

基于状态转移的机会路由算法研究

王 鹏 谷源涛* 梅顺良

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

摘 要: 现有机会路由算法采用与传统无线路由相似的转发机制, 为每个节点指定全局度量值或下一跳节点集合。该文首先通过反例指出转发机制不能总获得最优的性能, 进而提出从状态转移的角度研究机会路由过程, 将不同已接收到的节点集合视为不同的状态, 并将路由过程看作由不同状态组成的马尔科夫链。随后建立了相应的路由算法模型, 该模型能够揭示路由过程的本质特征, 可适用于多播与多冲突域场景。在此基础上提出了基于状态转移的最佳机会路由算法(Shortest Opportunistic Routing, SOR), 证明了其在多播与多冲突域场景下可获得最小期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)代价。仿真结果表明了 SOR 算法的有效性, 其性能优于已有算法。SOR 算法可应用于多跳无线网络的最优机会路由策略选择, 计算给定拓扑下可获得的最小端到端 ETX 代价。

关键词: 无线网络; 机会路由; 马尔科夫特性; 状态转移; 最小端到端期望传输次数代价

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1977-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01335

Algorithm Design for Opportunistic Routing Based on State Transition

Wang Peng Gu Yuan-tao Mei Shun-liang

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Department of
Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Available Opportunistic Routing (OR) works adopted a relay scheme, which is derived from the traditional wireless routing algorithms. In such scheme, each node is assigned with a global metric or next-hop nodes set. In this paper, it is proved that the relay scheme can not always get the optimal performance by counterexample. The OR process is proposed to be regarded as a Markovian chain of different states from the perspective of state transition, where the states denote different set of nodes that have received the packet. Then the OR algorithms are modeled to help to investigate the intrinsic behavior of OR. It can be applied to the scenarios of multicast and multiple collision domains. Based on that, optimal algorithm named Shortest Opportunistic Routing (SOR) is proposed and proved, which can yield the least Expected Transmission Count (ETX) cost in both scenarios of multicast and multiple collision domain. Simulation results verify the superiority of SOR and show that the performance of SOR surpasses previous algorithms. The optimal OR strategy of wireless multi-hop networks can be selected and the minimal end-to-end ETX cost can be yielded by utilizing the proposed SOR.

Key words: Wireless network; Opportunistic Routing (OR); Markovian property; State transition; Minimal end-to-end Expected Transmission Count (ETX) cost

1 引言

传统无线路由为每个节点指定固定的下一跳节点以确定最优的传输路径。在路由过程中, 由于无线链路存在丢包现象, 为了保证可靠传输, 每一跳的发节点将持续广播, 直至预先指定的收节点成功接收为止。近年来提出的机会路由使人们对无线网

络传输有了新的理解^[1]。在机会路由中, 发节点不预先指定对应的收节点, 而是从多个收到广播数据的节点中进行选择。机会路由可有效利用多路径提供的分集增益以提高传输效率。其算法设计的关键问题之一是选取合适的广播节点, 在利用分集的同时, 保证数据能够以最小的代价从源节点传向宿节点^[1-3]。

现有机会路由工作大多针对各种静态拓扑。例如, Roofnet 是由 MIT 开发并维护的室外无线 MESH 网络实验平台, 由部署在屋顶上的 38 个节点

2012-10-17 收到, 2013-04-11 改回

国家自然科学基金(NSFC U0835003)资助课题

*通信作者: 谷源涛 gyt@tsinghua.edu.cn

组成,最早提出的机会路由算法(ExOR)即在此平台上进行实测,结果表明 ExOR 算法可比已有算法性能提升约 35%^[1],该工作也获得了 2005 年 SIGCOMM 最佳论文奖。此外, MORE 算法作为 ExOR 的改进版,也在 Roofnet 平台上进行了实测,可在 ExOR 基础上获得进一步性能提升^[4]。其它针对部署在室内的无线静态 MESH 网的实测结果也表明了机会路由可比传统无线路由获得较高性能增益^[5,6]。此外,机会路由技术还可应用于无线自组织网络(Ad-hoc Network)与无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)^[3]。在静态拓扑中,链路丢包因链路快衰落引起,丢包事件可以近似看作独立发生,连续丢包很少,链路可以看作总是连通但不可靠的^[7]。而在动态拓扑中,节点位置变化等原因导致的慢衰落引起大量丢包,连续丢包时间较长,因此链路发生连续丢包时,链路不再连通,拓扑发生变化。动态拓扑中,节点需要频繁更新网络拓扑信息,带来不可忽略的额外开销;同时导致拓扑信息滞后于真实值,带来新的问题。本文讨论不涉及动态拓扑。

现有机会路由按选择广播节点的方式可分为两类。第 1 类算法根据链路统计信息为每个节点赋予一个全局度量值,又称优先级或梯度,数据总是从低优先级的节点向高优先级的节点传输,而宿节点具有最高的优先级,从而保证传输方向正确;第 2 类算法为每个节点指定一组可能的下一跳节点集合,又称转发集合或候选集合,该类算法通过避免环路以保证传输方向正确。这两类算法都借鉴了传统无线路由的转发机制,每个广播节点将数据包成功转发后将不会再次参与广播,下一跳节点将从刚接收到数据包的节点中选择^[1,4,5]。

ETX(Expected Transmission Count)表示将单个数据包成功传递所需尝试的期望传输次数,因其易于测量,受链路负载影响小,能够较准确反映传输质量等优点,大多机会路由的工作均使用其作为度量,设计高传输效率的路由算法^[1,3-6,8,9]。针对全网属于同一冲突域条件下的单播场景,文献[6]和文献[8]分别使用优先级和转发集合的方法设计并证明了相应的最优算法。但在多播或存在多并发节点传输的多冲突域场景下,关于最优机会路由算法的理论成果尚未见诸文献。虽然转发机制在这些场景下的最优性尚不明确,但在一些相关工作中,仍然不加证明地应用了转发机制。文献[9]应用转发集合的方法设计了启发式的多播机会路由算法 MLCAR,文献[10]在物理层使用优先级的方法研究了应用机会路由的网络容量。

本文首先通过反例说明了在机会路由中,转发机制不能总获得最优的性能。随后受路由过程的无记忆性启发,我们使用状态转移的方法研究了机会路由过程,将全网不同已接收到的数据包的节点集合视为不同状态,同时将路由过程视为从初始状态到终止状态的马尔科夫链。建立了相应的路由算法模型,将路由算法视为不同状态的函数。应用该模型能够解决最优机会路由算法设计这一类基本问题,并揭示路由过程的本质特征,可自然地扩展到多播与多冲突域场景,为机会路由的理论研究和实用算法设计提供新的思路。接着我们提出了最优的路由算法 SOR(Shortest Opportunistic Routing),它将最优路由问题化为若干子问题,通过分别计算每个状态的最小 ETX 代价并选择最佳广播节点达到最优性能。最后,通过仿真验证了 SOR 的有效性,仿真结果表明 SOR 在多冲突域与多播场景下的性能优于现有参考算法。SOR 算法可应用于多跳无线网络的机会路由策略选择,计算给定拓扑下可达的最小端到端 ETX 代价。

本文余下内容安排如下:第 2 节介绍了基于状态转移思想的机会路由算法模型;第 3 节提出了最佳的 SOR 算法;并讨论了其复杂度与最优性;第 4 节利用 MATLAB 软件对 SOR 在不同场景下的性能作了仿真;第 5 节总结全文。

2 算法模型

常用的机会路由网络模型可分为两类。第 1 类着重研究物理层,将网络建模成一组离散的点,并利用香农公式等研究网络容量和功率分配等^[10-12]。此类模型以数据流作为对象研究传输过程。第 2 类着重研究网络层,将网络拓扑化,并利用图论和拓扑学研究路由算法。此类模型将数据包作为对象进行研究。大多数文献采用第 2 类网络模型,设 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为网络节点组成的集合,其中宿节点集合为 $D \subseteq V$ 。若令 $p_{i,j}$ 表示将数据包沿节点 v_i 到 v_j 成功传输的送达概率,则对应丢包率为 $1-p_{i,j}$,该链路的 ETX 代价为 $1/p_{i,j}$ 。在此模型下,设计合理的路由算法,通过选择最优策略以获得最小的端到端 ETX 代价是一类基本问题^[6,8,9]。

以图 1 所示的 4 节点拓扑为例,设全网属于同一个冲突域,源节点和宿节点分别为 v_1 和 v_4 。在传统无线路由中,根据 Dijkstra 算法, v_1 到 v_4 的最小 ETX 代价为 $1/0.3+1/0.5=5.33$,对应的最小 ETX 代价路径为 $v_1-v_3-v_4$,因此 v_1 的下一跳节点为 v_3 。而在机会路由中,节点 v_2 与 v_3 都可能成为 v_1 的下一跳广播节点,传输效率因利用分集而得到提高。根据

文献[6], 可求得 v_1 到 v_4 的 ETX 代价为 $\frac{1}{1-(1-0.1)(1-0.3)} + \frac{1}{0.5} = 4.7$, v_2 与 v_3 到 v_4 的 ETX 代价均为 2, 由于节点到宿节点的 ETX 代价越小, 它的优先级越高, 因此数据包将从 v_1 向 v_2 或 v_3 传输。根据文献[8], 亦可求得 v_1 的最优转发集合为 $\{v_2, v_3\}$ 。两类路由方法都已被证明可获得最小的端到端 ETX 代价。它们继承了传统路由的包转发机制, 即每个广播节点将数据包成功转发后将不会被再次选为广播节点, 下一跳节点将从新接收到数据包的节点中选择。

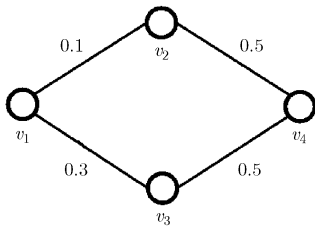


图1 由4个节点组成的拓扑

在多冲突域和多播场景下, 转发机制有可能剔除最优的广播节点, 导致得不到最小 ETX 代价。以图 2 所示的 5 节点拓扑为例, 其中 v_1 为源节点, v_4 和 v_5 为宿节点, 当前已收到数据包的节点集合为 $\{v_1, v_2, v_3\}$ 并用实心点表示。根据文献[6]和文献[8], 最优的广播节点为 v_3 , 一次性地将数据包成功传到下一跳节点的概率为 $1-(1-0.3)(1-0.3)=0.51$ 。当网络中允许存在多个冲突域时, 节点 v_1 和 v_2 可以互不干扰地并发传输, 一次性传输成功概率可提高到 $1-(1-0.4)(1-0.4)=0.64$ 。但根据现有转发机制, 源节点 v_1 因为已将数据包成功转发, 所以不会被再次选为广播节点。在多播场景下, 文献[8]也指出, 由于转发集合机制不允许已成功参与转发的节点再次参与传输, 导致基于此设计的算法难以达到最优性能。我们认为, 与传统无线路由的一对一特性不同, 机会路由的一对多特性与现有转发机制在本质上并不相容, 因此其潜在的性能增益难以被充分发掘。

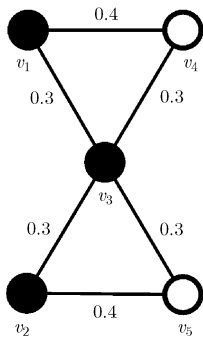


图2 由5个节点组成的拓扑

路由过程具有无记忆性, 广播节点的选择只依赖于当前网络状态, 而与历史状态无关。受此启发, 本文从状态转移的角度研究机会路由过程, 其流程图如图 3 所示。令 $S \subseteq V$ 为当前已成功接收到数据包的节点集合, 记为网络的当前状态。广播节点集合为状态 S 的函数, 表示为 $C = F(S) \subseteq V$, 其中 F 为路由算法, 它给当前状态 S 选择对应的广播节点集合 C 。每次广播后, 新的节点会接收到数据包, 记这些节点组成的集合为 S_N , 状态 S 也随之扩张。这一过程将持续进行下去, 直至宿节点集合 D 中所有节点都成功接收到数据包, 这一期间所有经过的状态组成一个有限步马尔科夫链。该模型具有更广的适用范围, 若广播节点集合 C 包含多个节点, 则对应于多冲突域场景。若宿节点集合 D 存在多个元素, 则对应于多播场景。

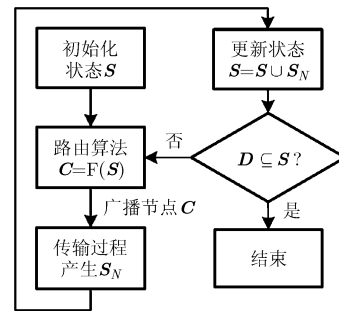


图3 路由过程的流程图

以图 1 中拓扑为例, 其对应的状态转移图如图 4 所示。初始状态仅含有源节点 v_1 , 记为 S_1 。终止状态为 S_5, S_6 和 S_7 。每次广播相当于一次状态转移, 随着路由过程的进行, 更多的节点接收到数据包, 状态 S 也逐渐扩张, 直至到达满足 $D \subseteq S$ 的终止状态。对于给定的算法 F , 每个状态对应的广播节点集合也将确定, 由于系统给定, 各状态间的转移概率也随之确定, 从而可求得从初始状态到终止状态的平均转移次数, 即从源节点到宿节点集合的 ETX 代价。其计算方法详见下一节。

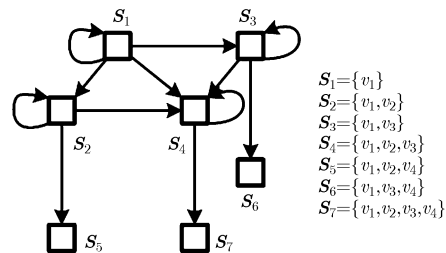


图4 图1拓扑的路由过程状态转移图

3 SOR 算法

对于给定算法 F 和宿节点集合 D , 令 $m_F(\mathbf{S})$ 表示从状态 \mathbf{S} 到终止状态的平均转移次数, 又称为状态 \mathbf{S} 的 ETX 代价。易得, 若 $D \subseteq \mathbf{S}$, 则 $m_F(\mathbf{S})=0$ 。令 $P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S}^*)$ 表示以 \mathbf{C} 为广播节点集合, 从状态 \mathbf{S} 到状态 \mathbf{S}^* 的一步转移概率。对于给定的算法 F , 令 $P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S}^*) = P(\mathbf{S}, F(\mathbf{S}), \mathbf{S}^*)$ 。根据转移过程中各状态的 ETX 代价关系, 易得

$$\begin{aligned} m_F(\mathbf{S}) &= 1 + \sum_{\mathbf{S}^* \supseteq \mathbf{S}} P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S}^*) m_F(\mathbf{S}^*) \\ &= 1 + \sum_{\mathbf{S}^* \supseteq \mathbf{S}} P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S}^*) m_F(\mathbf{S}^*) + P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S}) m_F(\mathbf{S}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S})$ 为广播失败, 停留在状态 \mathbf{S} 的概率。式(1)表明, 状态 \mathbf{S} 的 ETX 代价等于一步转移的 ETX 代价与下一跳状态 \mathbf{S}^* 的期望 ETX 代价之和。式(1)经变形可得

$$m_F(\mathbf{S}) = \frac{1 + \sum_{\mathbf{S}^* \supseteq \mathbf{S}} P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S}^*) m_F(\mathbf{S}^*)}{1 - P_F(\mathbf{S}, \mathbf{S})} \quad (2)$$

这表明每个状态的 ETX 代价可由其超集的 ETX 代价依状态转移概率加权计算求得。因此, 可以利用式(2)递归地从终止状态向前计算各个状态的 ETX 代价, 从而评估给定算法的性能。

基于上述讨论, 我们提出可以取得最小 ETX 代价的 SOR 算法, 记为 F^* 。它可以表达为

$$F^*(\mathbf{S}) = \arg \min_{\mathbf{C} \in \mathbf{X}(\mathbf{S})} \frac{1 + \sum_{\mathbf{S}^* \supseteq \mathbf{S}} P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S}^*) m_{F^*}(\mathbf{S}^*)}{1 - P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S})} \quad (3)$$

其中 $m_{F^*}(\mathbf{S})$ 为状态 \mathbf{S} 的最小 ETX 代价, $\mathbf{X}(\mathbf{S})$ 为状态 \mathbf{S} 可选的广播节点集合。式(3)表明, SOR 算法会从 $\mathbf{X}(\mathbf{S})$ 中选择能获得最小 ETX 代价的广播节点集合。当全网存在多冲突域时, \mathbf{S} 的任意子集都可成为广播节点集合, 此时 $\mathbf{X}(\mathbf{S})$ 为 \mathbf{S} 的幂集, 单冲突域场景对应于 $\mathbf{X}(\mathbf{S})=\mathbf{S}$ 的退化情况。SOR 算法的具体执行步骤如下:

步骤 1 对所有满足 $D \subseteq \mathbf{S}$ 的状态 \mathbf{S} , 令 $m_{F^*}(\mathbf{S})=0$ 。

步骤 2 令循环变量 $i=n-1$, 对所有满足 $D \subseteq \mathbf{S}$ 且 $|\mathbf{S}|=i$ 的状态 \mathbf{S} , 令

$$m_{F^*}(\mathbf{S}) = \min_{\mathbf{C} \in \mathbf{X}(\mathbf{S})} \frac{1 + \sum_{\mathbf{S}^* \supseteq \mathbf{S}} P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S}^*) m_{F^*}(\mathbf{S}^*)}{1 - P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S})}。$$

执行式(3), 保存 $F^*(\mathbf{S})$ 。

步骤 3 如果 $i>1$, 则令 $i=i-1$, 重复执行步骤 2。如果 $i=1$, 则执行步骤 4。

步骤 4 对于任意状态 \mathbf{S} , 查表并返回 $F^*(\mathbf{S})$ 。

步骤 1 到步骤 3 可先于路由过程执行, 迭代地计算各状态的最小 ETX 代价并予以保存。SOR 利用了路由的无记忆性, 将最优路由问题转化为若干子问题, 为每个状态分别计算最小 ETX 代价并选择最优广播节点。这样避免了穷举所有可能的路径, 减小了问题的规模。这一部分的复杂度与网络拓扑有关, 当拓扑全连通时, 不同的状态数为 2^n , 其中含有 k 个节点的状态数为 2^{n-k} 。对于每个状态, 执行步骤 2 中求最小值操作的次数为 2^k , 因此 SOR 的最大计算复杂度为 $O(n2^n)$ 。当拓扑非全连通时, 可通过状态简化降低计算复杂度。在路由过程中, 仅需执行步骤 4, 为当前状态选择对应的最优广播节点集合, 该操作的复杂度为 $O(1)$ 。其最优性证明如下。

证明 使用反证法。假设 SOR 不是最优算法, 即不是所有的状态都能获得最小 ETX 代价。设存在状态 \mathbf{S}_0 和算法 F , 使得 $m_F(\mathbf{S}_0) < m_{F^*}(\mathbf{S}_0)$ 。

此时, 根据 \mathbf{S}_0 , 存在以下 3 种可能性:

(1) 若 $D \subseteq \mathbf{S}_0$, 则根据定义, 有 $m_F(\mathbf{S}_0) = m_{F^*}(\mathbf{S}_0) = 0$, 因此假设不成立。

(2) 若 $D \not\subseteq \mathbf{S}_0$ 且 $\forall \mathbf{S} \supseteq \mathbf{S}_0, m_F(\mathbf{S}) \geq m_{F^*}(\mathbf{S})$, 由于网络给定, 因此状态转移概率为常数, 根据式(2), 状态 \mathbf{S}_0 的 ETX 代价由其超集的 ETX 代价决定。而根据条件, \mathbf{S}_0 所有超集满足 $m_F(\mathbf{S}) \geq m_{F^*}(\mathbf{S})$, 故可得 $m_F(\mathbf{S}_0) \geq m_{F^*}(\mathbf{S}_0)$, 假设不成立。

(3) 若 $D \not\subseteq \mathbf{S}_0$ 且 $\exists \mathbf{S}_1 \supseteq \mathbf{S}_0, m_F(\mathbf{S}_1) < m_{F^*}(\mathbf{S}_1)$, 则可将 \mathbf{S}_1 视为新的 \mathbf{S}_0 , 并考虑其可能性。由于网络节点数 n 有限, 因此经过有限次迭代, 最终可化为前两种可能性。综上所述, 假设不成立, 因此 SOR 为最优算法。证毕

与已有算法采用的转发机制相比, 基于状态转移的 SOR 算法反映了机会路由无记忆性与一对多的本质特征, 可扩展到多冲突域与多播场景, 为机会路由的理论研究与实用化提供新的思路。值得注意的是, SOR 算法步骤 2 中的状态转移概率 $P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S}^*)$ 由网络的 MAC 层决定, 对上层表现为确定值。SOR 算法能够在给定的 MAC 层机制下, 从网络层从所有的路由策略集合中选择最优的广播节点集合, 达到最小 ETX 代价。MAC 层机制建模可参见文献[10], 这里不再赘述。不失一般性, 本文仿真中假设 MAC 层采用保守机制, 不允许发生任何可能的冲突, 即若 $\exists v_i, v_j \in \mathbf{C}, v_k \in \mathbf{S}^* - \mathbf{S}, p_{i,k} > 0, p_{j,k} > 0$, 则 $P(\mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{S}^*)=0$ 。

4 仿真实验

首先，我们使用图 5 所示的拓扑，研究 SOR 在多冲突域下的性能，并以文献[8]中的 LCAR 算法作为对照算法。通过仿真比较了多冲突域场景下 SOR 和 LCAR 在多组源节点与宿节点下的性能，结果如表 1 所示。

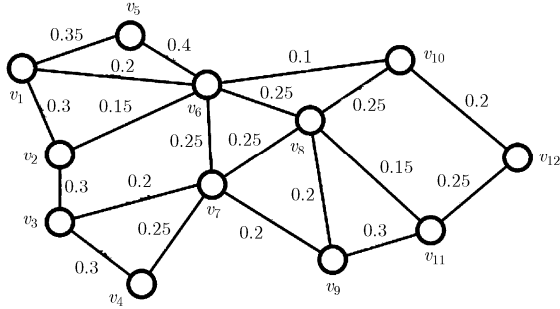


图5 12点拓扑，验证SOR在多冲突域下的有效性

表 1 多冲突域单播场景下，SOR 与 LCAR 算法的 ETX 代价，后者在括号中表示

源节点	宿节点			
	v_1	v_2	v_3	v_4
v_6	3.54(3.54)	4.65(4.70)	6.56(6.65)	7.31(7.36)
v_7	7.33(7.35)	6.70(6.76)	4.43(4.45)	4.00(4.00)
v_8	7.54(7.54)	7.96(8.62)	7.73(8.45)	7.85(8.00)
v_{10}	9.39(9.39)	10.1(10.5)	10.5(11.2)	10.8(11.1)
v_{12}	12.9(13.2)	13.4(14.4)	13.2(14.3)	13.4(13.8)

由表 1 可见，当源节点为 v_6 和 v_7 时，ETX 代价较小，使用 SOR 得到的性能增益有限。随着源节点和宿节点间距离增加，它们之间会存在多条互不干扰的路径，带来更多的潜在分集增益。与 LCAR 相比，SOR 可通过选择最优的广播节点集合以获得更小的 ETX 代价。这也说明 SOR 能够有效利用多冲突域带来的空间分集，提高传输效率。

其次，我们研究 SOR 在多播场景下的性能，采用基于转发集合的多播机会路由算法 MLCAR 作为对照^[9]。我们使用和文献[9]相同的拓扑，如图 6 所示，并假设全网属于同一个冲突域。仿真了从不同源节点到不同宿节点集合的 ETX 代价，仿真结果如表 2 所示。

由表 2 可见，当宿节点集合为 $\{v_{12}, v_{13}\}$ ，或源节点为 v_{11} 时，SOR 与 MLCAR 算法的 ETX 代价基本相同。此时源节点与宿节点之间的距离较近，或宿节点集合间距离相近，难以通过发掘多种可能的传输路径以进一步提升传输性能。其它情况下 SOR 能够比 MLCAR 获得更明显的性能提升，这是由于

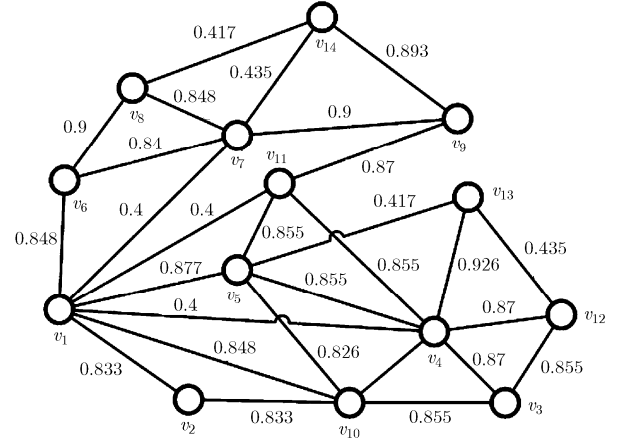


图6 14点拓扑，验证SOR在多播下的有效性

表 2 单冲突域多播场景下，SOR 与 MLCAR 算法的 ETX 代价，后者在括号中表示

源节点	宿节点集合			
	$\{v_{12}, v_{13}\}$	$\{v_{12}, v_{14}\}$	$\{v_{13}, v_{14}\}$	$\{v_{12}, v_{13}, v_{14}\}$
v_1	2.91(2.91)	4.66(4.92)	4.34(4.54)	4.72(4.97)
v_2	3.52(3.62)	5.71(6.50)	5.49(5.90)	5.78(6.55)
v_{10}	2.42(2.42)	4.81(5.30)	4.63(4.70)	4.89(5.35)
v_{11}	2.39(2.39)	3.57(3.57)	3.43(3.50)	3.64(3.64)

随着源节点到宿节点的距离增加，可能的传输路径显著增多，采用转发集合方法的 MLCAR 难以选择最优的广播节点，导致其无法达到最优性能。

最后，我们针对图 6 的拓扑作了仿真以研究 SOR 在多冲突域多播场景下的性能，结果如表 3 所示。由于目前尚无针对此场景的同类算法，因而只能将表 3 数据与表 2 数据进行比较，了解多冲突域机制产生的增益。与单冲突域场景相比，由于数据包可以并发地分别向各个宿节点进行传输，多冲突域场景中 SOR 的 ETX 代价可进一步降低，从而验证了 SOR 的有效性。

5 结束语

本文从状态转移的角度研究了机会路由过程，将其看作从初始状态到终止状态的马尔科夫链。该模型能够揭示路由过程的本质特征，可自然地扩展

表 3 多冲突域多播场景下，使用 SOR 算法得到的 ETX 代价

源节点	宿节点集合			
	$\{v_{12}, v_{13}\}$	$\{v_{12}, v_{14}\}$	$\{v_{13}, v_{14}\}$	$\{v_{12}, v_{13}, v_{14}\}$
v_1	2.70	3.17	3.17	3.18
v_2	3.49	4.32	4.33	4.34
v_{10}	2.42	4.03	4.10	4.11
v_{11}	2.15	2.27	2.27	2.27

到多播与多冲突域场景,为机会路由的理论研究和实用算法设计提供新的思路。基于此提出了最优机会路由算法 SOR,并证明了其最优性。它将最优路由问题化为若干子问题,为每个状态分别计算其对应的最小 ETX 代价和广播节点以降低复杂度。通过仿真验证了 SOR 算法的有效性,仿真结果表明 SOR 在多冲突域、多播场合下性能均优于现有算法。

参 考 文 献

- [1] Biswas S and Morris R. ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM 2005, Philadelphia, 2005: 133-144.
- [2] Pelusi L, Passarella A, and Conti M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile Ad hoc networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(11): 134-141.
- [3] Liu H, Zhang B, Mouftah H, *et al.* Opportunistic routing for wireless Ad hoc and sensor networks: present and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(12): 103-109.
- [4] Chachulski S, Jennings M, Katti S, *et al.* Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM 2007, Kyoto, 2007: 169-180.
- [5] Rozner E, Seshadri J, Mehta Y, *et al.* SOAR: simple opportunistic adaptive routing protocol for wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(11): 1622-1635.
- [6] Laufer R, Ferriere H, and Kleinrock L. Polynomial-time algorithms for multirate anypath routing in wireless multihop networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(3): 742-755.
- [7] Reis C, Mahajan R, Rodrig M, *et al.* Measurement-based models of delivery and interference[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM, Pisa, 2006: 51-62.
- [8] Ferriere H, Grossglauser M, and Vetterli M. Valuable detours: least-cost anypath routing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2): 333-346.
- [9] Mazumdar S, Bose S, and Zhong W. Multicast least cost anypath routing: route cost calculations and forwarding[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(10): 1652-1655.
- [10] Zeng K, Lou W, and Zhai H. Capacity of opportunistic routing in multi-rate and multi-hop wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5118-5128.
- [11] Radunovic B, Gkantsidis C, Key P, *et al.* Toward practical opportunistic routing with intra-session network coding for mesh networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(2): 420-433.
- [12] Kim J, Michalopoulos D, and Schober R. Diversity analysis of multi-user multi-relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(7): 2380-2389.

王 鹏: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为无线通信。

谷源涛: 男, 1976 年生, 副教授, 研究方向为无线通信与信号处理。

梅顺良: 男, 1946 年生, 教授, 研究方向为无线通信与信号处理。