

# 基于虚拟信道多路径融合认知无线网络路由算法<sup>①</sup>

薛 伟, 宋成君, 张东东

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

**摘 要:** 针对认知无线网络中频谱的动态性、时变性、多样性以及节点移动性, 提出了一种基于虚拟信道的多路径融合认知无线网络路由算法. 在路由建立过程中, 为解决源节点与目的节点信道同步问题, 源节点在公共控制信道上广播添加虚拟信道的路由请求, 在当前所处信道为虚拟信道的节点中转发. 目的节点对多条路径通过信道切换进行融合, 以规避主用户的活动区域, 减少路径跳数, 提高链路的稳定性. 在路由维护阶段, 通过卡尔曼滤波对节点移动速度进行预测, 在链路断裂之前启动路由修复. 最后通过 NS2 中 CRCN Simulator 仿真结果表明, 该算法在链路通信的稳定性、分组投递率、吞吐量、端到端时延等方面有明显的改善, 提高了网络的整体性能.

**关键词:** 虚拟信道; 路径融合; 卡尔曼滤波; 链路稳定性; 链路预测

## Routing Protocol Based on Virtual Channel Multipath Fusion for Cognitive Radio Networks

XUE Wei, SONG Cheng-Jun, ZHANG Dong-Dong

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A routing algorithm based on virtual channel multipath fusion for cognitive radio networks(CRN) was proposed to resolve the problem of dynamic, time-varying and diversities of pectrum in cognitive radio networks and node mobility. In the process of route setup, in order to solve the problem of source node and destination node channel synchronization, source node broadcast request routing(RREQ)which add virtual channel on control channel, if intermediate node's current channel equal to virtual channel, forwards RREQ.Destination node fuse multiple paths through the channel switch, to avoid PU activity area, reduce the path hop, improve the stability of the link.In the routing maintenance phase, predict node movement speed through Kalman filter and start the routing repair to repair broken link. NS2-based platform CRCN Simulator's simulation results show that the algorithm in the stability of the communication link, packet delivery ratio, throughput, end-to-end delay have obvious improvement, improve the overall performance of the network.

**Key words:** virtual channel; multipath fusion; Kalman filter; link stability; link prediction

在认知无线网络中, 认知用户通过对所处频谱环境的感知, 当主用户未使用授权频段时, 认知用户在不对授权用户造成有害干扰的情况下可以伺机使用这些空闲频段, 而当主用户再次出现在该频段, 认知用户必须无条件退避, 避免影响主用户的使用需求, 改变了以往的静态频谱分配策, 实行动态的频谱接入方式, 有效地解决了无线频谱资源紧缺的问题.

由于在认知无线网络中所使用的频谱资源是通

过检测的方式获得的, 具有频谱动态性、频谱时变性以及频谱多样性. 认知无线网络所具有的这些新的特点, 使得认知无线电环境下的路由算法和协议面临崭新的问题, 需要设计能够反映认知无线网络特点及适应于在认知无线网络中工作的路由算法和协议. 现阶段国内外很多学者都针对认知无线网络下路由协议进行了研究: 文献[1]以信道未被主用户占用的概率作为次用户路由稳定性的评价指标; 文献[2]提出了一

① 基金项目:国家自然科学基金(61374047)

收稿时间:2014-10-14;收到修改稿时间:2014-12-17

种基于连通性的路由策略,在选择路径时避免选择效率低不稳定的瓶颈链路,但并没有给出具体的算法文献[3]提出一种基于路线亲密度的路由选择指标,提高端到端吞吐量和减少延迟.文献[4]提出基于容量满足度和链路稳定度的认知无线电路由度量,从认知的角度衡量链路的优劣;上述文献只考虑了频谱的动态变化,忽略节点的移动性或假设节点都是静止的,在频谱动态变化和拓扑结构变化的共同作用下,加剧了链路的不稳定,需要考虑节点的移动性对路由的影响.文献[5]考虑频谱的动态性及节点的移动性,提出了一种基于 GPS 地理路由协议的路径融合算法,目的节点从不同的信道上接受 RREQs,然而难以实现目的节点与源节点信道同步,协议中节点通过 GPS 定位,网络中所有节点的位置信息对于每个节点是已知的,对于移动 Ad Hoc 来说极大地增加了路由开销,协议应用的可扩展性差.

本文针对认知无线网络频谱的动态性及节点的移动性,在认知移动 Ad Hoc 网络中沿用 AODV 协议基本流程,采用文献[5]路径融合的思想,提出了一种基于虚拟信道的多路径认知无线网络路由算法 VC\_AODV,通过使用虚拟信道使得目的节点接受处于不同信道的节点转发过的 RREQs,目的节点对 RREQs 进行分析,通过切换节点进行信道切换、路径融合,最终选择时延最小的路径建立路由,并且在路由维护阶段通过卡尔曼滤波预测进行优化.

## 1 系统模型与假设

1)PU(Primary User)节点在 CRN 中始终静止,活动状态服从 ON-OFF 模型<sup>[6]</sup>;CR(Cognitive User)节点在 CRN 中随机移动,对 PU 节点活动状态进行感知,生成当前可用频谱集合 SOPList[ ].

2)CR 节点具有两根天线,一根用于公共控制信道,一根用于数据传输并可以进行信道切换的认知天线,相邻节点间的通信具有信道切换同步机制.

3)通过 TwoRayGround 无线传输模型对相对运动的节点间的距离进行计算:

$$p_r = \frac{p_t h_r^2 h_t^2 G_r G_t}{d^4 L} \quad (1)$$

为保证数据的正确接受设置最小接收功率阈值  $P_{\text{thred}}$ ,通过无线传输模型得到节点的有效传输半径  $d_0$  (如图 3),接收节点可以通过接收功率计算与上游

节点间的距离,在路由维护阶段以此通过卡尔曼滤波对链路稳定性进行预测.

## 2 路由机制

在 VC\_AODV 协议中引入一种新颖的虚拟信道的概念,目的在于解决认知无线网络环境下建立多路径时,源节点与目的节点的信道同步问题:在路由发现过程中,源节点根据当前的可用授权信道集合,依次切换到各个授权信道广播 RREQ,通过该机制建立多条到达目的节点的路径,且每条路径中各节点都处于相同的授权信道,目的节点根据多路径信息进行路径融合,问题在于目的节点并不知道源节点当前在何授权信道上广播 RREQ,甚至目的节点当前所处信道不在源节点的可用信道集合中,也即无法接受 RREQ 建立路由.通过虚拟信道可以有效地解决该问题:通过公共控制信道广播 RREQ,可以保证目的节点能够接收到路由请求,而在 RREQ 包中添加虚拟信道信息,用于表示 RREQ 只在当前所处信道等于虚拟信道的节点中转发,即在公共信道中模拟在不同授权信道上进行转发.

在目的节点主要通过 SN(Switch Node,如图 1)节点来实现多路径融合及信道切换,通过多路径的融合可以建立路径最短的路由,并以此减少时延;通过信道切换可以避免 PU 出现时,CR 为避免对 PU 的干扰而切换信道;以下通过路由建立过程具体阐述协议的实现过程.

### 2.1 路由发现

源节点 S 需要与目的节点 D 建立通信时,根据当前可用频谱集合  $C=\text{SOPList}[ ]$  中可用授权信道,依次在 RREQ 包中添加并设置虚拟信道  $\text{VC}_i=\text{CH}_i$ ,用于表示当前 RREQ 在信道  $i$  上转发,而实际是在控制信道上进行广播转发;然后继续选取频谱集合  $C(\text{CH}_i \notin C)$  中可用授权信道添加到 RREQ 中转发.中间节点在控制信道上接收到 RREQ 后,转发条件为:(i)回路检查:通过广播 ID 及虚拟信道  $\text{CH}_i$  判断是否已经接受过该 RREQ,若接受过则丢弃;(ii)节点当前的数据信道处于信道  $\text{CH}_i$ ;(iii)没有感知到 PU 的活动.满足转发条件后,节点根据邻居节点广播的包含其可用信道信息的 HELLO 消息来判断附近是否有对应于信道  $\text{CH}_i$  的 PU 活动,若有 PU 活动则在 RREQ 中添加并设置 SN\_flag,表示此节点为切换节点 SN,最后添

加: (i)节点 ID; (ii)时间戳; (iii)周围邻居节点 IDs.

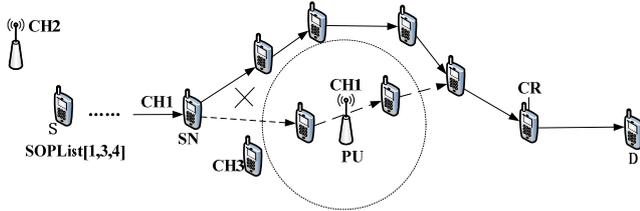


图 1 在虚拟信道 1 上转发 RREQ

转发过程如图 1 所示: RREQ 在虚拟信道 1 上通过控制信道广播, B 节点在控制信道上接收到 RREQ 后, 会提取 RREQ 中 VC<sub>i</sub>, 判断是否与当前数据信道一致, 而节点 B 的数据信道处于信道 3, 故对 RREQ 进行丢弃; 节点 C 处于 PU 的覆盖范围, 感知到 PU(授权信道为 1)当前处于活动状态, 通过广播 HELLO 消息告诉邻居节点自己当前的可用信道, 节点 C 会对转发过来的 RREQ 进行丢弃, 而节点 A 通过节点 C 知道自己为 SN 节点, 对 PU 进行避让绕行.

### 2.2 路由应答

通过在目的节点 D 设置定时器, 接受通过虚拟信道 CH<sub>i</sub>(实际为控制信道)转发过的 RREQs, 提取 RREQs 中的信息, 对信道切换节点、路径融合进行决策, 选择最优路径, 具体算法步骤如下:

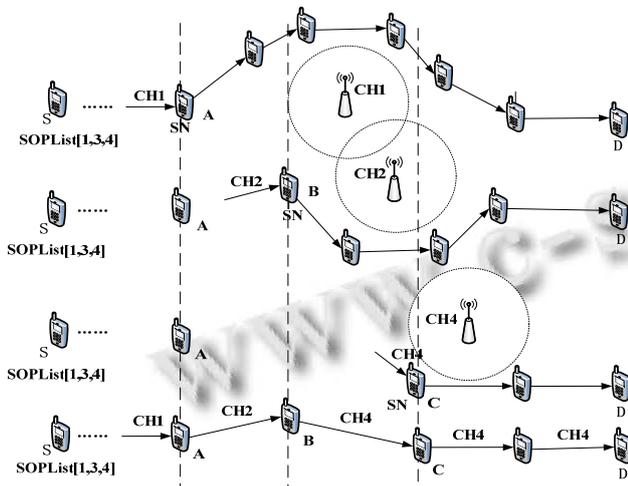


图 2 路径融合及信道切换过程

Step 1: RREQs 信息提取:  $P_i = \{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^l\}$ ,  $i \in C$ ,  $A_i^1 = S$ ,  $A_i^l = D$ ,  $P_i$  表示路径在虚拟信道  $i$  上转发的节点集合;  $R_i^k$  为  $P_i$  中  $A_i^k$  传输范围内的邻居节点集合;  $D_i^k$  为路径  $i$  中节点  $k$  到目的节点的传输时延 ( $D_i^k = t_i^l - t_i^k$ ). 由于最优路径是通过最小时延

度量的, 故在路径优化之前选择时延最小的路径:

$$i = \arg_k \min \{D_k^1, \forall k \in C\} \quad (2)$$

式中  $i$  表示虚拟信道  $i$  所在路径时延最小(如图 2, 假设  $i=1$ ), 信道切换及路径的融合也将基于路径  $i$  进行;

Step 2: 由于对 PU 的规避, 路径  $i$  中具有相对最小时延, 而其他虚拟信道上的相邻路径可能在 PU 活动区域具有局部最优路径, 因此可以通过 SN 节点切换信道, 连接相邻路径, 进行路径融合, 寻求时延最小的最优路径. 设最优路径为  $P_C$ , 从源节点开始建立, 建立过程如下:

$$\text{For } P_C = \{A_i^1\}, j=1; j=j+1 \\ \text{if } A_i^j \neq SN, P_C = P_C \cup A_i^j \quad (3)$$

该部分算法遍历路径  $i(P_i)$  中的节点, 若  $j=l_i$ , 则建立最优路径, 转到 Step 5 执行; 若  $A_i^j = SN$ , 则转到 Step 3 去执行;

Step 3:  $A_i^j = SN$  表示路径  $i$  在节点  $j$  处开始绕行避让 PU 活动区域, 绕行导致路径跳数增加, 端到端时延增加, 因此在节点  $j$  处寻找相邻路径上的节点或公共节点, 通过切换信道对该区域内处于其他虚拟信道上的局部最优路径进行融合, 然而切换条件需满足:

$$(i) A_m^k \in R_i^j, m \in C, m \neq k; \quad (4)$$

式中  $A_m^k$  表示处于虚拟信道  $m$  上的相邻路径中的节点, 判断该节点是否为  $A_i^j$  的相邻节点;

(ii) 对于满足条件(i)的所有相邻节点, 选择从  $A_i^j$  开始,  $A_m^k$  为下一跳节点的端到端时延最小的路径进行融合, 设信道切换时延  $t_s$ , 信道  $i$  传输时延  $t_r$ :

$$\delta_k = t_s + t_r^k \quad (5)$$

$$\{m, k\} = \arg_{\{m, k\}} \min \{L_m^k + \delta_k, \forall m \in C\} \quad (6)$$

$\delta_k$  为信道切换开销,  $L_m^k + \delta_k$  为信道切换后从节点  $A_i^j$  到目的节点 D 的传输时延, 由式(6)得出, 节点  $A_i^j$  (SN)选择路径  $m'$  ( $P_{m'}$ )中节点  $A_m^k$  切换信道, 并且从节点  $A_m^k$  开始与路径  $m'$  融合, 信道切换处记为  $C_j^{i \rightarrow k}$ , 更新  $P_C$ :

$$P_C = P_C \cup A_m^k \cup C_j^{i \rightarrow k} \quad (7)$$

Step 4: 继续执行 Step 3, 此时从路径  $m'$  中节点  $A_m^k$  的下一跳节点  $A_m^{k+1}$  开始遍历;

Step 5:  $P_C$  最终到达目的节点 D(如图 2), 完成路径优化, 目的节点 D 沿路径  $P_C$  转发 RREP (包含路径中所有节点 IDs 的  $P_C$ ,  $C_j^{i \rightarrow k}$ ), 源节点接收到 RREP 后就能通过数据信道进行通信.

### 2.3 路由维护

路由建立以后, 路径中链路节点间的通信可能会因为 PU 的出现和节点之间的相对移动导致信道频繁切换和链路断裂, 严重影响网络性能, 因此需要在路由维护阶段对 VC\_AODV 协议进一步优化.

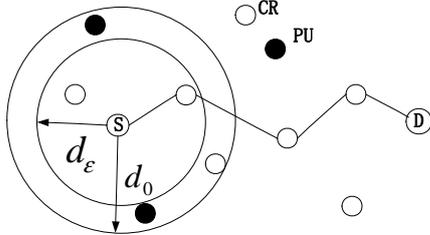


图 3 认知无线网络拓扑结构

针对移动性, 在路由维护阶段通过对节点相对距离的测量, 预测节点移动速度, 最终对链路的稳定性进行预测, 在超出传输范围之前启动路由修复, 因此需要对节点下一时刻的状态进行预测, 同时由于节点间的信号干扰造成测量值有误差, 而卡尔曼滤波<sup>[7]</sup>是解决这一问题的有效算法, 卡尔曼滤波的离散过程方程和观测方程如下所示:

$$x_k = Ax_{k-1} + w_k \quad (8)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (9)$$

卡尔曼滤波时间更新方程:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1,k-1} \\ P_{k,k-1} = AP_{k-1,k-1}A^T + Q \end{cases} \quad (10)$$

卡尔曼滤波测量更新方程:

$$\begin{cases} K_k = P_{k,k-1}H_k^T(H_kP_{k,k-1}H_k^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k,k} = \hat{x}_{k,k-1} + K_k(z_k - H_k\hat{x}_{k,k-1}) \\ P_{k,k} = (I - K_kH_k)P_{k,k-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $w_k$ 、 $v_k$  是均值为零, 相互独立的过程白噪声和测量白噪声, 相应的协方差矩阵为  $Q$ 、 $R$ , 由于  $Q$ 、 $R$  难以准确获得, 可根据网络节点移动速度进行取值. 卡尔曼滤波通过时间更新方程与测量更新方程, 不断地对目标状态及协方差进行预测、修正, 不需要存储大量的观测数据, 根据实时得到的数据进行滤波预测. 具体实现如下:

1) 设置危险传输范围, 当节点在危险传输范围时, 启动稳定性预测如图 3 所示.

$$d_\epsilon \leq d < d_0 \quad (12)$$

2) 通过从上游节点接收到的数据分组, 由

TowRayGround 传输模型(式 1), 计算节点之间距离  $d_k$ , 根据上一分组接受时计算的距离  $d_{k-1}$  及接收时间间隔  $\Delta t_k$  (由数据分组中的时间戳获得), 以接收节点为参考节点, 计算两节点的相对运动速度:

$$v_k = \frac{d_k - d_{k-1}}{\Delta t_k}, \text{ 卡尔曼递推过程初值:}$$

$$\hat{x}_{0,0} = v_0, \quad P_{0,0} = E[(v_1 - v_0) \cdot (v_1 - v_0)^T], \quad I = 1$$

由上述可知, 节点在危险传输范围时启动卡尔曼预测, 从  $v_2$  开始, 卡尔曼滤波不断地对  $\hat{x}_{k,k}$ 、 $P_{k,k}$  进行预测、估计、修正, 提高状态估计精度.

3) 同时, 需要判断节点是否超出传输范围, 若:

$$d_k + \hat{v}_{k,k} \cdot t_{tx-delay} \geq d_0 \quad (13)$$

则接受节点发送链路断裂消息报文(Broken Packet)到发送节点, 发送节点提前启动路由修复; 式中为  $t_{tx-delay}$  发送节点接收到链路断裂消息包后, 队列中缓存的分组发送完后的延时,  $t_{tx-delay}$  可以根据网络中节点移动速度留有一定裕量.

针对频谱动态性, 虽然通过信道切换、路径融合尽可能的避免了 PU 的影响, 然而由于某些 PUs 在路由建立的过程中正好处于 OFF 状态, 当通信中的 CR 感知到 PU 出现时, 而 CR 正在使用 PU 的授权信道, 则启动路由修复, 对转发过来的数据分组缓存, 同时 CR 发送包含当前可用信道的信道策略报文(ChannelStrategy Packet)与下游节点沟通协商选择空闲信道, 切换信道以避免对 PU 的干扰.

### 3 仿真分析

本文提出的 VC\_AODV 协议主要是对处于不同虚拟信道上对 PU 规避绕行路径的融合优化, 并在路由维护阶段通过卡尔曼滤波对链路稳定性进行预测, 因此采用基于 NS2<sup>[8]</sup>平台 CRCN 模拟器(支持信道数与接口数不同, 区别于 Roman 模型<sup>[9]</sup>)在不同数量的 PU 及节点移动速度下, 对协议性能进行仿真分析. 仿真环境参数如表 1 所示.

表 1 仿真环境参

参数	值	参数	值
PUs	2~10	发包率	100
CRs	30	可用授权信道数	12
场景尺寸	1000×1000m <sup>2</sup>	传输模型	TowRayGround
移动速度	0~10m/s	$d_\epsilon$	200m
业务类型	CBR	MAC 协议	Macng
分组载荷	500byte	$t_s$	5ms

仿真结果如图 4~7 所示, 其中 AODV 协议经过扩展(不对 PU 规避, 不支持链路预测)支持认知无线网络环境下多信道通信; 为便于比较分析,图 4~5 中节点移动速度为 0, 图 6~7 中 PUs=5, 仿真时间 200s.

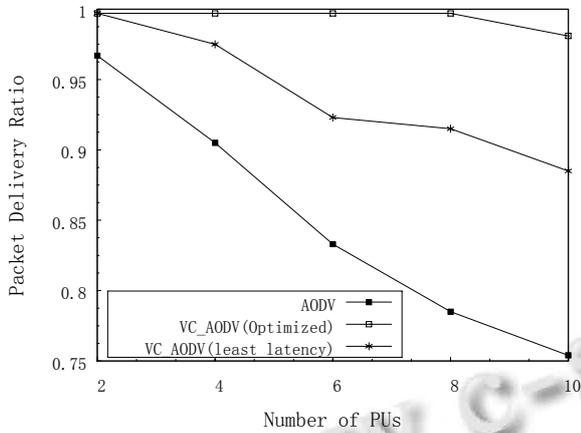


图 4 分组投递率在不同数量 PUs 下的比较

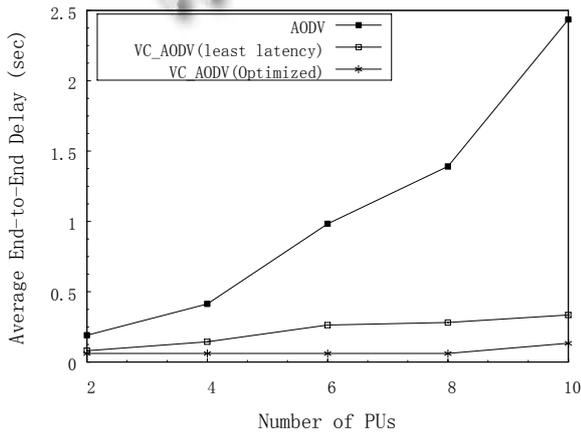


图 5 平均端到端时延在不同数量 PUs 下的比较

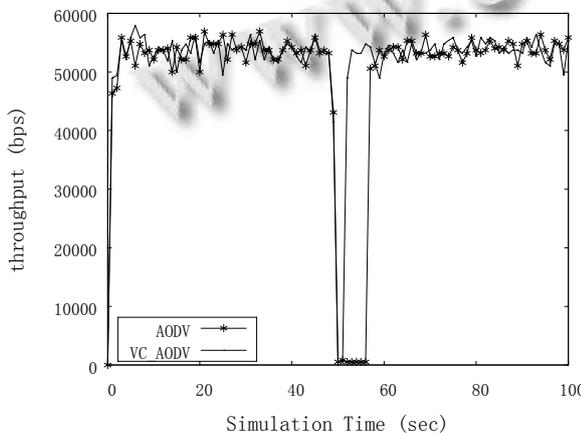


图 6 认知无线网络环境下网络吞吐量比较

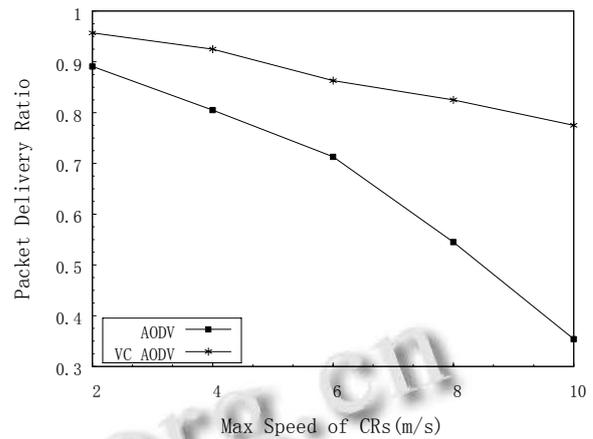


图 7 分组投递率在不同随机移动速度的变化

图 4 反映了协议在不同数量的 PU 下分组投递率的变化, 由于 AODV 协议没有对 PU 规避, 随着 PU 数量的增加, 路径中受到 PU 活动影响的链路数增加, 导致 CR 频繁切换信道甚至重新建立路由, 分组投递率下降明显; VC\_AODV(least-latency)建立的路径具有相对最小时延, 没有对路径优化虽然规避了处于活动状态 PU, 然而随着 PU 数量的增加, 导致通信中路径附近隐藏的 PU 激活, 迫使 CR 切换信道, 使得分组投递率下降; VC\_AODV 通过路径融合有效的减少 PU 对其的影响. 图 5 反映了随着 PU 数量的增加, AODV 协议下 CR 频繁切换信道及重新发起路由导致信道切换时延及路由开销增加, VC\_AODV 相比 VC\_AODV(least latency)进行了优化, 受 PU 影响较小, 通信较稳定. 图 6 反映了吞吐量在链路断裂前后的变化, 由于链路修复, 建立路由, 恢复通信, 提升网络吞吐量. 图 7 反映了分组投递率在不同的移动速度下的变化, 由于 VC\_AODV 协议对节点间链路稳定性进行预测, 使上游节点对分组进行缓存, 并建立新的路由, 减少了链路断裂后造成的分组丢失, 而 AODV 协议没有预测机制, 节点移动速度较大的情况下分组丢失严重.

### 4 结语

本文提出的基于虚拟信道的多路径认知无线网络路由算法, 通过使用虚拟信道进行信道切换、路径融合, 有效的减少了端到端时延及 PU 的影响, 路由维护阶段通过卡尔曼滤波预测提高了链路的稳定性, 提高了认知无线网络的整体性能.

## 参考文献

- 1 Sharma S, Shi Y, Hou YT, Sherali HD. Joint flow routing and relay node assignment in cooperative multi-hop networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(2): 254–262.
- 2 Abbagnale A, Cuomo F. Connectivity-driven routing for cognitive radio ad-hoc networks. *Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. 2010.
- 3 Beltagy I, Youssef M, Abd M. Channel assignment with closeness multipath routing in cognitive networks. *Alexandria Engineering Journal*, 2013, 52(4): 665–670.
- 4 黄宓, 韩庆文. 基于遗传算法的认知无线网络路由策略研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- 5 Chowdhury KR, Flice MD. Search: A routing protocol for mobile cognitive radio ad-hoc networks. *Computer Communications*, 2009, 32(18): 1983–1997.
- 6 Saleem Y, Rehmani M. Primary radio user activity models for cognitive radio networks: A survey. *Applications*, 2014, 43: 1–16.
- 7 Kalman RE. A new approach to linear filtering and prediction problem. *Trans. of the ASME Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(4): 34–45.
- 8 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. *NS 与网络模拟*. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- 9 Adding Multiple Interface Support in NS2. <http://personales.unican.es/>.