

面向高动态高空平台网络的路由协议研究

吴伟强, 郑石, 张钦宇

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 提出了一种面向高动态高空平台网络的路由协议, 该协议通过按需查找方式确定高动态用户所属的高空平台, 根据最短延时路由表在高空平台之间转发数据, 并通过用户切换策略保证数据传输的连续性。仿真结果表明, 该协议能够适应用户高速移动和频繁切换的高动态环境, 具有可靠性高、延时小、路由开销小、抗毁性强等特点, 为高动态高空平台网络的数据转发提供了一种可行的解决方法。

关键词: 高空平台; 路由协议; 切换策略; 高动态

中图分类号: TN927

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)01-0153-07

Research on high dynamic high altitude platforms network oriented routing protocol

WU Wei-qiang, ZHENG Shi, ZHANG Qin-yu

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A high dynamic high altitude platforms network oriented routing protocol was proposed. In this protocol, high dynamic users were looked up on demand, and then data was forwarded by platforms according to the route table based on the shortest delay time. The protocol can keep the continuity of data transmission by the handoff strategy. The simulation results show that this routing protocol is adapted to the network in which users move with high speed and handoff frequently. It has character of high reliability, short delay, low route load and invulnerability. So it can be a feasible solution of data forward problem in high dynamic high altitude platforms network.

Key words: high altitude platforms; routing protocol; handoff strategy; high dynamic

1 引言

高空平台 (HAP, high altitude platform) 是一种能够长时间停留在高空 (一般为距地球表面 20~50km), 并且具有通信和信息处理能力的飞行器, 以高空飞艇和高空气球为主^[1]。近年来, 动力、能源和材料等相关技术的发展, 推动了高空平台通信系统走向实际应用的进程, 美国、日本等国已经进行了高空平台的高空飞行实验^[2,3]。

随着高空平台技术的不断发展, 基于高空平台

的通信网络也受到了越来越多的关注, 目前各国都在积极开展相关技术与应用的研究^[4,5]。与地面通信网络相比, 高空平台网络具有覆盖范围大、设备少、抗毁性强等优点; 与卫星通信网络相比, 高空平台网络具有容量高、延时小、路径衰减小等优点。同时, 高空平台网络可以实现迅速灵活地部署, 易于维护和升级, 是实现大范围区域覆盖的理想通信系统。高空平台网络与卫星和地面网络的结合, 有望成为一种新的空天地一体化的信息网络, 可作为灾难、战争环境下的应急通信系统, 也可作为传统通

收稿日期: 2010-07-02, 修回日期: 2010-11-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目(2009CB320402)

Foundation Item: The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320402)

信网络的扩展，为异构网络的融合提供支持，具有广阔的应用前景。

高空平台网络由多个覆盖不同区域的高空平台构成骨干节点，用户之间的数据在骨干节点之间进行多跳转发，为保障这种新型网络的正常运行和数据传输，路由技术的研究具有重要意义。但目前针对高空平台网络路由技术的研究处于起步阶段，现有研究成果较少。文献[6]针对由同步卫星、空间平台、地面用户构成的多层网络，提出了优化的路由算法，通过在跳数最小的路径中选择拥塞程度最低的路径来降低信息阻塞的概率。文献[7]利用遗传算法，通过建立开销最小的多播树进行多播路径的优化。文献[8]将数据分组级别的前向纠错编码与多播路由结合，通过发送冗余的数据分组，减少数据的重传，提高多播路由的性能。

现有研究中，高空平台网络都是作为传统卫星通信或者地面通信的扩展，所服务的用户为地面上的固定用户或者移动终端，相对于一个高空平台的覆盖区域来说，用户的移动性小、速度慢，整个网络的拓扑结构比较稳定，其路由协议也是以网络中的骨干节点能够掌握网络拓扑结构为前提的。

在未来的空天地一体化网络中，网络的用户不仅包括传统的地面用户，还包括天空中的各种高速飞行器。目前先进的战斗机、无人侦察机，其飞行速度可达到 3~4 马赫，未来使用下一代超音速燃烧冲压发动机的飞行器将可以 6~10 马赫的速度飞行。由于飞行器移动速度快、动态性高，在各个高空平台的覆盖范围（通常覆盖半径为几百公里）间频繁切换，造成网络拓扑结构的频繁变化，形成高动态高空平台网络。在高动态高空平台网络中，网络节点随时掌握全局拓扑结构比较困难，对路由协议的可靠运行提出了挑战。目前还没有对这一问题的深入研究，而现有的无线网络协议也很难适应这种网络环境，因此研究高动态高空平台网络的路由协议具有重要意义。

本文对面向高动态高空平台网络的路由技术进行研究。针对高动态用户在高空平台子网之间的高速移动和频繁切换设计了用户切换策略，在此基础上以保证路由的可靠性为出发点，兼顾低开销和低延时要求设计了高空平台网络路由（HAPNR, high altitude platforms network route）协议，为此类网络的数据转发提供了一种解决方法。

2 网络拓扑结构及路由设计要求

2.1 高动态高空平台网络拓扑结构

目前，高空平台网络普遍采用高空平台和同步卫星相结合的网络结构，以便充分发挥同步卫星覆盖范围大和高空平台传输延时小的优势。本文的高动态高空平台网络拓扑结构中，利用同步卫星和高空平台构成网络的骨干节点，为高动态飞行器用户提供服务。网络的拓扑结构如图 1 所示。

按空间高度划分，最上层是距离地面 35 786km 的同步卫星，负责收集高空平台的拓扑信息，计算高空平台之间的路由表，并在用户无法与高空平台连接时，为用户提供数据中继服务。中间距离地面 20~50km 的高空是由多个高空平台组成一个多跳网络，负责转发用户之间的信息。与通过卫星转发相比，通过高空平台进行信息的转发可以明显地降低数据的端到端延时，并且由于路径衰减小，可以使用户采用较低的功率发送数据，所以在网络中用户的信息尽可能通过高空平台转发。在高空平台以下是高动态用户，包括各种军用、民用飞行器。

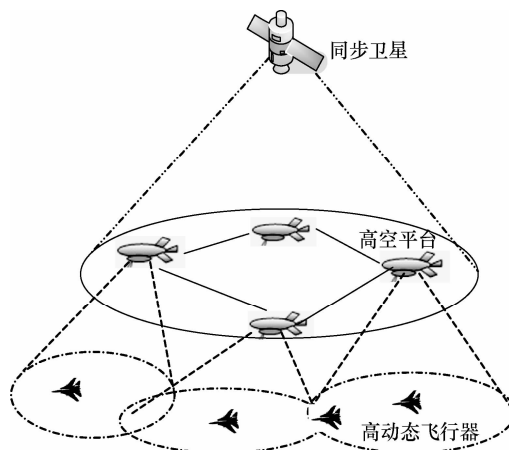


图 1 网络拓扑结构

在网络中，同步卫星和高空平台都具有线上处理能力，为数据的转发提供支持。每一个高空平台所覆盖的区域称为一个高空平台子网。用户与所在子网的高空平台以及同步卫星之间存在直接相连的链路，不同用户之间没有直接相连的链路。用户之间的信息需要通过高空平台或者卫星进行转发。网络具有以下特点。

- 1) 骨干节点拓扑稳定。
- 2) 用户位置高速动态变化。
- 3) 用户之间采用多跳方式传输数据。

4) 骨干节点间距离远, 数据传播延时不可忽略。

2.2 路由协议设计要求

在高动态高空平台网络中, 节点之间距离远 (高空平台之间的距离为几百千米), 信息在空间中的传播延时比较大, 由此造成数据的端到端延时加大。如果数据的传输出现错误, 需要重新传输, 将更大程度地加大数据的端到端延时, 使网络付出更大的代价。为保证路由任务的完成和数据的正确传输, 在路由协议的设计中应首先考虑协议的可靠性。

由于飞行器具有高动态性, 在数据端到端延时比较大的情况下, 飞行器在发送或接收数据的时候其空间位置将产生很大变化, 容易使路由协议所选择的传输路径产生错误, 造成数据的丢失。因此路由协议的设计应该尽量降低数据传输的端到端延时。

由于网络中的骨干节点主要由卫星和高空平台组成, 受到载荷重量等因素限制, 节点的计算能力、处理能力受到限制, 因此路由协议运算应尽量简单, 并且应尽量减小路由开销。

同时为适应网络环境频繁变化等特点, 并且考虑军事及灾难环境下的应用, 路由协议应具有较强的抗毁性, 在部分节点损坏的情况下仍然能进行工作。

综合以上分析, 结合高动态高空平台网络特点, 路由协议的设计要求是: 高可靠性、低延时、低开销和较强的抗毁性。

3 用户切换策略

在网络正常运行的情况下, 用户的所有数据都通过所在子网的高空平台转发, 建立用户与高空平台子网的对应关系是网络完成路由任务的前提。由于用户具有高动态性, 可频繁地在各个高空平台子网中穿越, 使用户与高空平台子网的对应关系频繁地改变, 因此用户在子网间的切换策略是路由设计中必须考虑的问题。

本文提出了一种适用于高动态用户的切换策略, 切换过程如图 2 所示。

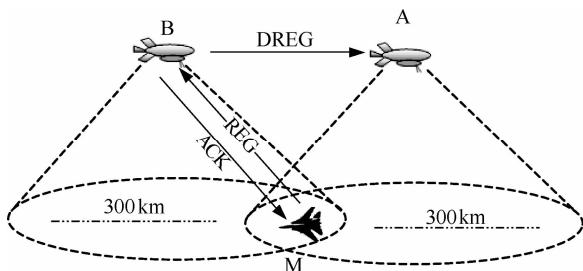


图 2 用户切换过程

用户 M 从 A 子网向 B 子网移动过程中, 当 M 决定加入 B 子网时, 各节点进行以下操作。

1) M 向 B 发送注册信息 (REG, registration information), 请求加入 B 子网。REG 的格式和内容如图 3 所示。

消息类型	用户 ID	新子网	原子网
REG	M	B	A

图 3 REG 信息

2) B 向 M 回复确认信息 (ACK, acknowledgement) 同意 M 加入 B 子网。ACK 信息格式和内容如图 4 所示。

消息类型	用户 ID	新子网	确认加入
ACK	M	B	TRUE

图 4 ACK 信息

3) B 向 A 发送取消注册信息 (DREG, delete registration information), 取消 M 在子网 A 中的注册, 并将 M 当前所在的子网信息通知 A。DREG 信息格式和内容如图 5 所示。

消息类型	取消用户	新子网	原子网
DREG	M	B	A

图 5 DREG 信息

在切换过程中, 用户 M 始终与某个高空平台 (A 或 B) 保持连接, 在任何时刻当用户有数据发送, 都可以直接发给相应的高空平台, 并且由于 B 会将 M 更新后的子网信息通知 A, 当 A 还有数据要转发给 M 时, A 将数据通过 B 进行转发, 同时 A 向源用户的子网发送 DREG 信息, 将目的用户的切换信息通知源用户所属的高空平台。通过这种切换方法, 保证了用户在切换时收发数据的连续性, 并且使源用户能够及时了解目的用户的切换状态, 是路由建立和数据转发的基础。

4 HAPNR 协议

4.1 HAPNR 协议总体思想

由于骨干节点的拓扑稳定, 骨干节点之间可以建立稳定的路由表, 当数据在骨干节点之间进行转发时可以直接查找路由表进行传输, 减少路由建立

所需的时间。

由于高动态用户在不同子网之间频繁切换，在各个节点中实时地更新用户与子网的对应关系将产生大量的路由开销。因此采用按需查找的方式，在有数据要发送时，骨干节点查找目的用户所在的子网信息。

用户之间的数据传输过程分为以下几步。

- 1) 源用户将数据发送给源骨干。
- 2) 源骨干查找目的用户对应的目的骨干。
- 3) 源骨干与目的骨干之间按路由表转发数据。
- 4) 目的骨干将数据发送给目的用户。

4.2 网络初始化

在网络初始化阶段，同步卫星根据所有骨干节点的位置，计算节点之间的路径延时，得出如图 6 所示的骨干节点抽象拓扑。

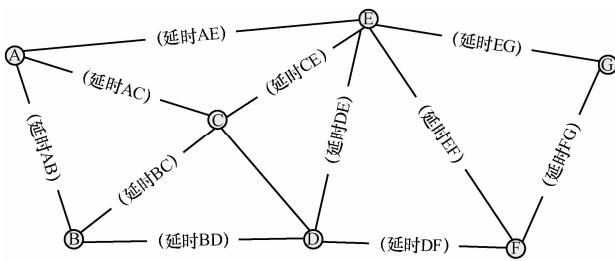


图 6 骨干节点抽象拓扑

根据前文所述高空平台网络的特点，由于骨干节点距离远，传播延时不能忽略，因此将延时作为主要的代价来计算骨干节点路由表，选择延时最小的路径。

设 s 为源节点， t 为目的节点， $p(s,t)$ 为从源节点到目的节点的一条路径， C_{ij} 表示传输路径上由节点 i 与节点 j 构成的链路的延时代价。则采用路径 $p(s,t)$ 进行数据传输的延时代价 $C(p(s,t))$ 为路径上每一条链路的延时代价之和，如式(1)所示。

$$C(p(s,t)) = \sum_{ij \in p(s,t)} C_{ij} \quad (1)$$

利用经典的 Dijkstra 算法，以最小化延时代价为目标，计算出骨干节点之间的路由表，并将此路由表发送到所有骨干节点。当网络中有骨干节点损坏或者骨干节点之间的链路失效时，同步卫星重新进行路由表的计算和广播。

4.3 路由建立与数据转发

各骨干节点中保存自身已知的骨干节点和用户的对应关系，如图 7 所示。

用户ID	骨干节点	有效时间
M	A	30s
N	B	30s
...

图 7 用户与骨干节点对应关系

当有数据要发送到用户时，源骨干查找自身的骨干节点和用户对应关系表，如果其中包含有效的对应关系，源骨干从表中找到目的骨干进行路由的查找。如果该表中没有有效的对应关系，源骨干启动目的用户所在子网查询过程，查找到目的用户对应的子网后，进行数据转发。其中的有效时间是用户穿越一个骨干节点子网的平均时间，在有效时间之内的用户与骨干节点对应关系并不能保证完全正确，但由于采用前文设计的用户切换策略，即使用户与骨干节点的关系已经过时，骨干节点仍然可以将数据发送到用户。

目的用户子网查询过程如图 8 所示。当源用户 M 要向目的用户 N 发送数据时，M 首先将数据发送给 M 所在的源骨干节点 A，A 查找目的用户 N 所在的子网。A 首先发送如图 9 所示的子网查询信息 (REQ, request)，每一个收到 REQ 的骨干节点通过检查其中的源和目的信息以及序列号来判断是否接收过此 REQ，如果接收过则不做处理，否则判断目的用户是否在自身的子网内，如果不在则继续广播 REQ。当骨干节点 B 收到 REQ 时，发现目的用户在自己的子网之内，于是向源骨干 A 回复如图 10 所示的应答消息。在回复 REP 消息时，B 通过查找 B 到 A 的路由，按照路由表中最佳路径进行发送，而不是广播的形式。A 收到 REP 后，了解目的骨干为 B，查找 A 到 B 的路由，发送数据信息。

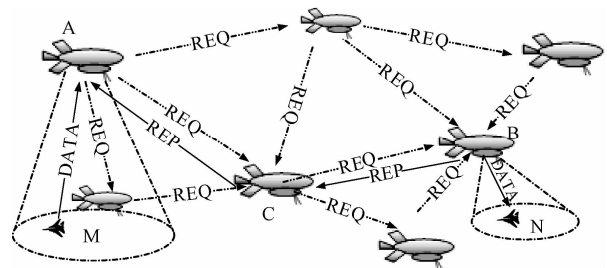


图 8 目的用户子网查询过程

消息类型	目的用户	源骨干	源用户	序列号	有效时间
REQ	N	A	M	1	30s

图 9 REQ 信息

消息类型	目的用户	源骨干	目的骨干	序列号	有效时间
REP	N	A	B	1	30s

图 10 REP 信息

REQ 和 REP 传输所经过的骨干节点，会将其中的源骨干和源用户以及目的骨干和目的用户信息记录在自身保存的用户与骨干关系表中，这样在这些中继节点有数据要发送到源用户或者目的用户时，可以直接发送，减少了查询的时间，方便数据传输。

骨干节点在路由建立与数据转发过程中的操作流程如图 11 所示。

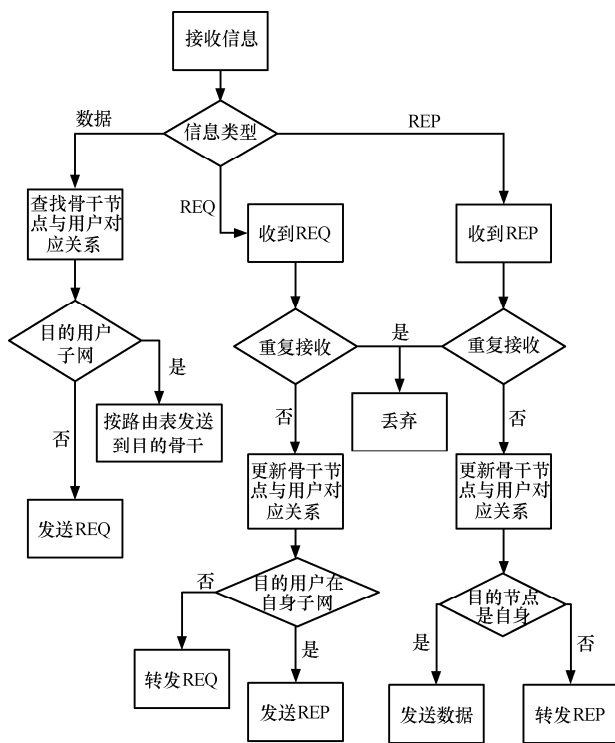


图 11 骨干节点操作流程

4.4 路由维护

相对于地面网络，抗毁性强是高空平台网络的优势之一，因此要求当部分网络节点或链路损坏时，网络仍然可以为用户服务。

在 HAPNR 协议中，当用户与所在子网的高空平台失去联系时，用户直接通过卫星转发数据。当某 2 个高空平台之间的链路断开时，发现链路断开的节点向同步卫星发送 ERROR 消息，同步卫星收到消息后，重新计算路由表，并发送给高空平台。收到新的路由表之前，损坏链路的上游骨干节点直接将数据通过卫星转发到目的骨干，避免数据传输

中断。

当卫星损坏时，高空平台节点可以按照原有的路由表继续正常工作。若此时高空平台网络中节点之间的连接也发生变化（部分链路断开），则高空平台之间采用无线自组网中按需路由的方式寻找路径。在寻找路径成功后，高空平台将路由信息保存至自身的路由表，以后的数据仍按更新后的路由表传输。

5 仿真分析

5.1 仿真环境

本文在 NS-2.29 平台下对 HAPNR 协议的性能进行仿真分析。仿真所采用的高空平台网络结构中包括 1 颗同步卫星和 10 个均匀分布的高空平台，高空平台的分布如图 12 所示。每个高空平台的覆盖半径为 300km，相邻高空平台之间覆盖半径重叠部分为 100km，如图 2 所示，假设高空平台之间采用 CSMA 方式共享无线信道。网络中的高动态用户移动速度为 1.5km/s，在高空平台覆盖范围之间随机移动。

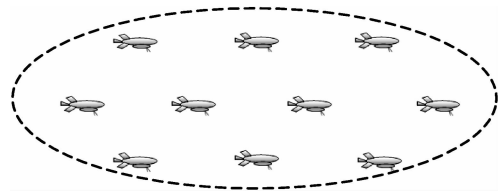


图 12 高空平台分布俯视图

由于目前还没有适用于高动态高空平台网络的路由协议，本文将 HAPNR 与同样应用在用户位置动态变化的无线多跳网络中的按需路由 (AODV) 和表驱动路由 (DSDV) 进行性能的比较。本文设置了多种仿真场景，如表 1 所示。

表 1 仿真场景

场景	用户数	连接数	每秒发分组数
1	2	1	10
2	2	1	20
3	2	1	30
4	2	1	40
5	2	1	50
6	10	5	10
7	10	5	20

由于当网络中的用户较多、业务负载较大时，各高空平台之间会竞争无线信道，网络性能受信

共享方式影响较大，不能准确反映路由协议的性能，因此本文场景中主要考虑单一业务场景，多业务场景用于辅助分析。

5.2 仿真结果及分析

在表 1 所示的各种场景下分别对数据分组投递率、数据端到端延时、路由开销等性能进行仿真。

1) 数据分组投递率

如图 13 所示，HAPNR 的数据分组投递率明显高于另外 2 种协议。这是由于在用户高速移动过程中，在不同的高空平台子网间进行切换，AODV 在发现数据传输错误后才重新查找路径，DSDV 在下次周期性更新路由表后才使用新的路径，都造成了数据的丢失。而 HAPNR 能保证频繁切换过程中数据传输的连续性，保证了高动态用户数据传输的可靠性。

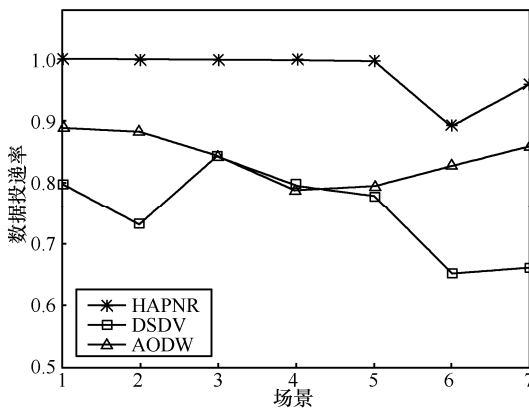


图 13 数据分组投递率

图 14 是场景 5 下吞吐量随时间变化情况，可清晰地反映 HAPNR 协议在数据传输连续性方面的优势。

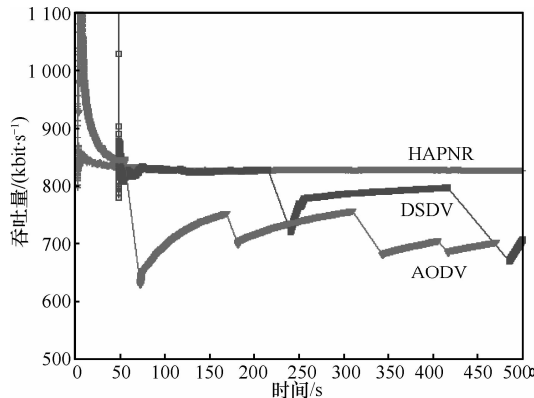


图 14 吞吐量随时间变化情况

2) 数据端到端延时

数据端到端延时是数据从产生一直到被正确

接收所经过的时间。如图 15 所示，由于 HAPNR 协议在查找到的用户所在的目的骨干后，REP 消息和数据都通过最短路径传输，并且 REQ 和 REP 消息只在高空平台之间传输，避免了控制消息在用户和高空平台之间传输产生的延时，所以建立路由的延时较短。并且由于可靠性高，浪费在重传过程中的时间大大减少，所以其延时一直处于较低水平。

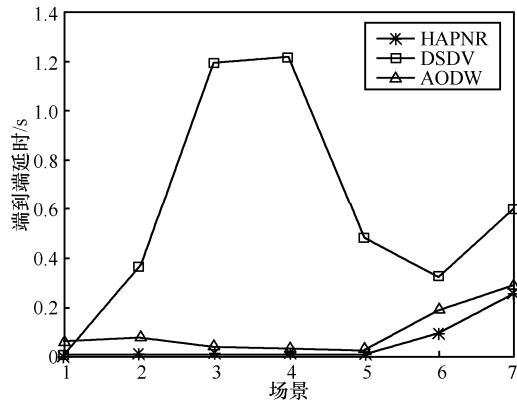


图 15 数据端到端延时

3) 路由开销

路由开销表示为网络中路由控制信息与成功传输的数据信息的数据量的比值。由于 HAPNR 协议可靠性高，成功传输的数据量大，并且 HAPNR 协议不需要通过频繁地交换控制信息来更新路由表，路由控制信息较少。因此网络的路由开销很小，如图 16 所示，既减轻了网络节点的处理负担，又减少了对带宽资源的浪费。

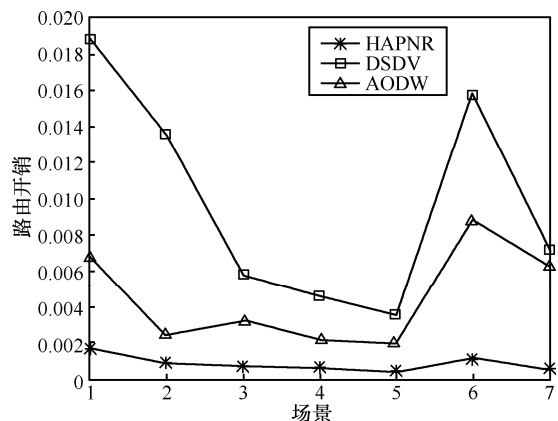


图 16 路由开销

4) 路由维护性能

为体现 HAPNR 协议的抗毁性，在网络中设置 2 个固定用户进行 CBR 和 FTP 业务传输，在 60s 时传输路径中的一个高空平台节点损坏。吞吐量如

图 17 所示, HAPNR 协议的路由维护机制保持了用户数据传输的连续性, 没有因为部分节点损坏造成传输中断。

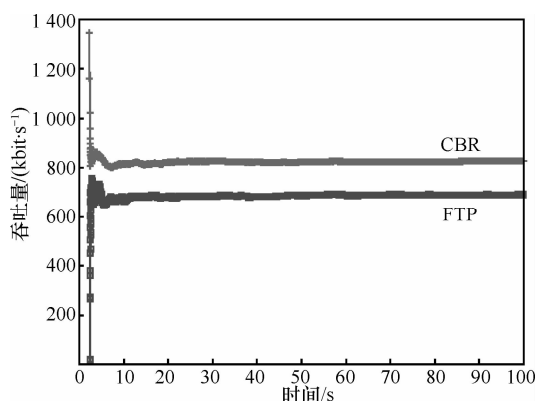


图 17 节点损坏时的吞吐量

6 结束语

本文对面向高动态高空平台网络的路由协议进行了研究。针对这种新型网络的特点提出了一种适用于高动态用户的切换策略, 并结合切换策略提出了 HAPNR 路由协议。本文在 NS-2.29 仿真平台中对 HAPNR 协议和无线多跳网络中典型的路由协议进行了仿真分析。仿真结果表明现有的典型无线路由协议在这种用户高速移动、频繁切换的网络环境下性能较差, 不能直接应用在未来的高动态高空平台网络中, 而本文提出的 HAPNR 路由协议具有可靠性高、延时小、路由开销小、抗毁性强等特点, 并且路由协议过程简单, 便于实现, 可以作为高动态高空平台网络路由问题的一种解决方法, 为该领域的进一步研究提供了参考。

参考文献:

- [1] PARK J M, KU B J, OH D S. Technical and regulatory studies on HAPS[A]. IEEE GLOBECOM Workshops[C]. New Orleans, USA, 2008. 1-5.
- [2] ELABDIN Z, ELSHAIKH O, ISLAM R. High altitude platform for wireless communications and other services[A]. International Conference on Electrical and Computer Engineering, (ICECE'06)[C]. Dhaka, Bangla, 2006. 432-438.
- [3] WU G, MIURA R, HASE Y. A broadband wireless access system using stratospheric platforms[A]. IEEE Global Telecommunications

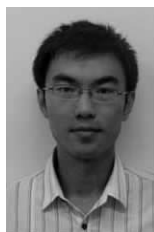
Conference, 2000 (GLOBECOM'00)[C]. San Francisco, USA, 2000. 225-230.

- [4] KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F N. The role of high altitude platforms in beyond 3G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2005,12(6): 33-41.
- [5] AVDIKOS G, PAPADAKIS G, DIMITRIOU N. Overview of the application of high altitude platform (HAP) systems in future telecommunication networks[A]. The 10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications, 2008 (SPSC 2008)[C]. Rhodes Island, Greece, 2008. 1-6.
- [6] PACE P, ALOI G. Multilayered architecture supporting efficient inter HAP-Satellite routing[A]. Vehicular Technology Conference[C]. Dublin, Ireland, 2007. 1360-1364.
- [7] RANGO F, TROPEA M, SANTAMARIA A F. Multicast QoS core-based tree routing protocol and genetic algorithm over an HAP-Satellite architecture[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4447-4461.
- [8] ALOCCI I, BERIOLI M, CELANDRONI N. Proposal of a reliable multicast protocol in a HAP-satellite architecture[A]. Vehicular Technology Conference, 2007[C]. Dublin, Ireland, 2007. 1380-1384.

作者简介:



吴伟强 (1982-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为无线通信网络、卫星通信网络。



郑石 (1981-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为无线自组网络、移动通信。



张钦宇 (1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、无线通信技术、专用移动通信系统等。