 b 再流向目的节点 t ,这样在 $e(b, c)$ 上将出现业务回流的现象。为了解决这个问题,算法采用了逆向标号的方法,可以在计算过程中得到当前节点到目的节点的最短路径节点集 S ,在求解备份路径时,只要找到 S 中任意一点即可中止算法(如图1中,最终的备份路径为 $a \rightarrow c$)。

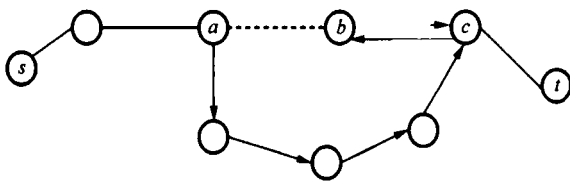


图1 备份路径求解示意图

Fig. 1 Computing backup path

2.4 算法性能分析

算法的计算复杂度主要体现在备份路径的求解上,即模块 $\text{Get_Back_Route}()$,该模块实际上是一个典型的 Dijkstra 算法,其计算复杂度为 $O(N \lg N)$, N 为节点总数。对于主模块,在最恶劣的情况下将调用 M 次 $\text{Get_Back_Route}()$ 模块,即算法计算复杂度为 $O(MN \lg N)$, M 为链路总数。实际上,算法的计算复杂度将远远小于 $O(MN \lg N)$,这是因为:(1)求解备份路径时,由于源节点和目的节点相距很近,算法往往可以很快收敛,其计算复杂度将小于 $O(N \lg N)$;(2)在主模块中,算法调用 $\text{Get_Back_Route}()$ 模块的次数与 P 以及业务分布等因素有关,在实际应用中,算法调用该模块的次数将远远小于 M 。

影响算法性能的另一个因素是节点对网络状态信息的掌握程度,应该说节点对 B_{ij} , R_{ij} , A_{ij}^e 等信息掌握的准确程度将影响算法中链路费用计算(式(1))的有效性,从而影响算法求解得到的最优路径(最小费用)的有效性。对于卫星网络,由于网络节点间的传输时延较大,节点要准确掌握全网所有链路的信息将是比较困难的,但对于本算法,由于采用本地恢复模式,备份路径的计算以及备份费用的估算都具有局部性和本地性的特点,因此在实际应用中可采用节点本地计算备份路径的方法来解决信息不完全性的问题。

3 仿真分析

为了降低星间链路切换对网络性能和通信业务的影响,所使用的切换保护算法应该满足如下两个要求:(1)切换的恢复时间应尽可能的快,以保证星间链路切换过程中业务通信的连续性和相应的 QoS 性能不被破坏;(2)算法生成的业务路径和备份路径所消耗的网络资源应尽可能的少,以降低切换对网络整体性能的影响,提高网络资源的利用率。对于本算法,一方面,由于算法采用本地发现、本地切换的策略,切换速度比需要从源节点发起切换保护的全路径保护和重路由策略要快得多;另一方面,由于利用了切换的可预测性和备份资源的可共用性,算法极大地降低了备份资源的消耗,通过对门限概率 P 的选取,算法可以在业务通信性能和网络资源的有效利用两方面得到最好的折中。下面给出具体的仿真分析。

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^[7],共 288 颗卫星均匀分布在 12 个轨道面,轨高 1 375 km,倾角 84.7°,每颗星周围有 8 颗邻居,为十字架状分布;(2)业务为简单流,其平均业务持续时间 $\mu = 5$ min,则 G 中 $e(i, j)$ 的中断概率可表示为: $P = e^{-(T_{L_{ij}}/\mu)}$ 。

3.1 切换丢包性能比较

切换的恢复时间是反映算法性能的重要指标。切换发生时,由于原有链路的的中断,将不可避免的发生业务丢包的现象,这时算法的切换恢复时间越小,则切换带来的丢包也越小。本实验比较了下列 3 种路由模式在切换丢包方面的性能: ISL HP 算法(本地恢复),全路径保护算法(1) ^[5] 以及不使用备份路径的重路由策略。实验采用网络仿真软件 OPNET,其运行时间为 30 s,并假设在运行时间内仅有一条链路发生切换。实验中本算法的门限概率 $P = e^{-1} = 0.368$ 。

由图 2 可看出,采用本地发现、本地切换的策略, ISL HP 算法在切换发生时可以迅速恢复通信,算法在丢包的间隔、峰值等方面都远远小于全路径保护算法(1)和不使用备份路径的重路由策略。对于全路径保护算法,切换后业务的恢复时间与切换故障发现时间直接相关,对于卫星网络,由于节点间的时延很大,切换故障发现时间也很大,这将直接影响算法的切换丢包。实验表明

ISL HP 算法在切换保护恢复时间性能方面具有良好的性能。

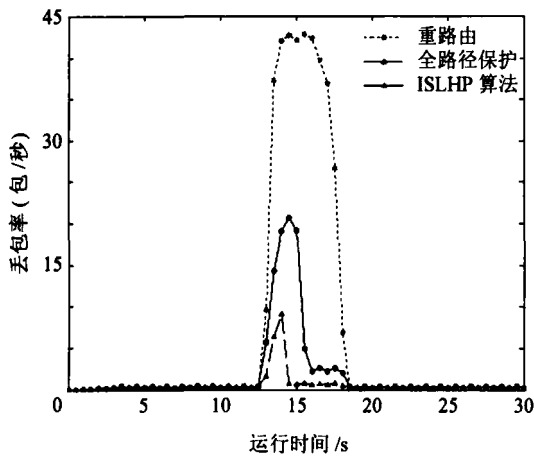


图 2 3 种算法切换丢包比较

Fig. 2 Comparison of three algorithms for the packet dropped

3.2 算法性能分析比较

实验比较了下列 3 种路由模式在算法有效性以及资源利用率方面的性能: ISL HP 算法(本地恢复), 全路径保护算法(1:1)以及无备份路径的重路由策略。实验中, P_r 为业务的切换中断概率, 其大小等于切换发生时该业务没有可用的备份路径的概率。该参数实际描述了切换时算法对业务进行保护的能力, 是评价算法有效性的重要指标。 P_c 表示业务耗费比, 用来描述算法在资源利用率方面的性能, 这里令 $C_{shortest}$ 表示该业务若不考虑切换备份所需的最小费用, 即从源端到目的端的最短路径费用和。则 $P_c = C / C_{shortest}$, P_c 越大则算法因切换保护需要的额外费用也越大, 网络资源利用率降低。实验假设网络中某链路总的带宽资源 $T_{ij} = 10b, \mu = 0.5$ 。

实验步骤如下: 首先用本算法随机产生 1 000 个业务, 得到网络的初始负载; 然后, 分别利用 ISL HP 算法, 全路径保护算法(1:1)以及无备份路径的重路由策略产生一个新的业务, 并计算相应的 P_r 和 P_c , 实验将重复该步骤 10 000 次, 最终所得结果取这些数据的平均值。实验中每个业务请求发生的时间在 $[0, T]$ 中随机选取, 源宿节点是在所有节点中随机选取, 业务所需带宽在区间 $(0, b)$ 中随机选取。由于门限概率 P 的大小将直接影响本算法的有效性、网络资源的利用率等性能, 实验分别给出 $P=0, 0.1, \dots, 1.0$ 时的结果。

如图 3 和图 4 所示, 当门限概率 $P=0$ 时, IS-

L HP 问题退化为一般的本地路径保护问题, 这时网络中所有的链路都得到了保护, 网络中业务因切换而中断的概率为 0, 但网络中存在着严重的备份资源浪费问题, 业务耗费比 P_c 约等于 4, 网络资源利用率很低; 随着 P 的增加, 网络中被保护的链路数目迅速下降, P_r 将不断增加, P_c 不断下降; 当 $P=1$ 时, ISL HP 问题将转化为无备份路径的重路由问题, 这时网络中不存在用于切换保护的备份路径, 业务切换中断概率很大(约 35%), 但网络资源利用率很高 ($P_c = 1$)。

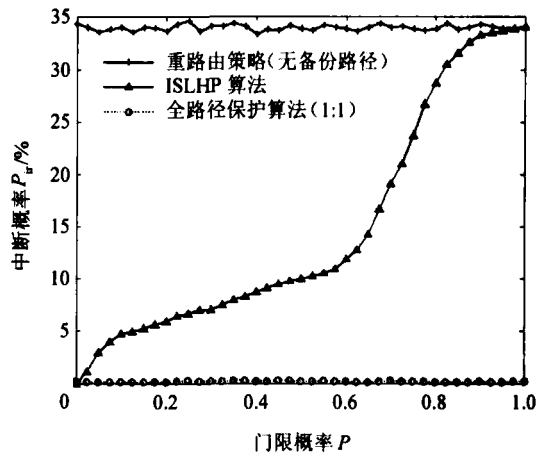


图 3 3 种算法业务切换中断概率比较

Fig. 3 Comparison of three algorithms for P_r

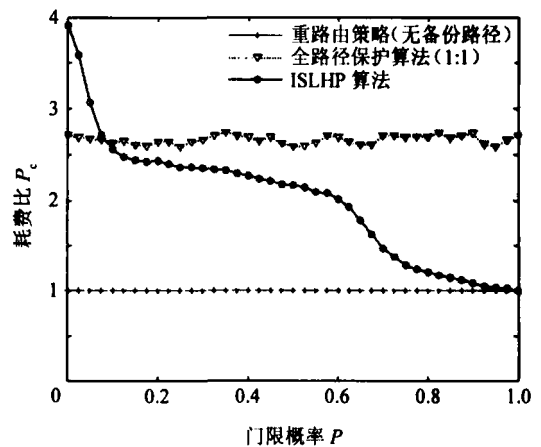


图 4 3 种算法业务耗费比较

Fig. 4 Comparison of three algorithms for P_c

实验中, 对于无备份路径的重路由策略, 其切换中断概率大小主要决定于具体的卫星网络拓扑和业务平均持续时间 μ , 由于实验中假设两相向飞行的轨道间存在星间链路, 因此其切换中断概率较大(约 35%)。对于全路径保护算法, 实验中针对所有的业务都将生成相应的备份路径, 因此 P_r 约为 0(存在一些波动的原因是

有少量路径无法生成满足条件的备份路径,因此存在少量中断现象)。

对于 ISL HP 算法,当 P 很小时 ($P < 0.1$),随着 P 的增加,算法的 P_c 将迅速下降,这是因为网络中大多数链路的切换概率 P 都很小 ($P < 0.1$),当 P 增加后,网络中将有大量的链路不需要生成备份路径,导致 P_c 急剧下降,同时这也带来了 P_r 的增加。当 $P > 0.1$ 后,这时网络中需要备份的链路都是一些相对不稳定的链路(如相向飞行的轨间链路、处于高纬度的轨间链路等),这些链路相对较少且 P 分布比较均匀,因此, P_r 和 P_c 的变化也相对平稳。当 P 很大时 ($P > 0.6$),网络中越来越多容易切换的路径得不到保护, P_r 将迅速增加。由此可见, P 的取值存在一个区间 X ,在 X 内,算法可以得到 P_r 和 P_c 性能较好地折中,当然, X 上下限的取值与具体卫星网络拓扑和业务平均持续时间 μ 等因素都有关。

3.3 关于业务路径长度的分析

由 ISL HP 算法设计可知,算法在生成业务路径过程中将备份路径费用折合到对应的链路中,得到新的费用 C ,这样基于 C 得到的最短(业务)路径长度(跳数)往往会大于不考虑备份路径时的最短路径长度,而且随着 P 值的变小,这种现象也越来越明显(如图 5 所示)。

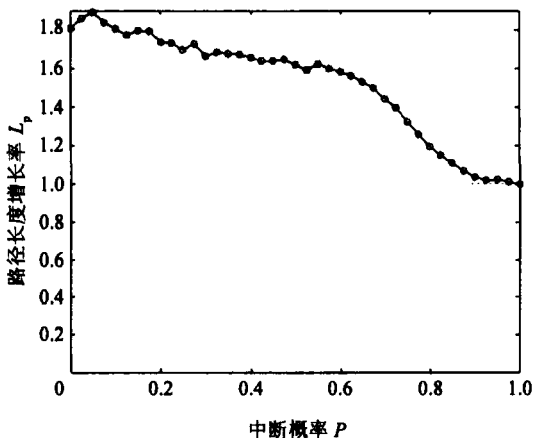


图 5 ISL HP 中 P 参数与业务路径长度的关系

Fig. 5 Relation of P with path length in ISL HP

图 5 中 $L_p = (\text{ISL HP 得到的业务路径跳数}) / (\text{不考虑备份路径时的最短路径跳数})$ 。实验参数以及步骤同 3.2 节。图 5 表明 ISL HP 算法将增加业务路径的长度,对业务时延等其他 QoS 参数的保证带来不利的影响,但这种影响可以通过引入系数 γ 来缓减(如图 6 所示)。

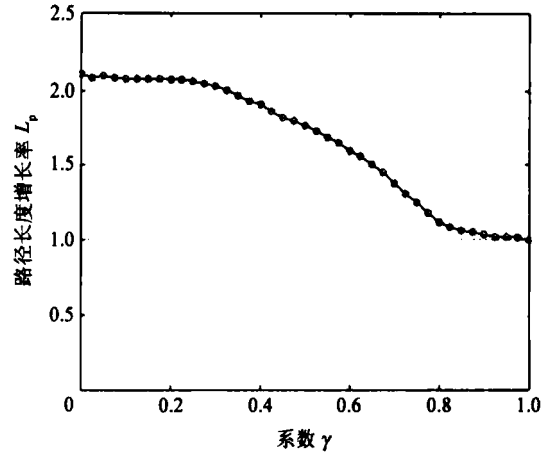


图 6 ISL HP 中 参数与业务路径长度的关系

Fig. 6 Relation of γ with path length in ISL HP

系数 γ 表示网络中备份资源的使用情况,可以用来描述网络中实际的备份资源耗费情况,其大小与网络中存在的低优先级业务(主要是指不需要切换保护的面向非连接的业务,如数据业务)有关,具体来说,若网络中存在大量的低优先级业务,根据算法设计,这些业务将占用大量的备份资源,此时,网络实际因备份而被闲置的资源将变少, γ 值将增大,反之, γ 值将变小。

对于本算法,随着网络 γ 值的增大,算法生成的备份路径将得到充分利用,实际浪费的资源将变少,这时,备份费用 C_b 在整个费用 C 中的比重下降,算法将更关注业务路径的费用 C_a ,最终得到的较短的业务路径(业务费用较小)。如图 6 所示,随着 γ 值的增大,算法生成的业务路径长度将逐渐接近不考虑备份路径时的最短路径长度(当 $\gamma > 0.8, L_p \rightarrow 1$),即当网络中存在较多的低优先级业务时,业务路径的长度将趋于最小。实验表明, ISL HP 算法可以根据网络中低优先级业务量的比例自主的调整主、备路径的长度,从而可得到最佳的网络资源利用率。

4 结 论

星间链路切换既不同于常见的用户越区切换,也不同于一般的网络故障。针对星间链路切换的特殊性,本文给出的 ISL HP 算法以本地恢复模式为基础,对发生切换的链路实行本地恢复,以获得快速、有效的切换保护;利用故障的可预测性、局部性来减少故障恢复带来的网络资源的浪费,以提高网络资源的优化利用。仿真结果表明:该算法可快速恢复切换路径,明显改善切换时网络的丢包率;通过对参数门限概率 P 的选取,算

法可以在保证切换路径保护性能的基础上,有效地降低网络中备份路径数目,获得很好的网络资源利用率。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Uzunalioglu H. Handover management in low earth orbit (LEO) satellite networks[J]. Mobile Networks and Applications, 1999, 4:301-310.
- [2] Uzunalioglu H. Probabilistic routing protocol for low earth orbit satellite networks[C]. ICC 98, IEEE. 1998: 89-93.
- [3] Werner M, Delucchi C, 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] 张涛,柳重堪,张军. 卫星时变拓扑网络最短路径算法研究[J]. 计算机学报,2006,29(3):371-377.
Zhang T, Liu Z K, Zhang J. A shortest path algorithm for satellite time-varying topological network [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(3): 371-377. (in Chinese)
- [5] Huang C C, Sharma V, Owens K, et al. Building reliable

MPLS networks using a path protection mechanism [J]. Communications Magazine, 2002, 40(3): 156-162.

- [6] Kodialam M, Lakshman T V. Dynamic routing of restorable bandwidth-guaranteed tunnels using aggregated network resource usage information [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(3):399-410.
- [7] Patterson D P. Teledesic: a global broadband network[C]. Aerospace Conference, IEEE. 1998: 547-552.

作者简介:



张涛(1973 -) 男,博士后。主要研究方向:移动通信、卫星网络通信。
E-mail: zhtao73@163.com



张军(1965 -) 男,北京航空航天大学电子信息工程学院院长,教授,博士生导师。主要研究方向:天空地一体化网络通信。
E-mail: buaazhangjun@vip.sina.com

(责任编辑:鲍亚平)