

# 高速因特网中含卫星单向链路的路由研究\*

强 刚<sup>1</sup>, 刘增基<sup>1</sup>, 水野忠则<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(西安电子科技大学 综合业务网国家重点实验室,陕西 西安 710071);

<sup>2</sup>(静冈大学 情报学部 水野研究室,静冈 滨松 432-8011,日本)

E-mail: gqiang@mcn.xidian.edu.cn

http://mcn.xidian.edu.cn

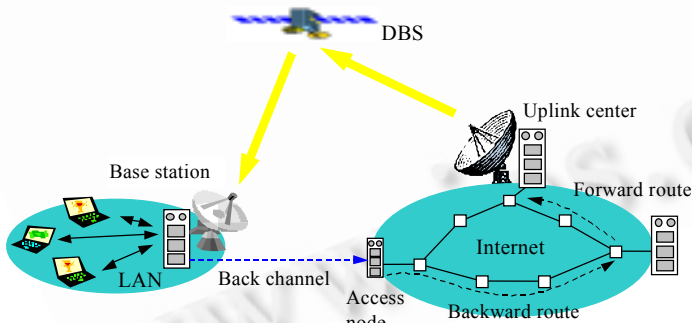
**摘要:** 由于多数卫星地面站只具有接收能力而形成了单向链路,无法应用现有的路由协议.为了解决含有卫星单向链路的路由问题,首先针对卫星直播系统的拓扑结构建立了网络模型,并在简化模型的基础上提出了基于环路发现的链路状态路由算法和一种基于服务器的协议——SERP(sever-based routing protocol).通过证明路由算法的收敛性,并利用 Network Simulator 工具对协议进行仿真的结果,得出 SERP 的正确性和具有协议开销小的特点,可用以支持在高速因特网中集成宽带卫星网络的动态路由.

**关键词:** 卫星直播系统;单向链路;环路发现;链路状态;路由协议

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

为了满足用户不断增长的需求,因特网渐渐渗透到通信的各个领域.尤其是在近些年,卫星通信系统,尤其是卫星直播系统,越来越多地被用于因特网高速接入.只有卫星系统能提供覆盖全球的宽带无线通信,与陆地通信系统相结合,以满足最终的通信需求.

## 1 卫星直播系统



终端站, 反向信道, 接入点, 后向路由, 前向路由, 上行中心.

Fig.1 Interconnection of satellite systems

图 1 基于卫星系统的网络互连

卫星通信系统依据数据速率、地面站大小和功率需求分为不同的种类,其中卫星直播系统(direct broadcast system,简称 DBS)以其在功能性和便携性上的较好折衷得到广泛应用.本文以美国休斯公司的 DirecPC 系统作为讨论原型(如图 1 所示).该卫星系统提供了一条高速卫星下行链路和一条独立的低速反向信道.地面上行中心站收集来自于因特网的数据流,然后通过同步卫星转发到地面终端站,再由地面终端站按照具体目的地址来转发数据.地面终端站可以直接和有线局域网相连,也可以和

\* 收稿日期: 2001-04-05; 修改日期: 2002-01-24

基金项目: 美国休斯公司研究室合作课题资助项目(S1-702438-7)

作者简介: 强刚(1974 - ),男,陕西韩城人,博士生,主要研究领域为移动计算;刘增基(1937 - ),男,浙江丽水人,教授,博士生导师,主要研究领域为下一代信息网络的理论及关键技术;水野忠则(1945 - ),男,日本名古屋人,博士,教授,主要研究领域为计算机网络,移动计算.

无线局域网相连.反向信道是连接无线(或有线)局域网和因特网之间的链路.异地计算机在有一条构建于电信基本设施之上的独立反向信道来发送返回信息的前提下,可以通过 DBS 卫星系统联入因特网,从而达到在任何时间、任何地点接入因特网以及进行全球通信的目的.高速的 DBS 卫星下行链路和独立反向信道形成了 DBS 系统的非对称联接.

## 2 含单向链路的路由问题

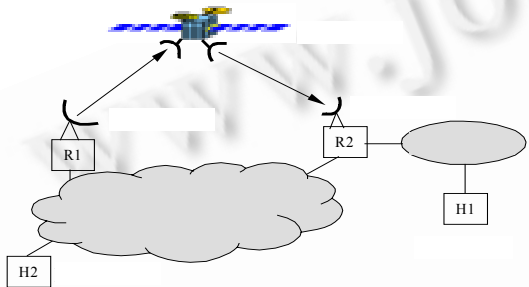
单向链路最明显的特性就是不能进行双向通信,这将给现有路由协议带来以下几个重要影响:

- 可达性信息难以维护.在双向链路的网络中,侦听相邻节点的周期性广播足以判断和维护相邻节点的可达性.然而在存在单向链路的网络中,这是不够的.
- 量度不对称.多数的路由协议假定链路的量度是对称的,并根据这个假定从接收到的路由信息中推算出反向的路由量度.这种方法在单向链路的网络中将不再是正确的.

IETF 的 UDLR 工作组针对这些问题把含单向链路的路由化分为两种情况:

情况 1. 单向链路重叠在双向链路网络之上(如图 2 所示).

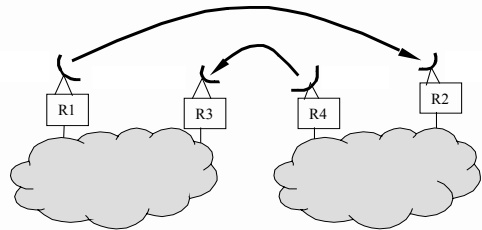
情况 2. 双向链路网络的孤岛通过单向链路联接(如图 3 所示).



卫星, 发送端, 接收端, 子网 A, 双向链路网络, 主机.

Fig.2 Unidirectional links overlays on bi-directional networks

图 2 单向链路重叠在双向链路网络之上



发送端, 接收端, 双向链路网络.

Fig.3 Isolated bi-directional networks connect via unidirectional links

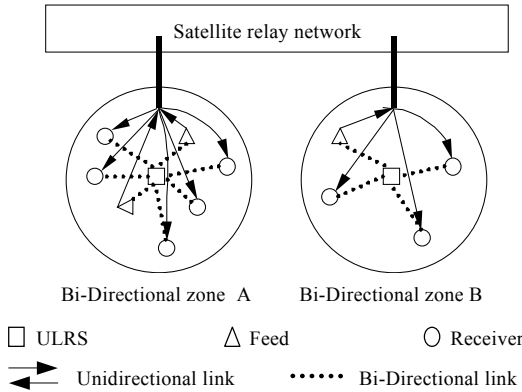
图 3 双向链路网络的孤岛通过单向链路互联

目前解决情况 1 中路由问题的方案主要有两种,一种是修改现有标准路由协议使之能利用双向链路为单向链路建立反向信道,比如修改 RIP 协议<sup>[1,2]</sup>;另一种是隧道技术<sup>[3]</sup>,利用双向链路建立并维护单向链路接收端到发送端的反向隧道从而实现双向通信.对于情况 2,拓扑更为复杂,单向链路用来联接双向链路网络的孤岛.由于孤岛间的链路都是单向链路,无法建立反向信道或隧道,所以前面提到的两种方案在这里都不适用.Ernst 和 Dabbous 提出了一种基于回路的方案<sup>[4]</sup>,能处理含单向链路各种拓扑结构下的路由.该方案认为所有的链路都是单向的,原来的双向链路被认为是两条反向的单向链路,路由问题就变成了寻找最佳回路的问题.然而,双向链路在因特网中始终占主导地位,不加区别地将单向链路的路由信息扩散到双向链路网络并不是一种优化的方法,尤其对于大规模的应用,将会增加系统开销.

## 3 网络模型

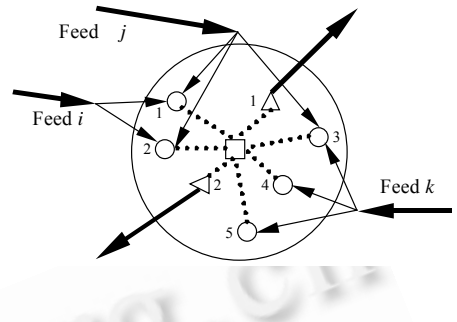
在因特网中集成卫星直播系统的典型网络结构如图 4 所示.双向区域(bi-directional zone,简称 BZ)通过卫星单向链路及卫星中继网络互联,双向区域可以是孤岛,也可以是因特网中并不孤立但相对独立的自治系统.在每个双向区域内,节点通过双向链路互联.节点中有 3 类特殊节点——发送端、接收端和单向链路注册服务器(unidirectional link register server,简称 ULRS).

按照传统的定义,我们把如图 4 所示的网络模型化为图 5.不考虑单向链路的情况下,一个双向区域可以看作是一个无向图  $G_b = (N, L)$ ,  $N$  表示所有节点,  $L \subseteq N \times N$  是双向链路的集合.引入 ULRS 以后,双向区域的单向链路拓扑为  $G_u = (V, A)$ ,  $V = \{S, F, R\}$ , 其中 S, F, R 分别表示 ULRS、发送端和接收端,  $A$  是单向链路的集合.



卫星中继网络, 双向区域, 发送端, 接收端, 单向链路, 双向链路.

Fig.4 Network architecture of satellite system  
图4 因特网中卫星系统的网络结构



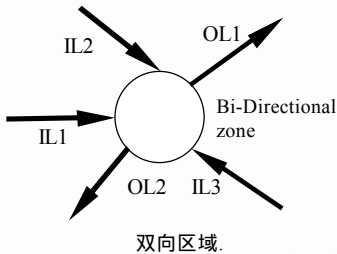
发送端.

Fig.5 Unidirectional links in BZ A  
图5 双向区域 A 内的单向链路

由于卫星系统的覆盖面积各不相同,一个双向区域内的接收端按照其能接收信息的来源(即发送端)来分组(如图 5 所示).接收端 1,2 能接收发送端  $i$  发来的信息,接收端 1,2,3 能接收发送端  $j$  发来的信息,接收端 3,4,5 能接收发送端  $k$  发来的信息,发送端  $i,j,k$  位于双向区域 A 或其他双向区域.于是 A 内的接收端分组为  $\{R\}_1 = \{1\ 2\}$ ,  $\{R\}_2 = \{1\ 2\ 3\}$  和  $\{R\}_3 = \{3\ 4\ 5\}$ ,并且每个分组对应一条下行链路,称为双向区域的输入链路(incoming link,简称 IL),比如 IL1,IL2 和 IL3.同时,每个发送端对应一个上行链路,称为双向区域的输出链路(outcoming link,简称 OL),比如图 5 中的发送端 1,2 分别对应输出链路 OL1 和 OL2.只要单向链路的注册过程能正确完成,ULRS 就能够得出并维护双向区域内的输入链路和输出链路信息,从而得出图 4 中双向区域内单向链路拓扑的模型:

$$G_u = (\{S, F_m, \{R\}_n\}, \{OL_m, IL_n\}), \tag{1}$$

其中  $m$  为输出链路的数目, $n$  为输入链路的数目.



双向区域.  
Fig.6 Simplification of Fig.5  
图6 图5的简化

根据式(1),图 5 可以被简化为图 6.联接双向区域的单向链路拓扑结构可以进一步模型化为

$$G_u = (S, L). \tag{2}$$

其中  $S$  为单向链路注册服务器,用来代表双向区域; $L$  是  $OL$  和  $IL$  的集合.另一方面,所有双向区域的拓扑结构可以表示为

$$G_B = G_b. \tag{3}$$

这样,整个网络就分成了  $G_B$  和  $G_U$  两个部分.我们可以对  $G_B$  采用传统的链路状态路由算法,而对  $G_U$  采用本文提出的基于环路发现的链路状态路由算法.

#### 4 基于环路发现的链路状态路由算法

根据前面讨论的网络模型,在每一个双向区域内部采用现有的链路状态路由算法,比如 OSPF(open shortest path first)<sup>[5]</sup>,这样每个节点能够动态地获得区域内双向拓扑的全部信息,从而可以计算路由.ULRS 在作为一个特殊节点的同时也是双向区域中的节点,也能动态地获得双向拓扑的全部信息.另一方面,ULRS 通过单向链路注册获得联接该区域单向拓扑的信息,进一步代表整个双向区域在  $G_U$  中执行基于环路发现的链路状态路由算法.

##### 4.1 环路发现算法

模型  $G_u = (S, L)$  是一个有向图,其中单向链路  $u \rightarrow v \in L$  当且仅当节点  $v$  能够从节点  $u$  接收信息.节点  $u$  称为该链路的头,节点  $v$  称为该链路的尾.环路发现算法就是寻找包含这样一条链路的最小包含圆,使得链路的头尾的

双向通信通过这个包含圆进行.

定义.  $|...|$  为一条链路、路径或一个圆的长度;  $v \mapsto u$  为从  $v$  到  $u$  的最短路径;  $l_{u \rightarrow v}^i$  为节点  $i$  上链路  $u \rightarrow v$  的状态, 包括链路长度  $l_{u \rightarrow v}^i, c$ 、最小包含圆的长度  $l_{u \rightarrow v}^i, cs$  和该状态信息的序列号  $l_{u \rightarrow v}^i, sn$  等信息;  $ic_{u \rightarrow v}^i$  为节点  $i$  上链路  $u \rightarrow v$  的包含圆;  $dp_{u \rightarrow v}^i$  为节点  $i$  上链路  $u \rightarrow v$  的发现路径;  $SPT_i$  为节点  $i$  上的最短路径树.

链路  $u \rightarrow v$  的一个包含圆定义为  $ic_{u \rightarrow v} = u \rightarrow v + v \mapsto u$ , 其长度是由链路的头来决定的, 也就是说,  $|ic_{u \rightarrow v}| = l_{u \rightarrow v}^u, cs$ . 最小包含圆指示出了链路尾到链路的头的最短路径. 当链路头、尾都知道链路  $u \rightarrow v$  的存在时, 节点  $u$  就可以在路由算法中把  $u \rightarrow v$  作为有效链路, 同时, 节点  $v$  知道如何沿着包含圆将信息  $SPT_v$  传送到节点  $u$ . 为了寻找单向链路的包含圆,  $G_U$  中任一节点要提供环路发现路径  $dp_{u \rightarrow v}^i$  以指示出链路尾到达该节点的最短路径, 即  $dp_{u \rightarrow v}^i = v \mapsto i$ . 所有链路的  $dp_{u \rightarrow v}^i$  集合构成了节点  $i$  上的发现路径图  $DG_i$ . 当发现路径满足以下关系时, 状态信息  $l_{u \rightarrow v}^i$  将在  $G_U$  中扩散:

$$|dp_{u \rightarrow v}^i| + l_{u \rightarrow v}^i, c \leq l_{u \rightarrow v}^i, cs. \tag{4}$$

在此基础上, 链路尾负责跟踪链路长度的变化、确定信息的序列号和链路状态的生存期; 链路头负责设置包含圆的长度——当链路状态及其发现路径信息到达链路头时, 包含圆的长度被确定为

$$l_{u \rightarrow v}^u, cs = |v \mapsto u| + l_{u \rightarrow v}^u, c \quad \text{if } l_{u \rightarrow v}^u, cs > |v \mapsto u| + l_{u \rightarrow v}^u, c. \tag{5}$$

定理 1(收敛性). 最小包含圆的长度能在有限的时间内确定.

证明: 假设  $\forall l = u \rightarrow v \in L, l_{u \rightarrow v}^u, cs = \alpha$ . 如果存在一个包含圆  $ic_{u \rightarrow v}$  的长度小于  $\alpha$ , 那么存在  $\forall i \in ic_{u \rightarrow v}, i \in S$ , 将提供该节点上  $u \rightarrow v$  的发现路径, 且  $|v \mapsto i| + l_{u \rightarrow v}^i, c \leq |ic_{u \rightarrow v}| < \alpha$ . 根据式(4), 状态信息  $l_{u \rightarrow v}^i$  将在  $G_U$  中扩散, 使得链路头  $u$  知道  $ic_{u \rightarrow v}$ , 并按照式(5)把包含圆的长度  $l_{u \rightarrow v}^u, cs$  更新为  $|ic_{u \rightarrow v}|$ .

当一条新链路出现的时候, 其包含圆长度初始化为  $\infty$ , 这样会导致链路状态信息在  $G_U$  中尽可能地扩散. 一旦发现一个包含圆, 链路状态信息的扩散就将被限制在有限的范围之内. 如果最小包含圆上的某条链路断掉了并且没有其他包含圆可以替代时, 链路头只需将包含圆长度重设为  $\infty$ , 以触发扩散搜索包含圆的过程(如图 7 所示). 图中所有链路的长度都为 1. 当  $l_{u \rightarrow v}^u, cs = \infty$  时, 节点  $b$  提供  $dp_{u \rightarrow v}^b = v \rightarrow c \rightarrow b$ . 当发现包含圆  $u \rightarrow v \rightarrow u$  且  $l_{u \rightarrow v}^u, cs = 2$  以后, 节点  $b$  就停止提供链路  $u \rightarrow v$  的发现路径.

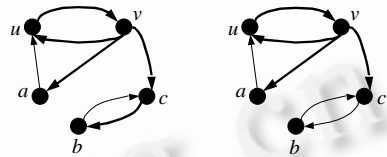


Fig.7 Discovery path of  $u \rightarrow v$  on node  $b$   
图 7 节点  $b$  上链路  $u \rightarrow v$  的发现路径

### 4.2 协议的路由算法

SERP 采用的是链路状态路由算法. 对于每一个  $G_b$ , 现有的链路状态路由算法的两个过程(相邻节点交换链路状态数据库和扩散链路状态更新)足以完成双向区域内的路由计算. 于是, SERP 路由算法的重点是如何处理联接双向区域的单向链路状态.

当环路发现算法发现单向链路的包含圆之后, 单向链路的链路状态将被引入双向区域中的分布链路状态数据库, 引入过程必须遵循以下法则:

法则 1.  $G_U$  中的每个节点必须建立一个通过单向链路到达其他节点的生成树, 但所有节点的生成树不需要一致.

法则 2. 一个节点把单向链路的连通性假想为双向连通性并引入  $G_b$ , 当且仅当该链路是生成树的一部分. 一个单向链路的状态实际上对应于一束链路——从一个发送端到其相应的接收端分组.

法则 3. 一个节点应把位于其生成树上其他  $G_b$  的链路状态沿着包含圆扩散引入自身所在的  $G_b$ .

法则 1 和法则 2 保证单向链路状态的引入不会导致错误路由. 比如, 一个实际的网络连通性如图 8(a)所示. 如果不考虑生成树而把单向连通性假想为双向连通性引入  $G_b$ , 那么假想的连通性将是图 8(b)的形式, 其中  $a \rightarrow c \rightarrow d$  显然是一条错误路由. 这种错误是由回路引起的, 而回路上所有双向链路并非真的都是双向, 有的是假

想双向.因此,建立生成树可以产生无回路的假想拓扑,从而避免导致错误路由.图 9 给出了在每个节点建立生成树的条件下,图 8(a)的假想连通性.法则 3 使得所有有效的链路状态可以被用来在  $G_B$  中计算路由.因为链路状态路由算法和环路发现算法都是收敛算法,所以 SERP 的路由算法也保证了收敛性.

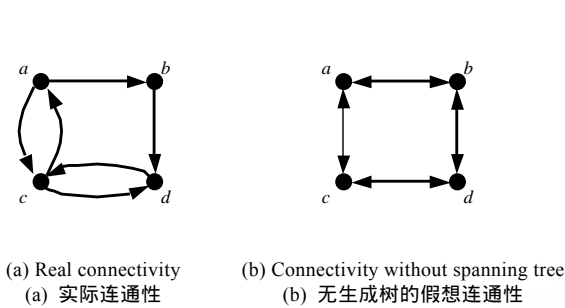


Fig.8  
图 8

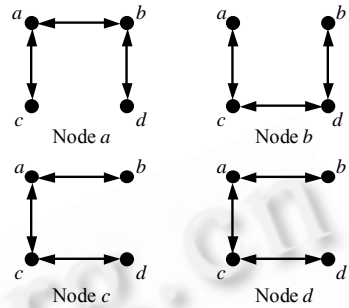


Fig.9 Connectivity with spanning tree  
图 9 节点建立生成树的假想连通性

### 5 协议功能模块

SERP 包括两个功能模块:单向链路注册协议(UDL registration protocol,简称 URP)和链路状态转发协议(link states forwarding protocol,简称 LSFP).

#### 5.1 单向链路注册协议

单向链路注册协议的功能是在双向区域中收集并维护输入链路和输出链路的状况.每一个发送端或接收端可以检测到单向链路接口的存在,比如通过低层协议的通告或者手工设置;并且知道 ULRS 的网络标识 SNI(通常就是 IP 地址).单向链路注册协议的工作过程如下:

步骤 1. 任意发送端,比如  $F_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ),在启动或从故障中恢复以后,立即向其所在双向区域内的 ULRS 注册单向链路接口的网络标识  $F_iUNI$ .接着,在该接口上周期性地广播 HELLO 报文.HELLO 报文包括单向链路的状态信息:  $F_iUNI$ , SNI, 包含圆长度等等,并按照环路发现算法工作.这样,一旦发现单向链路的包含圆,HELLO 报文将只在包含圆所包含的链路上广播.

步骤 2. 任意接收端,比如  $R_i$ ,当直接从一个发送端  $F_j$  接收到 HELLO 报文或者通过扩散得到 HELLO 报文时,向其所在双向区域内的 ULRS 注册.注册内容包括接收端单向链路接口的网络标识  $R_iUNI$  以及从 HELLO 报文中提取的单向链路状态信息.

步骤 3. 通过收集到的注册信息,ULRS 能够得出式(1)所示的网络模型.对每一组  $\{R\}_k, 1 \leq k \leq n$ , ULRS 设置  $MIN\{R\}_k = R_i$  来表示 ULRS 到这个接收端的花费最小.由于  $\{R\}_k$  组内的所有接收端从同一条输入链链  $IL_k$  接收同样的单向链路路由信息,所以,要避免转发重复报文,应该只从接收端  $MIN\{R\}_k$  转发.为了达到这个目的,ULRS 向其他花费大的接收端发送 STOP\_FORWARD 报文,报文中包含着组信息和 STOP\_FORWARD 命令.如果某个发送端或接收端从  $G_B$  中脱离或者它的单向链路故障,ULRS 将在注册表中删除与之相关的信息.如果删除的节点是某个  $MIN\{R\}_k$ , ULRS 将选择另一个来代替.

#### 5.2 链路状态转发协议

链路状态转发协议的首要任务就是为单向链路寻找包含圆.随着发送端和接收端周期性地通过 HELLO 报文扩散单向链路状态信息,ULRS 计算出最新的最小包含圆,并通过已知的注册信息建立生成树.然后,ULRS 按照法则 2 把单向链路状态信息引入双向区域.协议的另一个任务是引入并维护其他  $G_b$  内的双向链路状态信息.发送端和接收端负责扩散这些状态信息,由 ULRS 按照法则 3 引入并加以维护.

## 6 性能分析与仿真

设计一个动态的路由协议,最重要的因素就是协议的效率.而协议的开销是影响协议效率最重要的因素,较小的开销能带来较好的性能.基于第3节讨论的网络模型,在本节中我们着重分析 SERP 维护动态路由的正确性所需要的开销,也就是控制报文的数量.

单向链路注册协议的复杂度取决于双向区域的输入、输出链路的数目,需要的控制报文包括:发送端注册报文、接收端注册报文和  $\text{MIN}\{R\}_k$  选择报文.它们的总和为

$$N_{\text{URP}} = \sum_{1 \leq i \leq m} L(F_i) + \sum_{1 \leq i \leq n} L(\text{MIN}\{R\}_i) + \sum_{1 \leq i \leq n} \sum_{R_j \in \{R\}_i} L(R_j), \quad (6)$$

其中  $L(V)$  表示节点  $V$  到 ULRS 的链路数.

链路状态转发协议的复杂度取决于包含圆的长度,对每一个包含圆所需的控制报文数目为

$$N_{\text{LSFP}} = \sum_{BZ_i \text{ on the circle}} L(F_{A_i}) + L(\text{MIN}\{\{R\}_{A_i}\}), \quad (7)$$

其中  $V_{A_i}$  表示包含圆上  $BZ_i$  所使用的发送端或接收端.

利用 Network Simulator(版本 2)来仿真 SERP 协议,并与 Ernst 和 Dabbous 的回路方案<sup>[4]</sup>进行比较.仿真采用的网络拓扑如图 10 所示.存在 3 个双向区域通过卫星单向链路互联,每个双向区域内有 7 个节点:1 个 ULRS、2 个普通节点、3 个接收端和 1 个发送端.仿真通过节点的插入和删除事件来模拟实际网络中节点的故障和恢复.通过对不同节点进行插入和删除,得到了两种方案对应于一个事件所需的平均控制报文数,如图 11 所示.可以看出,SERP 协议的开销大约只有回路方案的一半,并且对于更大规模的网络拓扑结构,SERP 将取得更好的结果.

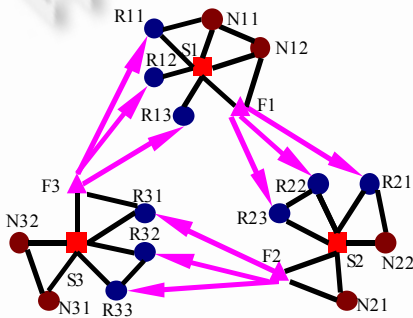
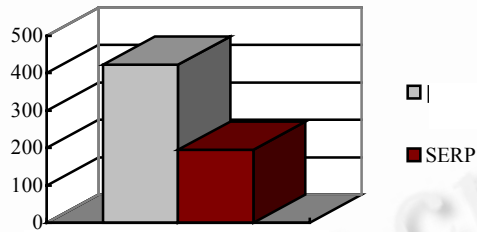


Fig.10 Topology for simulation  
图 10 仿真的拓扑结构



每个事件所需的平均控制报文数, 回路方案.  
Fig.11 Simulation result  
图 11 仿真结果

## 7 结论

本文介绍了一种基于服务器的路由协议,以支持高速因特网中集成宽带卫星网络的动态路由.该协议基于应用最广泛的链路状态路由算法,其主要技术特点是引入了单向链路注册服务器和环路发现算法.ULRS 能够在双向链路网络的孤岛内集中处理单向链路信息,从而简化网络模型.双向链路和单向链路得到区别对待,达到了优化路由算法的效果.另外,SERP 只需在发送端、接收端和 ULRS 上更改现有协议,具有易于应用的特点,甚至可以看成是现有协议算法的补充.不过,SERP 是针对双向区域通过单向链路联接的卫星网络典型应用而设计的,只适用于这种网络拓扑结构相对稳定的情况,而不适用于网络拓扑变化频繁且单向链路任意存在的应用,比如 ad-hoc 网络.

### References:

[1] Duros, E., Dabbous, W. Supporting unidirectional links in the Internet. In: Proceedings of the 1st International Workshop on Satellite-Based Information Services. Rye, New York, 1996.

- [2] Durosl, E., Huitema, C. Handling of unidirectional links with RIP. Internet Draft. INRIA Sophia-Antipolis, 1997. <http://www.ietf.org/proceedings/99jul/I-D/draft-ietf-udlr-rip-00.txt>.
- [3] Hanks, S. Generic routing encapsulation. IETF RFC 1701. NetSmiths Ltd., 1994.
- [4] Ernst, T., Dabbous, W. A circuit-based approach for routing in unidirectional links networks. Research Report 3292, INRIA, 1997. <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3292.html>.
- [5] Moy, J. Open Shortest Path First—OSPF Version 2. IETF RFC 1583, Proteon Inc., 1994.

## Research on Integrating Satellite Unidirectional Links with High Speed Internet\*

QIANG Gang<sup>1</sup>, LIU Zeng-ji<sup>1</sup>, Mizuno Tadanori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(National Key Laboratory, Intergrated Service Network, Xidian University, Xi'an 710071, China);

<sup>2</sup>(Mizuno Laboratory, Department of Computer Science, Shizuoka University, Hamamatsu 432-8011, Japan)

E-mail: gqiang@mcn.xidian.edu.cn

<http://mcn.xidian.edu.cn>

**Abstract:** Unidirectional links brought by many receive-only stations are not suitable for current routing protocols. To solve the unidirectional routing problem, a network model is built for the topology of direct broadcast systems. By simplifying the network model, a link state routing algorithm based on circle discovery and a new protocol SERP (sever-based routing protocol) are proposed. By means of proven convergency of the routing algorithm and simulating results from network simulator tool for the protocol, the correctness of SERP is verified, which has fewer overheads and supports dynamic routing for integrating broadband satellite networks with high speed Internet.

**Key words:** DBS (direct broadcast system); unidirectional link; circle discovery; link state; routing protocols

---

\* Received April 5, 2001; accepted January 24, 2002

Supported by the Research Project Cooperated with Hughes Research Laboratory of America under Grant No.S1-702438-7