

# 一种基于部分网络编码的无线网络机会路由算法

王振朝<sup>1,2</sup> 蔡志杰<sup>1</sup> 薛文玲<sup>1</sup>

(河北大学电子信息工程学院 保定 071002)<sup>1</sup> (河北省数字医疗工程重点实验室 保定 071002)<sup>2</sup>

**摘 要** 结合机会路由和网络编码两项新技术各自的优势,提出了一种新的基于部分网络编码的机会路由算法(Opportunistic Routing Algorithm for Wireless Network Based on Partial Network Coding,ORAPNC)。为了避免数据包分叉传输,同时利于执行转发节点间协调机制,ORAPNC 首先以期望传输次数作为路由度量建立一条固定路由,并将候选转发节点集中在这条固定路径附近;为了充分减小网络中的冗余数据包,ORAPNC 采用一种新的转发节点间协调机制(Forwarding Nodes Coordination Mechanism,FNCM)来实现每跳的数据包传输。仿真结果表明,与其他相关路由协议相比较,ORAPNC 可以有效提高网络吞吐量,减小目的节点解出原始数据包的平均时延。

**关键词** 部分网络编码,无线网络,机会路由,网络吞吐量

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.029

## Opportunistic Routing Algorithm Based on Partial Network Coding for Wireless Networks

WANG Zhen-chao<sup>1,2</sup> CAI Zhi-jie<sup>1</sup> XUE Wen-ling<sup>1</sup>

(College of Electronic & Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)<sup>2</sup>

**Abstract** A new opportunistic routing algorithm for wireless network based on partial network coding (ORAPNC) was proposed, which combines the advantages of opportunistic routing and network coding. In order to avoid the bifurcation transmission of data packets and benefit the implementation of the coordination mechanism among forwarding nodes, firstly, ORAPNC establishes a fixed path using expected transmission count as path metric, meanwhile gathers the candidate forwarding nodes in the vicinity of this fixed path. Then, ORAPNC adopts a new forwarding nodes coordination mechanism (FNCM) to achieve per-hop packet transmission for the sake of reducing redundant data packets in the network sufficiently. Simulation results show that, comparing to other routing protocols, ORAPNC performs more effectively on improving network throughput, decreasing average delay of decoding the original data packets at destination node.

**Keywords** Partial network coding, Wireless networks, Opportunistic routing, Network throughput

## 1 引言

近些年,机会路由技术和网络编码技术作为两种独立的技术,分别受到了深入而广泛的研究<sup>[1-7]</sup>。针对确定性路由协议的不足,Biswas 等人提出了机会路由的概念<sup>[1]</sup>和机会路由协议 ExOR<sup>[2]</sup>。ExOR 并不为数据包预先选好路径,而是通过多个备选转发节点相互竞争、自主智能进行逐跳选择转发节点。ExOR 充分利用了无线信道的广播特性,大大提高了网络吞吐量以及传输可靠性。但是它由于采用集中调度,每次只能允许一个节点发送数据包,不利于空间复用。而网络编码(Network Coding, NC)的概念是由 Ahlswede 等人于 2000 年首次提出的<sup>[5]</sup>,即网络中间节点既能实现传统路由的“存储-转发”功能,又能实现对信息的编码处理。网络编码可以为网络提供多方面的好处,例如提升网络吞吐量,均衡网络负载,降低传输能耗等。

随着两种技术研究的深入,已有部分学者开始将研究重

点转向如何将两种技术融合,以达到同时发挥两者优势的目的。文献[8]提出了一种基于流内网络编码的机会路由协议 MORE。MORE 通过多个中继节点协作转发数据包,而不是由某一个节点转发,有效解决了空间复用问题;同时它还通过引入流内网络编码解决了数据传输过程中中继节点协作难的问题。但是 MORE 协议却存在着两大缺陷:1)由于 MORE 协议采用等长度的完全网络编码方式,因此目标节点只有收到  $K$ (同一段中原始数据包的个数)个线性无关的编码包后才能进行解码,这无疑增加了目的节点解出原始数据包的平均时延;2)源节点只有收到目的节点返回的 ACK 信息后才可发送下一段数据,即网络中只能存在一段数据,这样会造成源节点延迟发送新数据,网络中冗余数据包增多,在跳数比较多的无线网络中会严重影响网络的吞吐量。针对缺陷 1),文献[9]和文献[10]提出的机会路由策略 ORPNC 均采用任意长度的部分网络编码方式对数据包编码,较 MORE 协议有效降低了目的节点解出原始数据包的平均时延,使目标节点处原

到稿日期:2016-03-29 返修日期:2016-06-20 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958-),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信,E-mail:786657713@qq.com;蔡志杰(1992-),女,硕士生,主要研究方向为网络编码和无线自组网;薛文玲(1975-),女,博士生,副教授,主要研究方向为网络通信、无线通信。

始数据包到达流更均衡,但是随着  $K$  值的增大,数据包被重复编码的可能性增加,冗余无效编码包增加,需要的解码数据包也增加,因此目的节点解出原始数据包的平均时延也相应增加。针对缺陷 2), 文献[11]摒弃了段的概念,采用“滑动窗口”的方式传输数据,在一定程度上解决了该问题。文献[12]提出的无线网络机会路由算法 MinACK 可以允许网络同时存在多段数据,提高了网络吞吐量,但 MinACK 是独立于 MAC 层的,虽然节省了中继节点间的协作开销,却增加了每跳数据传输中的冗余数据包。

根据以上分析, MORE 协议的两大缺陷未能得到充分解决,因此本文在文献[10]和文献[12]的基础上提出一种新的基于部分网络编码的机会路由算法 ORAPNC,以期充分减少网络中的冗余数据包,从而进一步提高网络吞吐量,减小目的节点解出原始数据包的平均时延。ORAPNC 首先以期望传输次数作为路由度量寻找一条端到端的固定路由,并在这条路径附近选择邻居作为候选转发节点;然后结合部分网络编码技术与机会路由技术实现数据的传输,在每跳数据包传输过程中采用新的转发节点间协调机制 FNCM,以充分减小网络中的冗余数据包。

## 2 基于部分网络编码的机会路由

部分网络编码(Partial Network Coding, PNC)是由 Wang 等人提出的<sup>[13]</sup>。不同于完全网络编码采用等长度的编码方式,部分网络编码采用任意长度编码方式。基于部分网络编码的机会路由可以保留空间复用的优点,同时可以减小目的节点解出原始数据包的平均时延,使原始数据包到达流更均衡,以便目的节点处理原始数据包。图 1 和图 2 分别示出了基于完全网络编码的机会路由和基于部分网络编码的机会路由。

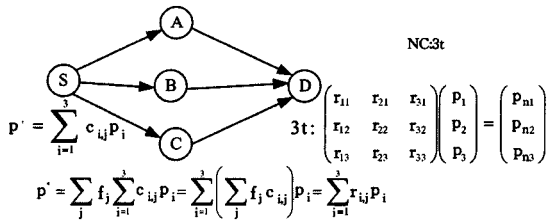


图 1 基于完全网络编码的机会路由

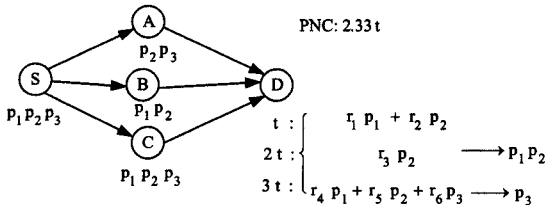


图 2 基于部分网络编码的机会路由

如图 1 所示,源节点  $S$  要传送 3 个数据包到目的节点  $D$ ,采用基于完全网络编码的机会路由。 $S$  对原始数据包进行编码,然后广播出去。候选转发节点接收到编码包后再进行编码转发,直到目的节点  $D$  收到 3 个线性无关的编码包  $P_{n1}$ ,  $P_{n2}$ ,  $P_{n3}$ 。假设  $P_{n1}$ ,  $P_{n2}$ ,  $P_{n3}$  到达  $D$  处的时间间隔为  $t$ ,即它们分别在  $t, 2t, 3t$  时刻到达  $D$ 。 $P_{n3}$  到达目的地节点后,目的节点才可以同时解出原始数据包  $P_1, P_2, P_3$ ,则目的节点解出原始数据包的平均时延为  $(3t \times 3)/3 = 3t$ 。

考虑上述相同示例,图 2 采用基于部分网络编码的机会

路由,源节点  $S$  同样要传送 3 个数据包到目的节点  $D$ 。 $S$  仅仅将 3 个数据包简单广播出去,不对它们进行编码。候选转发节点竞争到无线信道时,对接收到的数据包进行任意长度的部分网络编码,然后将编码包广播出去。由于转发节点采用部分网络编码方式,因此目的节点  $D$  收到的编码包编码长度不一,解码过程的情况也多样。假设节点  $B$  首先发送编码包  $r_1 p_1 + r_2 p_2$ ,目的节点  $D$  在时刻  $t$  接收到该编码包,但无法解码;在  $2t$  时刻,节点  $D$  从节点  $A$  接收到编码包  $r_3 p_2$ ,此时可以解出数据包  $p_1$  和  $p_2$ ;在  $3t$  时刻,节点  $D$  接收到节点  $C$  转发的编码包  $r_4 p_1 + r_5 p_2 + r_6 p_3$ ,由于已知  $p_1$  和  $p_2$ ,因此可以解出  $p_3$ 。此时目的节点解出原始数据包的平均时延为  $(2t \times 2 + 3t)/3 = 2.33t$ ,小于采用完全网络编码时的  $3t$ ,且目的节点更为均匀地获得了原始数据包。

## 3 ORAPNC 路由算法

将部分网络编码与机会路由相结合,可以有效减小目的节点解出原始数据包的平均时延,但由文献[10]可知,当每段原始数据包个数  $K$  增大到一定值时,延时改善效果降低,这是由于随着  $K$  值的增大,数据包被重复编码的可能性增加,冗余无效编码包随之增加,因此我们希望路由算法应尽可能减小每跳数据包被重复编码的可能性。另一方面,传统的机会路由只允许网络中存在一段数据包,究其原因在于 ACK 信息未及时反馈给上一跳转发节点,为此我们希望路由算法应该可以允许中间转发节点逐跳反馈 ACK 信息。

基于以上两点,本算法在每跳数据包传输过程中采用新的转发节点间协调机制 FNCM。FNCM 不仅逐跳及时反馈 ACK 信息,允许无线网络可以同时传输多段数据包,以避免源节点延迟发送新数据,还通过每跳候选转发节点间协作实现数据传输,以减小每跳数据包被重复编码的可能性。为了利于候选转发节点间的协作,同时避免数据分叉传输,我们希望每跳候选转发节点应尽量集中,因此本算法首先确立一条固定路由,并在此固定路由的一跳范围内寻找转发节点。

### 3.1 固定路由的建立

本文采用期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)作为路由度量建立一条端到端固定路由。文献[14]首次提出了 ETX 的概念。每条链路的 ETX 值被定义为该链路成功传输一个数据包所需要的总的传输次数(包括重传)的期望值。节点到目的节点的 ETX 值为其路径上每一跳的 ETX 值之和。采用 ETX 作为路由度量标准,可以有效避免选择丢包率较高的路径传输数据,从而提高整个网络的吞吐量。

设路径  $q: u_0 \rightarrow u_1 \rightarrow \dots \rightarrow u_n$ , 其中,  $u_{k-1} \rightarrow u_k$  ( $k=1, \dots, n$ ) 是路径  $q$  上的链路,则链路  $u_{k-1} \rightarrow u_k$  ( $k=1, \dots, n$ ) 的度量  $M_k$  的 ETX 值为:

$$M_k = \frac{1}{1-h_k} \quad (1)$$

其中,  $h_k$  是链路  $u_{k-1} \rightarrow u_k$  ( $k=1, \dots, n$ ) 的丢包率,网络中的节点通过周期性地互相发送路由探测包来获得每条链路的丢包率。

整条路径  $q$  的度量可以看成路径上各条链路的 ETX 值之和,故路径  $q$  的度量为:

$$M(q) = \sum_{k=1}^n M_k \quad (2)$$

用  $M(q)$  作为路由度量函数时,在源节点到目的节点的

可选路径集  $\Lambda$  中选择出一条  $M(q)$  值最小的路径  $q'$ :

$$M(q') = \min_{q \in \Lambda} M(q) \quad (3)$$

固定路由的建立过程与 AODV 协议的路由寻找过程类似。源节点首先广播 RREQ 包; 接收到 RREQ 包的中间节点依据式(1)计算出该 RREQ 所经过路径的  $M(q)$  值, 然后更新该 RREQ 包, 继续广播; 目的节点在一段时间内接收多个 RREQ 后, 选择  $M(q)$  值最小的路径作为最终选择的路径, 并逆向单播 RREP 包至源节点。

### 3.2 候选转发节点集的确立

如图 3 所示, 假设路径  $q': v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_6$  是用  $M(q)$  作为路由度量函数所确定的固定路由, 在  $q'$  的一跳范围内选择候选转发节点。源节点  $v_1$  的下一跳候选转发节点集是指到目的节点的 ETX 值比自己小的邻居节点所组成的集合  $S_1$ , 即  $S_1 = \{v | ETX(v) < ETX(v_1), v \in neighbour(v_1)\}$ , 其中  $neighbour(v_1)$  表示节点  $v_1$  的一跳邻居节点, 转发节点集合  $S_1$  的下一跳候选转发节点集是指到目的节点的 ETX 值比节点  $v_2$  小并且为节点  $v_2$  的一跳邻居节点所组成的集合  $S_2$ , 即  $S_2 = \{v | ETX(v) < ETX(v_2), v \in neighbour(v_2)\}$ , 以此类推来确定候选转发节点集。

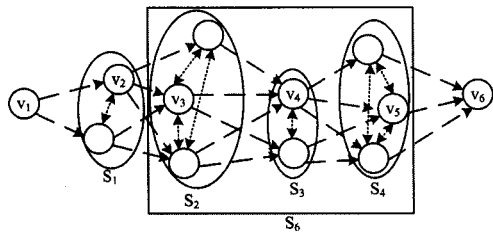


图 3 确立候选转发节点集的示意图

定义固定路由  $q'$  上的节点为其所在同一跳候选转发节点集的主节点。假设同一跳候选转发节点在主节点的监听范围内, 因此主节点可以集中确认同一跳候选转发节点是否接收到了新信息; 为了避免 ACK 数量较多而占用额外的网络带宽资源, 只允许主节点传送 ACK 确认信息。

上述确立候选转发节点集的方法将候选转发节点集中在端到端固定路由的一跳范围内, 可以有效避免数据分叉传输, 减少数据重传, 并且有利于执行以下的转发节点间协调机制 FNCM。

### 3.3 转发节点间协调机制 FNCM

分别针对源节点、中间节点和目的节点, 以图 3 为例阐述 FNCM 的工作机制。

#### 3.3.1 源节点处理机制

源节点  $v_1$  首先要把要发送的数据包分成相同大小的数据段, 每个数据段由  $K$  个数据包组成, 每个数据包的包头包含其所属的段号。源节点按段发送原始数据, 根据基于部分网络编码的机会路由的基本思想, 源节点不需要对原始数据包进行特殊处理, 只需简单地把一段中的  $K$  个数据包广播出去即可。这些原始数据包可以看成是被编码数据包数为 1、编码系数也为 1 的特殊编码包。

源节点收到主节点  $v_2$  发送的关于本段的 ACK 确认包 (ACK 包格式如图 4 所示) 后, 开始发送下一段数据包。

发送节点 ID	接收节点 ID	数据段 ID
---------	---------	--------

图 4 ACK 包格式

#### 3.3.2 中间转发节点处理机制

将中间候选转发节点分为两部分, 第一部分为源节点的下一跳候选转发节点, 如图 3 中的节点集  $S_1$  所示; 第二部分为除去集合  $S_1$  剩余的候选转发节点, 如图 3 中的节点集  $S_2$  所示。从候选转发节点集中选择转发节点的方法与路由协议 MinACK<sup>[12]</sup> 一致, 在竞争到无线信道的候选转发节点中随机选取转发节点, 因此所有的中间候选转发节点都有可能成为转发节点参与数据包的转发。下面分别说明集合  $S_1$  和集合  $S_2$  中的转发节点传输数据包的处理机制。

$S_1$  中的节点存储从源节点  $v_1$  接收的数据包, 当竞争到信道后, 节点随机产生一整数  $T(1 \leq T \leq \eta, \eta$  为节点存储的数据包个数), 并在数据包队列中随机抽取  $T$  个数据包, 进行部分网络编码后将编码包转发出去 (发送编码包的个数由式(5)确定)。生成的编码包包头格式如图 5 所示, 其中 Coding\_Vector 为编码包的编码系数向量。主节点  $v_2$  收到主节点  $v_3$  发送的关于本段的 ACK 确认包后, 立即向源节点传送该 ACK 包, 候选转发节点集  $S_1$  清空本段数据, 等待接收并转发下一段数据包。

发送节点 ID	接收节点 ID	数据段 ID	Coding_Vector
---------	---------	--------	---------------

图 5 编码包包头格式

节点  $v_2$  的所有下游主节点都存储一个数据结构——Buffer\_Status。Buffer\_Status 用于指示数据段在该主节点所属的同一跳候选转发节点集的缓存状态, 其格式如图 6 所示, 其中编码矩阵由数据段在该主节点所在候选转发节点集的编码系数向量组成, Rank 值为编码矩阵的秩。

数据段 ID	编码矩阵	Rank
--------	------	------

图 6 Buffer\_Status 格式

$S_2$  中的中间节点在接收到某数据段的编码包后, 此中间节点的主节点监听编码包信息, 并判断自身是否含有该数据段的缓存状态信息。如果没有, 则认为该编码包含有新信息, 接收到编码包的节点将其存入本地缓存, 同时主节点添加该数据段的缓存状态信息。如果有, 则将新编码包的编码系数向量加入到已缓存的该数据段的编码矩阵中, 并计算新编码矩阵的秩是否等于 Buffer\_Status 中该数据段的 Rank 值, 如果相等, 接收到编码包的节点丢弃编码包, 同时主节点将新编码包的编码系数向量从编码矩阵中清除; 否则认为该编码包含有新信息, 接收到新编码包的节点将其存入本地缓存, 竞争到无线信道后, 将新编码包与之前已收到的同一段编码包重新进行部分网络编码后向下一跳候选转发节点集广播发送 (发送编码包的个数也由式(5)决定), 生成编码包的包头格式也如图 5 所示, 同时主节点更新 Buffer\_Status 中的缓存状态信息。当主节点 Buffer\_Status 中的 Rank 值增加到  $K$  时, 立即向上一跳主节点发送关于本段的 ACK 确认包。主节点如果收到下一跳主节点发送的关于本段的 ACK 确认包, 立即清空主节点所在候选转发节点集的本段数据信息, 等待接收并发送下一段数据信息。

当中间节点  $\omega$  要发送一个编码包时, 保证节点  $\omega$  的下一跳候选转发节点集中至少有一个节点接收到该编码包的概率为:

$$p_\omega = 1 - \prod_{\xi \in S_{\omega\omega}} p_{\omega\xi} \quad (4)$$

其中,  $S_{\omega\omega}$  为节点  $\omega$  的下一跳候选转发节点集,  $p_{\omega\xi}$  为节点  $\omega$  到

节点  $\xi$  的丢包率。故节点  $\omega$  需要发送的编码包个数为:

$$N_{p\omega} = \frac{1}{p_\omega} = \frac{1}{(1 - \prod_{\xi \in S_{\omega\omega}} p_{\omega\xi})} \quad (5)$$

考虑到实际无线网络环境,式(5)的结果应向取整。

### 3.3.3 目的节点处理机制

每接收到一个编码包,目的节点  $v_b$  对已接收到的编码包进行高斯消元法求解,看是否有数据包可解。如果有数据包可解,将解出数据包立即送至应用层,并把该数据包从待解数据包队列加入到已解数据包队列。如果某段的  $K$  个数据包全部被目的节点  $v_b$  解出,则  $v_b$  向前一跳主节点  $v_s$  发送关于本段的 ACK 确认包。

## 4 复杂度分析

本文提出的 ORAPNC 算法复杂度主要由转发节点间协调机制 FNCM 决定。相比于 MORE 协议, FNCM 额外的开销主要集中在以下两部分: 1) 主节点存储 Buffer\_Status 数据结构所需的存储开销; 2) 主节点计算编码矩阵的秩所需的计算开销, 如果每个数据段包含  $K$  个数据包, 则计算编码矩阵的秩的算法复杂度不高于  $O(k^3)$ 。可以看出, 虽然本算法的节点运算复杂度和所需存储空间有所增加, 但这对于目前无线网络中节点的计算存储能力是完全可以承受的。

## 5 实验仿真与结果分析

为了验证 ORAPNC 协议的性能, 本文采用 Matlab 仿真软件实现 ORPNC、MinACK 以及 ORAPNC 协议的模拟仿真, 并对仿真结果进行分析比较。在一个  $100m \times 100m$  的模拟通信范围内随机分布 50 个无线节点, 每个节点的信号传输范围为 30m, 节点间的丢包率是根据距离大小随机产生的。单个数据包的大小为 512byte, 数据包传输一次用时 100ms, 忽略数据包编码、解码所用时间。从网络吞吐量以及目的节点解出原始数据包的平均时延两个方面对 3 种路由协议进行对比实验。

图 7 描绘了对于不同的  $K$  值, 3 种路由协议的网络吞吐量的对比情况。由图可知: 随着同一段原始数据包个数  $K$  值的增大, 单个编码包包含的信息量增多, 3 种协议的网络吞吐量均逐渐增加; MinACK 和 ORAPNC 允许网络中同时存在多段数据, 减小了源节点发送下一段数据包的时延, 因此网络吞吐量较 ORPNC 更高; ORAPNC 的网络吞吐量要比 MinACK 高, 这是因为一方面 ORAPNC 在固定路由的一跳范围内寻找转发节点, 有效地避免了数据包的分叉传输, 减少了数据包重传, 另一方面, ORAPNC 采用新的 FNCM 机制, 可以有效减小网络中的冗余数据包。

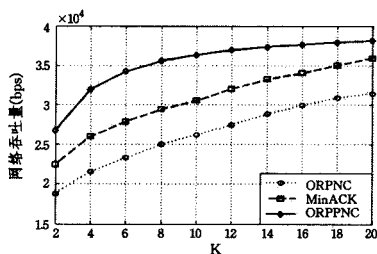


图 7 网络吞吐量对比情况

参考文献[10], 目的节点解出第  $l$  段原始数据包的平均时延的计算公式为:

$$D_l = \frac{\sum_{i=1}^K (T_i - T_f)}{K} \quad (6)$$

其中,  $T_i$  为目的节点解出该段第  $i$  个原始数据包时的系统时间,  $T_f$  为目的节点接收到该段第一个编码包时的系统时间。则目的节点解出原始数据包的平均时延为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad (7)$$

其中,  $N$  为目的节点解出数据包的总段数。

图 8 描绘了对于不同的  $K$  值, 3 种协议中目的节点解出原始数据包的平均时延的对比情况。通过观察可知: 随着  $K$  值的增大, 需要解出  $K$  个原始数据包的编码包个数增多, 3 种协议的目的节点解出原始数据包的平均时延均增大; 当  $K$  值较小时, ORPNC 的平均时延低于 MinACK 的, 随着  $K$  值逐渐增大, ORPNC 延时改善效果降低, 这是由于 ORPNC 中数据包被重复编码的可能性大大增加, 需要的解码数据包也增加造成的; ORAPNC 的延时改善效果始终优于 ORPNC 和 MinACK, 这是因为 ORAPNC 不仅采用部分网络编码传输数据包, 还将新的转发节点间的协调机制应用到数据包传输过程中, 大大减小了数据包被重复编码的可能性, 同时有效减少了目的节点处需要的解码数据包个数。

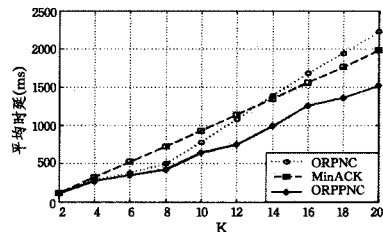


图 8 目的节点解出原始数据包的平均时延对比情况

**结束语** 本文充分利用部分网络编码和机会路由的优点, 提出了一种新的基于部分网络编码的机会路由算法 ORAPNC。ORAPNC 在每跳数据包传输过程中采用新的转发节点间协调机制 FNCM, FNCM 可以允许无线网络同时传输多段数据包, 同时降低数据包被重复编码的可能性, 从而充分减小网络中的冗余数据包。为了利于执行 FNCM 机制, 同时避免数据分叉传输, ORAPNC 在以 ETX 为路由度量建立的固定路由的一跳范围内寻找转发节点。实验结果表明, 与其他路由协议相比, ORAPNC 协议可以有效提高网络吞吐量, 减小目的节点解出原始数据包的平均时延。

## 参考文献

- [1] Biswas S, Morris R. Opportunistic Routing in Multi-Hop Wireless Networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2004, 34(1): 69-74
- [2] Biswas S, Morris R. ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2005, 35(4): 133-144
- [3] Thorat S A, Kulkarni P J. Opportunistic Routing in Presence of Selfish Nodes for MANET [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(2): 689-708
- [4] Chakchouk N. A Survey on Opportunistic Routing in Wireless Communication Networks [J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2214-2241

(下转第 174 页)

- Trust[J]. Journal of Personality, 1967, 35(4): 651-665
- [7] Schlenker B R, Helm B, Tedeschi J T. The Effects of Personality and Situational Variables on Behavioral Trust [J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1973, 25(3): 419-427
- [8] Wrightsman L S. Interpersonal Trust and Attitudes toward Human Nature[M]. San Diego: Academic Press, 1974
- [9] Li Yong-jun, Dai Ya-fei. Research on Trust Mechanism for Peer-to-Peer Network [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(3): 390-405 (in Chinese)  
李勇军, 代亚非. 对等网络信任机制研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(3): 390-405
- [10] Liu Wen-mao, Yin Li-hua, Fang Bin-xing, et al. A Hierarchical Trust Model for the Internet of Things [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5): 846-855 (in Chinese)  
刘文懋, 殷丽华, 方滨兴, 等. 物联网环境下的信任机制研究[J]. 计算机学报, 2012, 35(5): 846-855
- [11] Jiang Shou-xu, Li Jian-zhong. A Reputation-Based Trust Mechanism for P2P E-Commerce Systems [J]. Journal of Software, 2007, 18(10): 2551-2563 (in Chinese)  
姜守旭, 李建中. 一种 P2P 电子商务系统中给予声誉的信任机制[J]. 软件学报, 2007, 18(10): 2551-2563
- [12] Peng Dong-sheng, Lin Chuang, Liu Wei-dong. A Distributed Trust Mechanism Directly Evaluating Reputation of Nodes [J]. Journal of Software, 2008, 19(4): 946-955 (in Chinese)  
彭冬生, 林闯, 刘卫东. 一种直接评价节点诚信度的分布式信任机制[J]. 软件学报, 2008, 19(4): 946-955
- [13] Zhang Shi-bin, Xu Chun-xiang. Study on the Trust Evaluation Approach Based on Cloud Model [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 422-431 (in Chinese)  
张仕斌, 许春香. 基于云模型的信任评估方法研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(2): 422-431
- [14] Wang Shou-xin, Zhang Li, Li He-song. Evaluation Approach of Subjective Trust Based on Cloud Model [J]. Journal of Software, 2010, 21(6): 1341-1352 (in Chinese)  
王守信, 张莉, 李鹤松. 一种基于云模型的主观信任评价方法[J]. 软件学报, 2010, 21(6): 1341-1352
- [15] Gu Xin, Xu Zheng-quan, Liu Jin. Review of Cloud Based Trust Model [J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 176-181 (in Chinese)  
顾鑫, 徐正全, 刘进. 基于云理论的可信研究及展望[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 176-181
- [16] Zhang Xian-feng. Research on Online Consumer Trust Mechanism Based on Transaction Chain [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006 (in Chinese)  
张仙峰. 基于交易链面向网上消费者的信任机制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006
- [17] Qu Xiang-li. Research on Key Techniques for Mutual Trust Mechanism in Grid [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2006 (in Chinese)  
曲向丽. 网格环境下互信机制关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006
- [18] 李德毅, 杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [19] Huang Hai-sheng, Wang Ru-chuan. Subjective trust evaluation model based on membership cloud theory [J]. Journal on Communications, 2008, 29(4): 13-19 (in Chinese)  
黄海生, 王汝传. 基于隶属云理论的主观信任评估模型研究[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 13-19

(上接第 155 页)

- [5] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [6] Han Li, Qian Huan-yan, Liu Hui-ting. Algorithm for Multi-source Multicast with Network Coding over Multi-hop Wireless Networks [J]. Computer Science, 2015, 42(10): 88-91 (in Chinese)  
韩莉, 钱焕延, 刘慧婷. 无线多跳网络上基于网络编码的多源多播算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(10): 88-91
- [7] Chen Chen, Dong Chao, Mao Ya-fei, et al. Survey on network-coding-aware routing in wireless network [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 82-87 (in Chinese)  
陈晨, 董超, 茅娅菲, 等. 无线网络编码感知路由综述[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 82-87
- [8] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 169-180
- [9] Hao Kun, Jin Zhi-gang, Hao Ping. A New Opportunistic Routing Mechanism Based on Partial Network Coding [C] // The Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. IEEE, 2012: 154-157
- [10] Wang Xiao-dong, Huo Guang-cheng, Sun Hai-yan, et al. An Opportunistic Routing for MANET Based on Partial Network Coding [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1736-1740 (in Chinese)  
王晓东, 霍广城, 孙海燕, 等. 移动自组网中基于部分网络编码的机会主义路由[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1736-1740
- [11] Chen Chen, Dong Chao, Wu Fan, et al. Improving unsegmented network coding for opportunistic routing in wireless mesh network [C] // 2012 IEEE Wireless Communications and Network Conference (WCNC). IEEE, 2012: 1847-1852
- [12] Tian Xian-zhong, Liu Qiang, Hu Tong-sen. An Algorithm of Network Coding Based Opportunistic Routing for Wireless Networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(12): 1771-1776 (in Chinese)  
田贤忠, 刘强, 胡同森. 一种基于网络编码的无线网络机会路由算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(12): 1771-1776
- [13] Wang Dan, Zhang Qian, Liu Jiang-chuan. Partial network coding: theory and application for continuous sensor data collection [C] // IEEE International Workshop on Quality of Service, IWQoS. USA: New haven, 2006: 93-101
- [14] Couto D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [C] // Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003: 134-146