

## 基于路径分段的 MANET 自适应多径路由协议

吴大鹏 甄岩 武穆清

(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 100876)

**摘要:** 采用多径路由机制能够有效保证 Ad hoc 网络数据包传输成功概率, 提高网络可靠性。该文在路径数量分析的基础上, 根据分组丢弃概率门限判决方法, 提出了基于路径分段的自适应多径路由协议。节点采用预先设定的门限值判定链路状态, 并且根据网络当前的拓扑状态自适应地选择中继节点, 建立路径分段的多径路由。仿真结果表明, 该机制在合理利用网络资源的同时能够有效保障数据包的可靠传输, 更加适用于状态时变的 Ad hoc 网络。

**关键词:** 无线自组织网络; 分组丢弃概率; 多径路由; 可靠性

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0698-04

## Adaptive Multi-Path Routing in Mobile Ad hoc Network Based on Path Segment

Wu Da-peng Zhen Yan Wu Mu-qing

(Broadband Communication Network Lab, Beijing Univ. of Posts and Telecom, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The probability of packet delivered in Ad hoc network can be guaranteed by the multi-path scheme, with the analysis on the path numbers, the decision method based on packet drop rate is introduced; furthermore, the segment adaptive multi-path routing protocol is proposed. The mobile node estimates its status with the threshold pre-defined by monitoring the packet drop rate on the link, so the segmented multi-path can be established under current network topology, then the relay nodes can be selected adaptively. Simulations results show that the protocol can provide the reliable transmission for data packet while utilizing the network resource effectively.

**Key words:** Ad hoc network; Packet drop rate; Multi path; Reliability

### 1 引言

Ad hoc<sup>[1]</sup>起源于美国的军用技术, 当时所提出的主要目的就是在没有基站的支持下, 拥有这种移动终端的用户能够组建他们自己的临时网络。Ad hoc 网络是一种全分布式的移动网络, 通信节点可以随意移动, 并且能量、计算能力以及存储资源有限, 网络拓扑结构、无线带宽资源均为时变, 这些特性使得 Ad hoc 网络难于为实时多媒体业务提供可靠性保障。

国内外诸多研究人员已经提出多种机制来保证多媒体业务可靠传输, 其中多径路由机制得到了广泛关注。文献[2,3]提出了逐跳多路转发机制, 每个中间节点根据本地路由表采用多条路径同时转发数据包, 为其提供可靠性保证, 这种机制在每跳节点都采用多个路径转发数据包, 导致所使用的链路数量随着跳数增加而呈指数上升, 严重降低了网络资源利用率; 文献[4-6]中提出了另外一种多径路由机制, 节点在发起会话之前为目的节点计算两条链路分离的路径, 以同时传输数据包, 但是由于节点频繁移动, 网络拓扑实时随机变化, 对于某些情况下, 使用该机制将不能建立多条链路分离的路

径, 增加了数据包在源节点的等待时间; 另外, 文献[7]中提出了路径分段机制, 源节点以跳数为参数, 将整个路由分割为多个比较短的本地段, 每个本地段负责对源节点或者上游段的数据包进行缓存、发送本地应答以及转发。这种机制有效地解决了节点移动所带来的系统吞吐量下降问题, 但是其简单地按照跳数分段的原则并不能够适应网络当前的链路状态。

本文提出了基于路径分段的自适应部分多路由的机制, 节点首先根据分组丢弃概率情况对链路状态进行判定, 然后根据网络当前的拓扑自适应地建立多径路由; 同时根据所选择的路径情况确定中继节点(Relay Node, RN), 将跳数比较大的路径分割为多个比较短的路径。这样, 业务可靠性要求得到满足的同时, 路由协议具备了根据网络情况自适应调整的功能, 更加适用于 Ad hoc 网络。

### 2 基于分组丢弃概率的门限判决机制

若源节点和目的节点之间存在多条路径, 端到端可靠度可以表示为  $R_M = 1 - (1 - R_p)^N$ , 其中  $R_p$  为每条路径的可靠度。

端到端可靠度大于业务所需可靠度的时候, 网络能够为该业务提供可靠性保障。为了简化路径数量分析过程, 假设源节点和目的节点之间的路径可靠度相同, 则可得路径数量

与业务可靠度之间的关系： $R_{\text{Req}} \leq R_M$ ，即

$$1 - R_{\text{Req}} \geq (1 - R_p)^N \quad (1)$$

可得： $\log(1 - R_{\text{Req}}) \geq N \times \log(1 - R_p)$ ，因此，所需要的路径数量为

$$N \geq \frac{\log(1 - R_{\text{Req}})}{\log(1 - R_p)} \quad (2)$$

$N$  为整数，故选取  $N = \left\lceil \frac{\log(1 - R_{\text{Req}})}{\log(1 - R_p)} \right\rceil$ 。

从图 1 可知，当路径可靠度大于 0.7 的时候，采用两条路径传输数据包则能够满足大部分业务所需要的可靠度，故选取两条路径的情况对网络的性能进行分析。

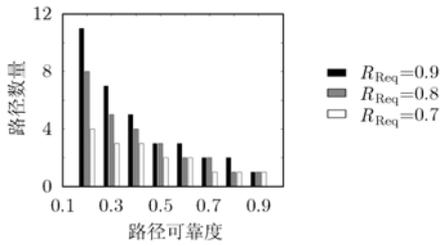


图 1 可靠度与链路数量关系图

网络中存在多种可靠度级别的链路，若节点采用可靠度较低的链路传输数据包，网络中将会出现大量的数据包丢弃情况，导致源节点不断启动重传过程，增加端到端传输延迟。为了解决这个问题，节点可以通过实时监测链路上分组丢弃概率情况以估计链路可靠度，进而判定是否采用该链路转发数据包，由于判定门限值的选取将会影响网络的连通情况，因此，门限值的选取需要综合考虑网络可靠度和网络连通情况。

网络的可靠度  $R$  可以按照下面的方式定义：

$$R = \frac{L_0 R_0 + L_1 R_1 + \dots + L_{n-1} R_{n-1}}{N} \quad (3)$$

其中  $R_i$  为链路可靠度， $L_i$  为可靠度等于  $R_i$  的链路数量， $N = \sum_{i=0}^{n-1} L_i$  为网络中总链路数量，为了简化分析，假设各种可靠度级别的链路数量相同，即  $L_0 = L_1 = L_2 = \dots = L_{n-1}$ ，可得

$$R = L \times \sum_{i=0}^{n-1} \frac{R_i}{N} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{R_i}{n} \quad (4)$$

通常分组丢弃概率  $D$  能够反映链路的不可靠度  $F_i$ ，即其关系满足  $F_i = D$ ，从而可以得到对于给定判决门限为  $D_T$  ( $0 \leq D_T \leq 1$ ) 时的网络可靠度  $R(D_T)$  为

$$R(D_T) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - D_i)}{\#D} \quad (5)$$

其中  $D = \{D_i | D_i \leq D_T\}$ ， $\#D$  表示集合  $D$  中元素的个数； $D_i \in [0,1]$  表示分组丢弃概率，满足下面的关系式：

$$D_i = \begin{cases} D_i, & D_i \leq D_T \\ 1, & D_i > D_T \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (6)$$

如前所述，门限值直接影响网络中节点之间的连接情况，因此，特定门限值下的网络连通状况可以下面的公式表示：

$$W(D_T) = p_{\text{res}} \times R(D_T) \quad (7)$$

其中  $p_{\text{res}}$ 、 $R(D_T)$  分别表示剩余链路比例和链路平均可靠度。

根据上面的假设条件可知  $p_{\text{res}} = D_T$ ，从而可以得到下面的计算公式：

$$W(D_T) = D_T \times \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - D_i)}{\#D} \quad (8)$$

当判决门限为  $D_T$  的时候，网络的综合可靠度函数为

$$R_N = W(D_T) \times R(D_T) \quad (9)$$

$$R_N = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - D_i)}{\#D} \times D_T \times \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - D_i)}{\#D} = D_T \times \left( \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - D_i)}{\#D} \right)^2 \quad (10)$$

当  $R_N$  取最大值的时候，可以得到网络分组丢弃概率判决门限的最优值，若在区间  $[0,1]$  上以 0.1 为间隔均匀选取采样点，根据上式可知，当  $D_T = 0.5$  时，网络的综合可靠度最大。

### 3 多径路由建立过程

本文在路由发现阶段采用了链路状态判定以及路径选择两种技术以能够根据当前网络拓扑结构和链路状态自适应地建立端到端路径，节点首先根据预先设定的分组丢弃门限值  $D_T$  判定链路状态；然后，源节点采用时间窗口机制来缓存所返回的路由应答信息，在定时器结束之后，节点根据所收集的信息完成路径建立。

在路径建立的过程中，节点设定相应的标志位以区分网络中多条路径上的路由应答信息，分别为主应答信息以及次应答信息。中间节点通过标志位确定当前节点周围的网络拓扑情况以及所需要采取的处理方式。

典型部分多径路由建立过程如图 2 所示，目的节点  $D$  将在反向路径上分别发送主应答信息和次应答信息。如果中间节点存在两条到达源节点的反向路径，则节点为主路由应答信息选择最优链路，并且进行标记，进而为次路由应答信息选择次优链路。源节点采用时间窗口机制以限制两个路由应答信息之间的时间间隔，若源节点没有成功接收到次路由应答信息，则采用单条路径发送数据包；当有两条正向路径的时候，节点将采用并行的方式在两个路径上同时传输数据包。本文采用 MAC 层多播的机制来实现数据包的并行转发，节点依据实时监测结果自适应地选择分组丢弃概率较低的链路发送应答信息，即选定主接收节点，该节点负责对接收到的控制帧以及数据帧进行应答；而次接收节点不需要应

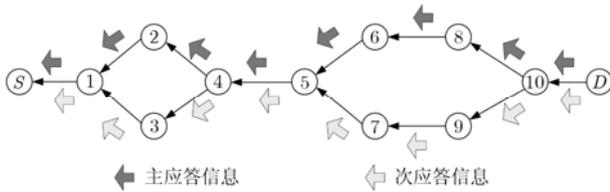


图2 路径建立

答。这种方式有效降低信道上传输的数据量，同时也解决了隐藏节点问题。由于每条路径上节点的地理位置之间存在较强的相关性，因此，若主接收节点能够可靠地接收数据包，则次接收节点成功接收数据包的概率也比较高。

#### 4 端到端路径分段

当数据包在传输过程中出现丢弃的时候，源节点需要等待足够的时间才能够开始重传丢弃的数据包，而这段等待时间与源节点和目的节点之间的距离相关。端到端路由由多个链路组成，无论数据包在任何链路上出现丢弃，重传过程开始之前都需要耗费大量时间用于确认数据包丢失。

为了能够减少等待时间，将网络中的某些节点设定为中继节点，负责保存所发送的数据包并且对接收的数据包进行应答，从而将端到端路径分解为多个较短路径，缩短了确认数据包丢失的等待时间，降低了分组的端到端延迟。

本文选取多径路由的起始节点和终止节点作为中继节点，负责对数据包进行缓存、本地应答以及转发。若当前所选择的路径为两条节点和链路都分离的路径，则不需要设置中继节点；否则，根据所建立的多径路由情况，网络中将存在多个中继节点，具体原理如图3所示。

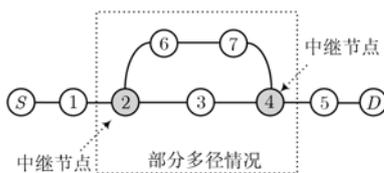


图3 路径分段

其中在节点2到节点4之间存在两条路径。如上所述，选择节点2以及终止节点4作为中继节点，从而将整个路由划分为3个段，分别是 $S \rightarrow 2$ ， $2 \rightarrow 4$ 以及 $4 \rightarrow D$ 。这种方式有效的保证数据包的可靠传输，同时避免单个节点计算、处理过于复杂的情况。

#### 5 仿真结果分析

本文使用OPNET平台对所提出的基于路径分段的部分多径路由协议(Segment Partial Multi-Path, SPM)中的分组丢弃概率、网络吞吐量、数据包平均延迟以及路由建立开销等参数的性能进行计算机仿真<sup>[8,9]</sup>，具体的网络环境如表1中所描述。

表1 仿真参数表

范围	4000m×4000m
节点数量	28
节点覆盖范围	800m
信道容量	1Mbps
移动速率	0-20m/s
移动模型	Random Waypoint
路由协议	AODV
仿真时间	400s
数据包大小	1024byte
数据包间隔时间	1s

在不同的节点移动速度情况下，网络中的分组丢弃概率如图4所示。

采用路径分段的多径路由协议能够降低端到端路径断裂概率，减少分组丢弃数量<sup>[10]</sup>，而当网络节点快速移动从而导致网络拓扑结构变化频繁的时候，如节点移动速率为20m/s左右，采用SPM-AODV协议以及AODV协议所建立的端到端路径可靠度都不能够满足数据包传输，导致大量数据包丢弃。

节点移动速度对网络吞吐量的影响如图5所示，相比于AODV协议，采用SPM-AODV协议能够提高网络吞吐量，当移动速度为15m/s的时候，吞吐量提高程度最大。虽然SPM-AODV协议采用两条路径同时发送数据包，在一定程度上降低了无线信道的利用率，导致吞吐量下降，但是由于两条路径上节点之间的地理位置相关性较强，所以通常吞吐量下降并不明显；另外，分组丢弃概率的改善补偿了所下降的吞吐量，当两个协议的分组丢弃概率差别较大的时候(如：移动速率15m/s)，这种补偿作用将会使得网络吞吐量明显上升。

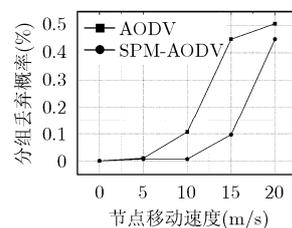


图4 分组丢弃概率

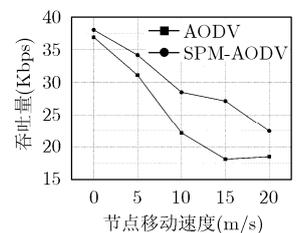


图5 吞吐量

数据包平均延迟与节点移动速度的关系如图6所示。

节点平均移动速率小于10m/s的时候，采用两种协议所获得的分组延迟性能基本相同，当速度逐渐增加的时候，采用SPM-AODV协议进行传输的分组延迟则低于采用AODV协议的情况。出现这种情况的主要原因是随着节点移动速率的增加，端到端路径出现断裂的概率也逐渐上升，从而路由

重建次数也明显升高，而分段部分多径路由协议将整个路径分解为多个子路径，缩短了丢弃分组的重传距离，同时由于子路径长度比较短，成功建立路径的概率也随之上升，从而明显的降低端到端延迟。

网络中节点的移动速度对路由建立开销的影响如图 7 所示。

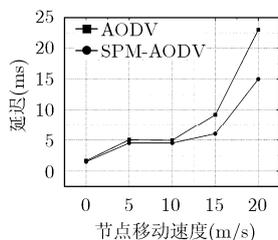


图 6 数据包平均延迟

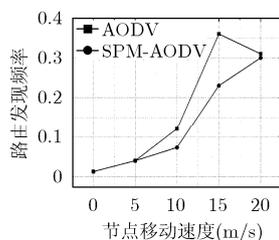


图 7 路由建立开销

对于 AODV 协议来说，当路径出现断裂的时候，源节点需要重新触发路由发现过程以寻找新的路径继续传输数据包；而在路径分段的部分多径路由中，若其中的某条路径出现断裂，则可以采用另外的路径继续发送数据包，这种方式能够有效地降低路由发现的频率，减少了路由请求数据包发送次数，有效地维持源节点到目的节点路径的稳定性，从而提高端到端路径的可靠性。

## 6 结束语

本文在对 Ad hoc 网络端到端路径的可靠性进行分析的基础上，提出了一种能够根据网络拓扑情况自适应调整的基于路径分段的部分多径路由协议，仿真结果表明，这种机制能够有效改善 Ad hoc 网络的数据包丢弃概率、端到端延迟、吞吐量以及路由建立开销等方面性能，同时，该机制能够根据网络当前状况自动调整，适用于状态时变的 Ad hoc 网络。

## 参考文献

- [1] Xu B and Walk B. Design issues of self-organizing broadband wireless networks [J]. *Computer Networks*, 2001, 37(1):73-81.
- [2] Felemban Emad and Lee Chang-Gun. MMSPEED: Multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J].

*IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006, 5(6): 738-754.

- [3] Zhu X and Girod B. A distributed algorithm for congestion-minimized multi-path routing over Ad-hoc networks [C]. *Multimedia and Expo, ICME 2005*, Amsterdam, Netherlands, 2005: 1484-1487.
- [4] Li Yuan, Chen XinMeng, and Yu Dan. Disjoint multi-path QoS routing in Ad hoc networks [C]. *2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 23-26 Sept. 2005, Vol.2: 739-742.
- [5] Yang Cheng-Ying, Ting Yi-Wei, and Yang Chou-Chen. A loop-free multi-path routing with QoS for wireless Ad hoc network [C]. *AINA 2006, 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Vienna, Austria, 18-20 April 2006, Vol.2: 179-185.
- [6] Wei Wei and Zakhor A. Path selection for multi-path streaming in wireless Ad hoc networks [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, Atlanta, USA, Oct. 2006: 3045-3048.
- [7] Kopparty S, Krishnamurthy SV, Faloutsos M, and Tripathi SK. Split TCP for mobile Ad hoc networks [C]. *Proc. IEEE GLOBECOM*, Taipei, Taiwan, Nov. 2002, Vol.1: 138-142.
- [8] The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile Ad hoc networks for IPv4 [S]. RFC 4728, Feb, 2007.
- [9] Mobile Ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations [S], RFC 2501, Jan, 1999.
- [10] Leung R, Liu J, Poon E, Chan AL C, and Li B. MPDSR: A QoS-aware multi-path dynamic source routing protocol for wireless Ad-hoc networks [C]. *Proceedings of the Conference on IEEE Local Computer Networks, LCN 2001*, Florida, American, 2001: 132-141.

吴大鹏：男，1979年生，博士生，研究方向为无线多跳网络、互联网服务质量控制。

甄岩：男，1982年生，博士生，研究方向为无线多跳网络、网络可靠性。

武穆清：男，1964年生，教授，博士生导师，从事宽带通信网络接入理论与技术、通信网络流量工程与服务质量以及无线网络的研究。