

# Ad Hoc 多路径 DSR 路由协议的性能分析

刀学龙<sup>1,2</sup>, 龙 华<sup>2</sup>, 李汝恒<sup>3</sup>

(1. 玉溪师范学院 现代信息技术中心, 云南 玉溪 653100 2 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051;

3 大理学院 物理电子信息系, 云南 大理 671000)

**摘要:** 对 Ad Hoc 的 2 种多路径 DSR 路由协议模型进行了数学分析和 Matlab 仿真, 得出路由寻找周期与主路由跳数、备份路由数量之间的关系, 并对比了多路径路由与单路径路由以及两种协议模型的性能。

**关键词:** Ad Hoc 多路径; 路由协议

**中图分类号:** TP302.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2007)06-0029-05

## Performance Analysis of DSR Multi-Path Routing Protocol in Ad Hoc Network

DAO Xue-bing<sup>1,2</sup>, LONG Hua<sup>2</sup>, LI Ru-heng<sup>3</sup>

(1. Center of Modern Information Technology, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan 653100, China

2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China

3. Faculty of Physics and Electron, Dali University, Dali, Yunnan 671000, China)

**Abstract** Based on DSR (Dynamic Source Routing) and multi-path routing protocol of the two models of Ad Hoc, the relationship between a routing search cycle and the main routing hops and its relation to the number of backup routing are made clear through the mathematical analysis and Matlab simulation. Performances of single multi-path routing and the two models are compared thereafter.

**Key words** Ad Hoc multi-path routing protocol

### 0 引言

路由协议是 Ad Hoc 的关键和核心问题之一。现在最流行的移动 Ad Hoc 网络路由方法是按需路由法, 而研究的按需路由协议大多数是基于单条路径, 即根据一定的评判指标 (时延、跳数等), 选择一条最优的路径, 通信双方的所有流量都经过这条路径。由于移动 Ad Hoc 网络中所有的移动节点都能作为路由器转发分组, 从源节点到目点节点的路径就可能有多条, 单路径不能充分利用网络资源, 易于产生拥塞使得端对端时延增加以及丢包率增大等问题, 另外也会使得某些移动节点承担太重的转发任务, 能源耗尽, 网络断开。

为了均衡负载、提高传输的可靠性和总带宽, 节约带宽和能量资源, 多路径是一种很好的选择。目前已开展的多路径研究主要集中于按需路由协议, 如 DSR (dynamic source routing)<sup>[1]</sup>和 AODV (Ad hoc on demand distance vector routing)<sup>[2]</sup>; 在 DSR 协议中首先提出了多路径策略<sup>[1]</sup>, 之后又进一步提出了一种扩展 DSR 的机制<sup>[3]</sup>; 基于 AODV, 则提出了 AODV-BR (AODV backup routing)<sup>[4]</sup>和 AOMDV (Ad hoc on demand multipath distance vector routing)<sup>[5]</sup>多路径策略; 而 MSR (multipath source routing)<sup>[6]</sup>和 APR (alternate path routing)<sup>[7]</sup>等协议则主要在这些路由协议的负载平衡及端对端延迟等方面的性能进行了研究、探讨。

论文对 Ad Hoc 的 2 种多路径 DSR 路由协议模型进行了数学分析和 Matlab 仿真, 得出了路由寻找周

收稿日期: 2007-06-18

第一作者简介: 刀学龙 (1978-), 男, 在读硕士研究生, 讲师。主要研究方向: 无线通信网络。

E-mail: sharpknife@yxtc.net

期与主路由跳数、备份路由数量之间的关系,并对比了多路径路由与单路径路由以及 2 种协议模型的性能。

### 1 数学模型

用 1 个随机变量表示 1 对通信节点之间的 1 条链路的寿命,考虑 1 条从源节点  $S$  到目的节点  $D$  的路由跨越  $k-1$  个中间节点的  $k$  条链组成. 设该条路由中的第  $i$  条链表示为  $L_i$ ,  $L_i$  的寿命表示为  $X_{L_i}$ . 假定  $X_{L_i}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, k-1$ ) 是相互独立的全分布随机变量,其均值等于 1 为了方便表达用大写字母表示随机变量,相应的小写字母表示该随机变量的取值。

一条路由  $P$  由  $k$  条无线链组成,当其中任何一条无线链中断的时候,路由  $P$  则中断,因此,路由  $P$  的寿命  $X_p$  是一个随机变量,可以表示为:

$$X_p = \min\{X_{L_1}, X_{L_2}, X_{L_3}, \dots, X_{L_k}\} \quad (1)$$

假定随机变量  $X_p$  是一个指数分布的随机变量,则其均值等于  $\frac{l}{k}$  ( $l$  为链路平均寿命,  $k$  为链路数). 可以使用上述有关链路中断特性的基本假设,继续推导多路径 DSR 路由协议中连续两次路由寻找之间的间隔时间即路由寻找周期的统计特性。

#### 1.1 协议模型 1

设源节点  $S$  有  $N$  条到达目的节点  $D$  的路由并且只考虑源节点使用备份路由,主路由表示为  $P_1$ ,  $N-1$  条备用路由表示为  $P_2, P_3, \dots, P_N$ , 第  $i$  条路由  $P_i$  的长度表示为  $k_i$ , 如图 1 所示:

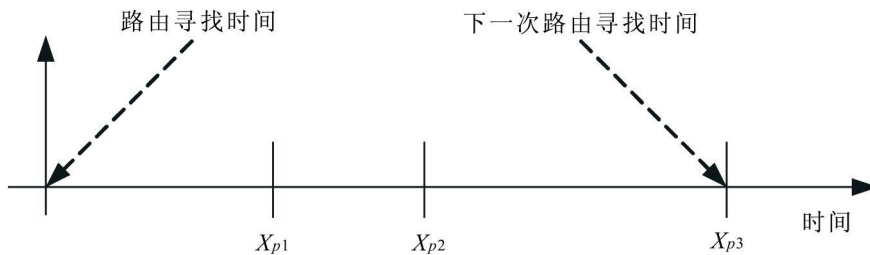


图1 多路径路由链路寿命  
Fig.1 Life of multi-path routing link

源节点  $S$  有 3 条到达目的节点的独立路由 ( $N = 3$ )  $P_1, P_2, P_3$ ; 图中表示 3 条路由的寿命; 主路由  $P_1$  在  $X_{p1}$  时刻中断, 则源节点继续使用路由  $P_2$ , 过了一段时间后  $P_2$  在  $X_{p2}$  已经中断, 源节点  $S$  使用  $P_3$ , 如果  $P_3$  在  $X_{p3}$  时刻中断, 此时初始化一个新的路由寻找进程. 无路由可用后的时间  $T$  作为一个随机变量可表示为:

$$T = \max\{X_{p1}, X_{p2}, X_{p3}, \dots, X_{pN}\} \quad (2)$$

时间  $T$  表示 2 次路由寻找之间的间隔时间. 这里假定网络中端到端的分组传输时延相对于路由变化的间隔时间非常小, 因此, 相对于时间  $T$  而言, 寻找路由或者传输错误分组的时间可以忽略不计。

引理 1 连续两次路由寻找之间的间隔时间  $T$  的概率密度函数<sup>[8](P.388)</sup> (PDF) 为:

$$f_T(t) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_N t}) + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} (1 - e^{-\lambda_1 t}) (1 - e^{-\lambda_N t}) + \dots + \lambda_N e^{-\lambda_N t} (1 - e^{-\lambda_1 t}) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_{N-1} t}) \quad (3)$$

其中,  $\lambda_i = \frac{K_i}{l}$  表示为第  $i$  条路由的寿命。

假如知道每条路由的跳数  $k_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , 因为已经得出即为  $T$  的概率密度函数  $f_T(t)$ , 所以我们可以得出  $T$  的数学期望  $E[T]$ . 如  $N = 2$   $T$  的期望值  $E[T]$  为

$$E[T] = \frac{\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2}{\lambda_1 \lambda_1 (\lambda_1 + \lambda_2)}, \text{ 如果主路由跳数为 } k_1 \text{ 为 3 跳, 备用路由为 } k_2 \text{ 为 4 跳, 那么}$$

$$E[T] = \frac{9 + 16 + 12}{12 \times 7} = \frac{37}{84} \quad (4)$$

对于只有 1 条路由(跳数为 3)的 DSR 协议, 由前所述, 其数学期望:

$$E[T] = \frac{1}{3} \tag{5}$$

比较 (4) 和 (5) 式, 在多路径 DSR 协议中, 路由寻找频次比单路径 DSR 协议的路由寻找频次降低了 25%.

### 1.2 协议模型 2

假定主路由的每个中间节点均使用 1 条备份路由, 这种情况下的分析稍有不同, 这是因为只有当其中某些中间节点同时丢失其下行链路和备用链路的时候才会初始化 1 个新的路由寻找进程. 设  $\bar{L}_i$  表示  $L_i$  链中断事件,  $\bar{P}_i$  表示路由  $P_i$  中断事件, 如图 2 所示:

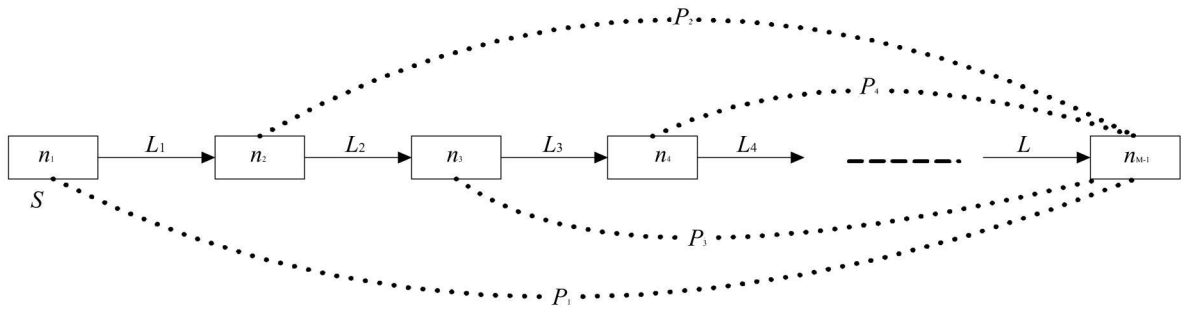


图2 多路径协议模型2

Fig.2 Modeling protocol 2 of multi-path routing

那么, 到下一次路由寻找的时间  $T$  就是事件  $E$  变真之前的时间, 事件  $E$  用逻辑表达式<sup>[9]</sup> 描述:  $E = (\bar{L}_1\bar{P}_1) + (\bar{L}_2(\bar{L}_1 + \bar{P}_2)\bar{P}_1) + (\bar{L}_3(\bar{L}_1 + (\bar{L}_2 + \bar{P}_3)\bar{P}_2)\bar{P}_1) + \dots$  (6)

等式右边第  $i$  项括号内的内容表示从链  $L_i$  中断开始到导致初始化 1 个新的路由寻找进程之间的事件. 如第 2 项表示下列一系列事件: ①主路由上链  $L_2$  中断, 因此提示源节点  $S$  建立 1 条备用路由  $L_1 - P_2$ . ②当链  $L_1$  中断或者路由  $P_2$  中断的时候, 备用路由则中断, 因此提示源节点  $S$  使用一条新的备用路由  $P_1$ . ③路由  $P_1$  中断, 则备用路由中断, 导致源节点  $S$  启用 1 个新的路由寻找进程.

因此, 从链  $L_2$  中断开始到导致源节点  $S$  启动 1 个新的路由寻找进程之间发生的事件就是  $\bar{L}_2(\bar{L}_1 + \bar{P}_2)\bar{P}_1$ , 其他项依此类推.

等式 (6) 可以化简为:

$$E = \bar{L}_1\bar{P}_1 + \bar{L}_2\bar{P}_2\bar{P}_1 + \bar{L}_3\bar{P}_3\bar{P}_2\bar{P}_1 + \dots + (\bar{L}_k\bar{P}_k\bar{P}_{k-2} \dots \bar{P}_2\bar{P}_1) \tag{7}$$

因此,  $T$  可以表示为:

$$T = \min(\max(X_{L_1}, X_{P_1}), \max(X_{L_2}, X_{P_2}, X_{P_1}), \dots, \max(X_{L_k}, X_{P_k}, X_{P_{k-2}}, \dots, X_{P_1})) \tag{8}$$

$X_{L_i}$  是指数随机变量, 均值等于 1 如果备用路由  $P_i$  的长度为  $k_i$  跳, 那么  $X_{P_i}$  也是指数随机变量, 均值等于  $\frac{1}{k_i}$ . 根据前面的假设,  $X_{L_i}$  和  $X_{P_i}$  相互独立.

设  $Z_i$  表示随机变量  $\max(X_{L_i}, X_{P_i}, X_{P_{i-1}}, X_{P_{i-2}}, \dots, X_{P_1})$ , 即  $Z_i = \max(X_{L_i}, X_{P_i}, X_{P_{i-1}}, X_{P_{i-2}}, \dots, X_{P_1})$ . 那么, 根据式 (3),  $Z_i$  的 PDF 函数  $f_{Z_i}$ <sup>[8] (P.358)</sup> 如下:

$$f_{Z_i}(t) = \sum_{j=1}^{i+1} \left[ \lambda_j^{(i)} e^{-\lambda_j^{(i)}t} \prod_{k=1, k \neq j}^{i+1} (1 - e^{-\lambda_k^{(i)}t}) \right] \tag{9}$$

其中  $\lambda_j^{(i)} = \begin{cases} \frac{k_j}{l}, & j = 1, 2, 3, \dots, i \\ \frac{1}{l}, & j = i + 1 \end{cases}$

### 2 性能分析

对于协议模型 1, 考虑下面 3 种特殊情况, 利用数学分析来评估时间间隔  $T$  的期望值:

情况 A: 源节点到目的节点有  $N$  条不相交路由, 且各级路由跳数相等, 即  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = \dots = k_N = k$

情况 B: 源节点到目的节点有  $N$  条不相交路由, 并且各级备份路由跳数比其上级路由跳数多 1 跳, 即  $k_1 = k, k_2 = k_1 + 1 = k + 1, k_3 = k_2 + 1 = k + 2, \dots, k_N = k_{N-1} + 1 = k + N - 1$ ;

情况 C: 源节点到目的节点有  $N$  条不相交路由, 并且各级备份路由跳数比其上级路由跳数多 2 跳, 即  $k_1 = k, k_2 = k_1 + 2 = k + 2, k_3 = k_2 + 2 = k + 4, \dots, k_N = k_{N-1} + 2 = k + 2(N - 1)$ .

取上述 3 种情形下 (情况 A、B、C) 源节点到目的节点的路径数目共有  $N = 2$  条, 即一主一备, 并且每条路径的寿命均值为  $5\text{ms}$  即  $l = 5\text{ms}$ , 作出上面 3 种多径协议连续 2 次路由寻找间隔  $T$  的期望与主路由跳数长度的关系曲线, 并与单路径协议做比较 (单路径协议  $N = 1$ ):

利用公式  $E[T] = \frac{\lambda_1^2 + \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2}{\lambda_1 \lambda_1 (\lambda_1 + \lambda_2)}$  (2 条路径) 和  $E[T] = \frac{l}{k}$ , 得出表 1

表 1 3 种情况下 2 次路由寻找的间隔时间的均值  $E[T]$  / ms  
Tab 1 Average interval between two discoveries under three cases

协议类型	主路由跳数				
	2	3	4	5	6
单路径协议	5/2	5/3	5/4	5/5	5/6
多路径 (情况 A)	15/4	15/6	15/8	15/10	15/12
多路径 (情况 B)	95/30	185/84	61/36	455/330	635/546
多路径 (情况 C)	35/12	49/24	3/2	109/84	185/168

作出图形, 如图 3 所示:

从图 3 可以看出如下 3 个方面:

1) 单路径的路由寻找周期始终小于多路径路由寻找周期, 这就意味着多路径 DSR 路由寻找进程被调用的频次较少;

2) 3 种情形下多路径协议路由寻找周期从情况 C, 到情况 B, 再到情况 A 递增. 因为备份路径跳数多, 表示网络越大, 也容易造成路径的中断, 所以其路由寻找的频率会快一些;

3) 随着主路由跳数的增加, 多路径技术带来的相对优势会慢慢削弱. 这是容易理解的, 因为备份路径的跳数至少等于主路由的跳数, 路由跳数越多, 一般越容易中断.

假设使用两种长度的主路由 ( $k = 3$  跳和  $k = 6$  跳), 包含 1 条主路由, 其余  $N - 1$  备份路由, 每条路由的寿命均值为  $5\text{ms}$  可以作出“连续 2 次路由寻找之间的时间间隔  $T$  的期望值与被维护的路由数量  $N$  的曲线图”, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 性能总是随着备份路由数量的增加而提高. 但是, 除了情况 A (各条路由的跳数相同) 之外, 当  $N > 3$  的时候, 性能的提高存在, 但是非常小. 在实际 AdHoc 网络中极不可能存在各条路由跳数相同的情况 (情况 A). 这就说明一般只使用一条或两条备份路由就足够了.

在协议 2 中, 假设每个节点只有 1 条备份路由, 主路由的跳数为  $k$  路由  $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ , 仍然考虑 3 种理想的情况:

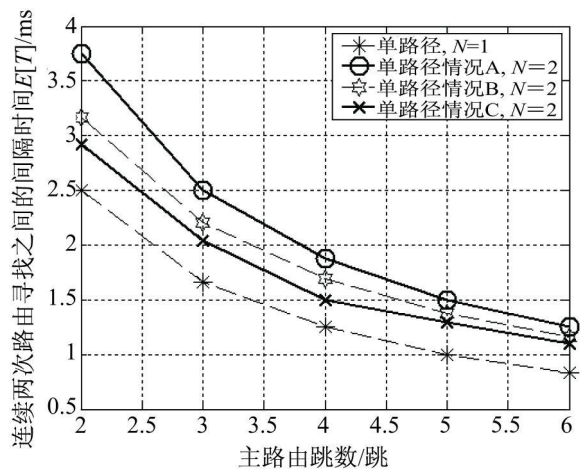


图 3 协议 1 在主路由跳数可变条件下的性能  
Fig.3 Performance of protocol 1 with different lengths of the primary route

情况 A: 从每个中间节点  $n_i$  开始的备份路由的跳数等于从该节点到目点节点的跳数, 即  $P_i = k_i = k - i + 1$ ;

情况 B 备份路由的跳数比主路由的跳数增加 1 跳, 即  $P_i = k_i = k - i + 2$ ;

情况 C: 备份路由的跳数比主路由的跳数增加 2 跳, 即  $P_i = k_i = k - i + 3$ ;

可以得出协议 2 在主路由跳数可变条件下的性能, 如图 5 所示.

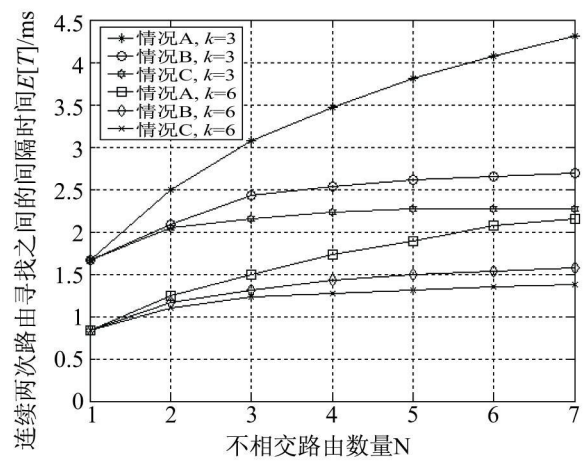


图4 协议1在路由数量N可变条件下的性能  
Fig.4 Performance of protocol 1 with varying number of routes(N)

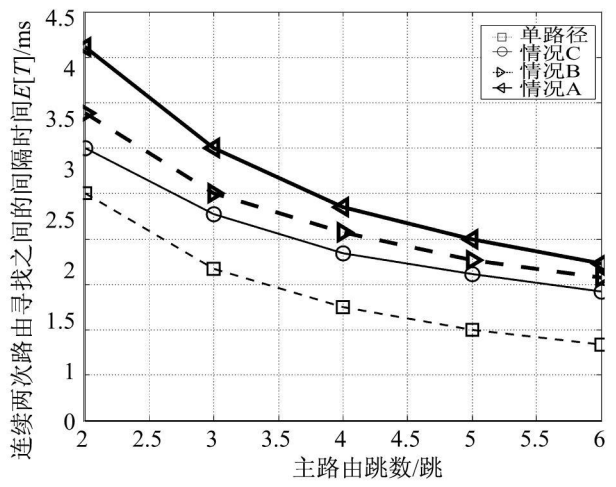


图5 协议2在主路由跳数可变条件下的性能  
Fig.5 Performance of protocol 2 with different lengths of the primary route

从图 5 知协议 2 的性能比单路径路由的性能提高了很多.

为了比较协议 1 与协议 2 的性能差别, 在情况 A 下来观察 2 种协议的性能, 假定 2 种协议均能得到“最佳”备份路由即备份路由跳数与主路由跳数相等. 可以得到表 2

从表 2 中可以看出, 协议 2 的连续 2 次路由寻找之间的时间间隔比协议 1 长, 路由寻找调用频次比协议 1 低, 从而说明协议 2 比协议 1 性能更优.

### 3 结论

论文首先对 2 种多路径 DSR 路由协议的数学模型进行了理论分析, 然后基于 matlab 工具进行了相关仿真实验, 结果表明: 多路径 DSR 路由协议的性能在很大程度上优于单路径 DSR; 协议 2 (中间节点使用备份路由) 比协议 1 (只考虑源节点使用备份路由) 性能更有优势; 备份路由的跳数越多, 对性能改善越不利; 一般情况下, 使用 2 条以上的备份路由带来的性能改善非常微小, 因此只要使用 1 条或 2 条备份

表 2 协议 1 与协议 2 的对比 (所有路由寻找调用频次都是相对于单路径路由协议的)

Tab 2 Comparison between the two variations of the multi-path protocols

主路由跳数 k	协议 1 (N=2)		协议 2	
	E[T]	路由寻找调用频次	E[T]	路由寻找调用频次
3	2.5	0.668	2.68	0.560
4	1.875	0.667	2.03	0.527
5	1.50	0.667	1.64	0.502
6	1.25	0.667	1.37	0.481
7	1.07	0.667	1.18	0.462

路由就够了. 文中的数学模型及数学分析都进行了一些理想化的假设, 因此, 所得结论可能与真实网络有较大出入, 下一步将通过具体的网络仿真软件对多路径 DSR 路由协议作进一步的研究和探索.

(下转第 50 页)

## 6 超车视觉感知滞后模型

据统计,城市交通事故中 10% 发生在超车上,  $B$  作为行动变化的主动发动者,但因  $AB$  间相对运动原因,会因感知阈造成  $AB$  相对位置视觉偏差。

以  $B$  参照系看:超车行为是  $A$  车以负加速度  $a_1$  减速并右转运动,如图 4 所示  $B$  的视觉感知滞后时间  $\tau_3 = \min\{\tau_1, \tau_2\}$ ,视觉感知滞后效应使得  $B$  相对  $A$  位置有增大偏移判断,即  $t$  时刻  $AB$  真实相对位置为  $A_1B$ ,而因视觉偏差误以为相对位置为  $A_2B$ 。

结论 3 超车时,后车驾驶员因感知滞后效应,使  $AB$  相对位置偏差视觉感知增大。

## 7 总结

视觉感知滞后时间  $\tau_1$  制动反应时间  $\tau_2$  和车辆反应时间  $\tau_3$  三者之和才是总反应时间。对正常状态驾驶员,有足够强的视觉感知力,实验证实,若驾驶员喝酒后、疲劳状态、心情混乱等原因可使感知滞后时间  $\tau$  比制动反应时间增加快得多,可达原有  $\tau$  的数百倍,  $\tau$  就成为总反应时间的主要成分了。感知滞后时间的研究值得重视。

## 参考文献:

- [1] 刘小兰. 交通仿真技术在交通事故研究中的应用 [C], //04 湖南道路交通安全学术研讨会论文集, 2004: 105-113
- [2] Mark Brackstone, Mike Donald. Car-following: a historical review [J]. Transportation Research F, 1999, 2: 181-196
- [3] 张伟. 考虑驾驶员的多信息处理和通道判断能力时车辆跟驰模型的改进 [J], 交通运输系统工程与信息, 2004, 4: 104-108
- [4] 黄志军. 驾驶员因素对交通安全的影响及对策 [C], //99 湖南高速公路交通安全学术研讨会论文集, 78-83

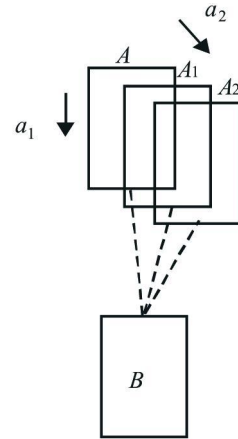


图 4 以  $B$  为参照系看:感知滞后造成  $A$  位置偏差示意图  
Fig.4 Taking  $B$  as reference system: sluggish sense resulting in  $A$  position deviation

(上接第 33 页)

## 参考文献:

- [1] BROCH J, JOHNSON D B, MALTZ D A. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. Internet-Draft. IETF. Manet-Dsr-09. txt [EB/OL]. <http://www.ietf.org/proceedings/04mar/I-D/draft-ietf-manet-dsr-09.txt> 2003-04-01.
- [2] PERKINS E, BELDING R OYER E M, DAS S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing RFC 3561 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> 2003-06-01.
- [3] NASIPUR I A, DAS S R. On-Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks [C] // Proc. of the 8th Int'l Conf on Computer Communications and Networks (CCN). Boston: MA Press, 1999: 64-70.
- [4] LEE S J, GERLAM. AODV-BR: Backup Routing in Ad Hoc Networks [C] // Proc. of the IEEE WNC 2000. Chicago: IEEE Press, 2000: 1311-1316.
- [5] MARINA M K, DAS S R. On-Demand Multipath Distance Vector Routing for Ad Hoc Networks [C] // Proc. of the Int'l Conf for Network Protocols (ICNP). New York: ACM Press, 2001: 14-23.
- [6] ZHANG Linfang, ZHAO Zenghua, SHU Yantai, et al. Load Balancing of Multipath Source Routing in Ad Hoc Networks [C] // Proc. of the IEEE Int'l Conf on Communications IC 2002. Boston: IEEE Press, 2002: 3197-3201.
- [7] PESRIMAN M R, HAAS Z J, SHOLANDER P, et al. On the Impact of Alternate Path Routing for Load Balancing in Mobile Ad Hoc Network [C] // Proc. Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MOHOC). Boston: IEEE Press, 2000: 3-10.
- [8] ASISNASIPUR I, ROBERT CASANEDA, SAM R R, DAS. Performance of Multipath Routing for On-Demand Protocols in Mobile Ad Hoc Networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2001, 6(4): 339-349.
- [9] 陈林星. 移动 Ad Hoc 网络—自组织分组无线网络技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 357-360.