

基于相遇节点跨层感知的机会网络高效低时延路由算法

任智, 索建伟, 陈红, 徐中浩, 陈前斌

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对基于 epidemic 机制的机会网络路由算法未能及时感知相遇节点以及在数据分组交换过程中存在冗余的问题, 提出了一种采用跨层感知相遇节点思路的机会网络高效低时延路由算法——ERCES (epidemic routing based on cross-layer encountered-node sensing), 通过在物理层、MAC 层和网络层之间的跨层信息共享与协同, 实现相遇节点及时感知, 并且采用节点相遇后立即广播新数据分组、收到 SV (summary vector) 分组后优先发送目的节点为对方的数据分组、动态自适应发送 HELLO 分组、借助 SV 删除节点缓存中已到达目的节点的分组等新机制, 减少控制和存储开销, 降低分组时延。理论分析验证了 ERCES 算法的有效性, 仿真结果表明: 与经典的 Epidemic Routing 算法及其多个改进相比, ERCES 算法的控制开销和存储开销分别减少 8.2%和 2.1%以上, 数据分组平均端到端时延至少降低了 11.3%。

关键词: 机会网络; 路由算法; 相遇节点; 感知; 跨层设计

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)10-0001-08

Efficient low-delay routing algorithm for opportunistic networks based on cross-layer sensing of encountered nodes

REN Zhi, SUO Jian-wei, CHEN Hong, XU Zhong-hao, CHEN Qian-bin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: An efficient low-delay routing algorithm, name epidemic routing based on cross-layer encountered-node sensing (ERCES) was proposed to address the issue that the epidemic-based routing algorithms have some extralateness in sensing encountered nodes and extra overhead in exchanging data packets. ERCES achieves to speed sensing encountered nodes through cross-layer design among the PHY, MAC, and network layers. Moreover, to reduce overhead and to decrease data latency, it makes a node send novel data packet immediately after encountering other nodes, sends the packets close-by their destinations firstly after receiving summary vector(SV) packets, adaptively varies the period of HELLO packets, and deletes the packets reaching their destinations from nodes' memory with the help of SVs. Theoretical analysis verifies the effectiveness of ERCES. And simulation results show that ERCES reduces by at least 11.3% the control overhead by at least 8.2%, 2.1% memory overhead by more than 2.1%, and the average end-to-end delay by at least 11.3%.

Key words: opportunistic network; routing algorithm; encountered node; sensing; cross-layer design

1 引言

机会网络(opportunistic network)^[1~4]是一种不需要在源节点和目的节点之间存在完整路径、利用

节点移动带来的相遇机会实现数据传输的时延和分裂可容忍的自组织网络。由于能够在较为苛刻的环境下进行通信, 机会网络已成为未来普适计算的重要组成部分和移动 ad hoc 网络 (MANET, mobile

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972068); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40051); 重庆市科委重点实验室专项基金资助项目(D2011-24); 应急通信重庆市重点实验室开放课题基金资助项目(201201)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60972068); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2012jjA40051); The Special Fund of Chongqing Key Laboratory(D2011-24); The Open Project of Emergency Communication Laboratory of Chongqing(201201)

ad-hoc network) 的发展方向之一。

机会网络拓扑具有的间断或部分连接的特点, 给路由算法的设计带来一定挑战。为了在机会网络中端到端路径不确保存在的条件下进行路由, 人们设计了多种路由算法^[5-13], 其中研究与应用较为广泛的是基于 epidemic 机制^[14]的路由算法, 它采用“存储—携带—转发”(SCF, store-carry-forward) 方式传送数据, 让节点存储收到的数据分组并携带它们运动, 在运动中若与其他节点相遇, 则将数据分组的副本转发给相遇节点, 直至数据分组到达目的节点。epidemic 机制有助于降低分组时延和提高传送成功率, 但通过研究发现它在相遇节点感知耗时和数据分组交换开销方面存在冗余; 因此, 在前期研究^[15]的基础上, 针对这个问题提出一种基于相遇节点跨层感知的路由算法, 通过采用物理层、MAC 层和网络层之间的跨层信息共享与协同等 5 种新机制, 减少控制开销, 降低分组时延, 节约机会网络的带宽和节点资源, 提高路由算法的效率。

2 相关工作

关于机会网络中基于 epidemic 机制的路由算法, 目前已有一些研究^[9-13]。epidemic 机制是由 DEMERS 等^[14]提出的, 主要用于网络中不同节点的数据库信息的管理与维护。VAHDAT 等^[9]根据机会网络拓扑间断和部分连接的特点改进原有的 epidemic 机制, 设计了 epidemic routing(ER)路由算法, ER 算法采用 SCF 方式和 SV(summary vector)/数据分组交换机制, 有利于数据在网络中可靠传输, 但它依靠 internet MANET encapsulation protocol(IMEP)^[16]实现相遇节点感知功能, 难以及时发现相遇节点, 而且数据交换过程也存在冗余操作。MATSUDA 等^[10]根据网络状态综合使用 2-HOP 算法^[17]和 epidemic 机制, 提出了(p,q)-epidemic routing 算法, 通过广播已到达目的节点的数据分组信息(免疫信息)以删除节点缓存中的冗余分组, 节省了节点的存储空间, 但仍依靠 IMEP 协议感知相遇节点, 数据分组交换也沿用了原有机制。TOWER 等^[11]提出的基于 epidemic 机制的路由算法 ER-HELLO 使用周期性 HELLO 分组感知相遇节点, 有利于降低相遇节点感知开销, 但是仍未解决不能及时感知相遇节点的问题。WANG 等^[12]提出了一种自适应随机化的 ER 算法——ARER(adaptive randomized epidemic routing), 它根据式 $W_{ij}=C_1R_i(T_s)+$

$C_2p_{ij}+C_3TTL_{ij}$ 确定数据分组的转发优先级(其中, $R_i(T_s)$ 为副本密度, p_{ij} 为转发概率, TTL_{ij} 为生存时间参数, C_1 、 C_2 、 C_3 是预设常数), 用 HELLO 分组进行相遇节点感知, 但在 HELLO 分组中捎带了免疫信息, 可能导致节点相遇感知的通信开销增加。在前期研究中提出的基于分组索引增量交换的机会网络路由算法^[13]同样只使用 HELLO 分组感知相遇节点, 并设置了节点相遇时间间隔阈值, 但当时关注的焦点尚不是如何加快感知相遇节点。由上可知, 现有基于 epidemic 机制的路由算法虽不断演进, 但在加快相遇节点感知和减少数据分组交换开销方面仍存在不足: 如根据实验数据, 在常见的面积 1 500 m×300 m、节点数 50、节点移动平均速率 10 m/s 的机会网络环境中, 当节点通信范围分别为 10 m、25 m、50 m、75 m、100 m 时, 相遇节点感知平均耗时达到了 1.6 s, 控制开销在通信量中所占比重也一直在 85%之上, 因此, 有进一步改善的需要。

3 网络模型与问题描述

3.1 网络模型

机会网络的拓扑结构不同于传统的多跳无线网络, 结合其特点, 给出如下定义。

定义 1 (网络模型) 机会网络的数学模型可表示为有向图 $G=(V, E)$; 其中, 节点集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $n>1$, 为网络节点数, v_n 表示网络中第 n 个节点; 链路集合 $E=\emptyset \cup \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, $1 \leq m \leq n(n-1)$, e_m 表示网络中第 m 条链路。

定义 2 (机会网络路由模型) 用 $\{e_{is}(t_{si}, t_{ei})\}$, $1 \leq i \leq n(n-1)$ 表示一条链路, t_{si} 、 t_{ei} 分别表示该链路的生成和终止时间, 且 $t_{ei} > t_{si}$ 。机会网络路由的数学模型为: 在机会网络中, 寻找至少一个在逻辑上有序相连的链路组合 $\sum \{e_{is}(t_{si}, t_{ei})\}$, 使该链路组合的首尾节点分别是数据分组的源和目的节点, 且相邻两条链路中前一条链路的生成时间 t_s 必须小于后一条链路的终止时间 t_e , 即 $t_{si} < t_{e(i+1)}$ 。

定义 3 (SV 及 SV 分组) SV(summary vector) 即“汇总矢量”, 是一种二进制的一维矢量, 用于表示节点存有某些数据分组。SV 分组是一种含有汇总矢量的控制分组, 节点在与其它节点相遇后, 会将 SV 分组发送给相遇节点。

3.2 一些假设

假设 1 在足够长的网络运行时间内, 源和目

的节点之间存在端到端的有序链路组合。

本文假设机会网络的路由算法工作一段足够长的时间，在该时间内任何源和目的节点之间存在有序的链路组合，这样可以保证数据分组在正常情况下能够被送达目的节点。

假设 2 机会网络中的节点具有足够的数据处理、存储和转发能力。

本文假设机会网络中的节点具有足够能力处理、存储和转发数据，系统性能的瓶颈主要存在于传输链路。这样可以将研究焦点集中于完成数据传输功能的机会网络路由算法上。

以上述假设为前提，在研究中发现现有基于 epidemic 机制的路由算法存在以下待改进之处：

节点通过周期性发送 HELLO 分组来感知相遇节点，在感知时间上存在一定冗余。

节点将新产生的数据分组逐一交换给邻居，存在通信冗余。

节点发送分组后，HELLO 分组的发送计时起点没有作相应调整，有可能发送冗余的 HELLO 分组。

节点缓存中存在可以删除的数据分组。

4 基于相遇节点跨层感知的高效低时延路由算法

为解决上节所述 4 个问题，提出一种新的路由算法——ERCES (epidemic routing based on cross-layer encountered-node sensing)，在其中为相遇节点感知和数据分组交换提出了 5 种已有类似算法所不具有的新机制，从而达到降低相遇节点感知时延和减少开销的效果。

4.1 ERCES 算法包含的新机制

4.1.1 跨层感知相遇节点

当节点的物理层侦听到其他节点发出的信号载波，立即通过跨层信息共享的方式向网络层报告（可借鉴 CSMA/CA 机制中物理层向 MAC 层报告“侦听到载波”消息的方式，将 MAC 层接入算法实体换为网络层路由算法实体来实现。如果同时遇到多个节点，物理层用同样方式向网络层跨层报告。为了降低硬件实现的复杂性和难度，可将 MAC 层作为联系通道，在网络层路由算法实体和 MAC 层接入算法实体之间增加软件接口，使接入算法实体能够向路由算法实体发送中断并且路由算法实体能够调用接入算法的载波侦听开关功能）。网络层判断节点相遇事件发生后，立即广播一个 SV 分

组，于是，相遇双方进入数据分组交换流程。这种新机制拟在解决节点不能及时感知相遇节点的问题，有助于降低节点相遇感知延迟和数据分组传输时延。为避免对同一节点相遇事件的重复报告，物理层报告节点相遇之后网络层就将该报告功能关闭，直到需要时再开启。

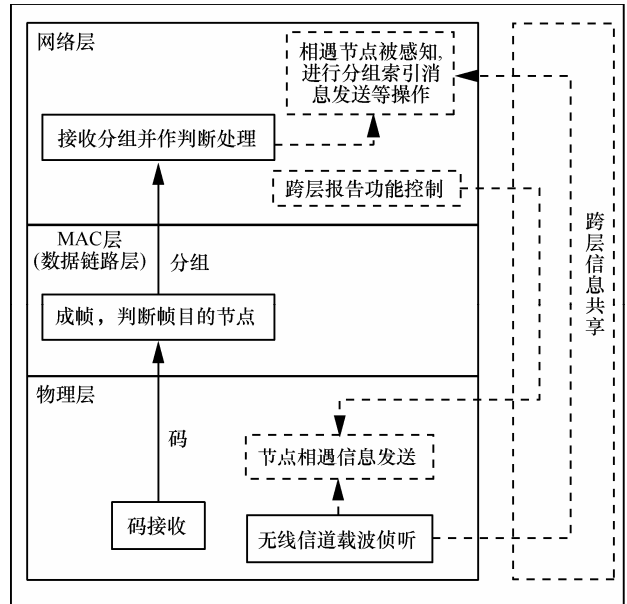


图 1 ERCES 的相遇节点跨层感知操作示意

4.1.2 节点相遇后立即广播新产生的数据分组

一个节点如果判断出与其他节点相遇（条件 {收到物理层跨层报告 ∪ 收到相遇节点发送的 HELLO 分组} 成立），则立即广播它在最近两次节点相遇之间新产生的数据分组。这种新机制能够解决节点与邻居逐一交换新数据分组而产生冗余开销的问题，从而减少数据分组的交互次数，降低数据分组的转发开销和时延。

4.1.3 收到 SV 分组后优先发送目的节点为对方的数据分组

若节点收到相遇节点的 SV 分组，会立即将目的节点为相遇节点的数据分组发送给对方，然后才发送 Request 分组。这种新机制拟在解决“先发送 SV 分组会影响数据分组时延和成功率”的问题，有利于降低数据分组端到端时延和提高传送成功率，而且能够避免在收到 SV 分组之前发送数据分组引起的重复发送问题。

4.1.4 动态自适应发送 HELLO 分组

在现有使用 HELLO 分组的路由算法中，每当计时周期 T 到达时节点的网络层会清零 HELLO 分组发

送计时器并广播 HELLO 分组;而在 ERCES 算法中,网络层在收到 MAC 层发送帧的跨层信息后也会将 HELLO 分组发送计时器清零。这种结合跨层信息动态调整发送计时起点的机制拟在解决发送不必要的 HELLO 分组的问题,从而节约无线网络带宽和节点资源。

4.1.5 借助 SV 删除节点缓存中已到达目的节点的数据分组

节点收到相遇节点的 SV 后,判断是否有数据分组满足条件{目的节点为相遇节点∩两节点同时存有},如果有,则将其从本节点的网络层缓存中删除。这种机制拟在解决不能及时清理已达目的节点的数据分组的问题,为节点节省存储空间,而且不产生额外的通信开销。

4.2 算法操作

ERCES 算法具体包含以下 6 个步骤。

1) 每个节点的网络层在一跳范围内周期性广播含有节点网络地址的 HELLO 分组。

2) 节点的物理层进行载波侦听;如果侦听到其他节点发出的载波,则立即通过跨层信息共享的方式报告网络层,实现网络层对相遇节点的跨层感知,然后关闭跨层报告功能。

3) 网络层记录物理层的跨层报告功能的开关状态,并且判断条件{跨层报告功能状态为“关”∩HELLO 分组发送计时周期 T 到达}是否成立;若成立,则立即向物理层发送一个“开”信息,启动物理层的跨层报告功能,同时向下层发送一个 HELLO 分组。

4) 一个节点感知到相遇节点后,立即广播新产生的数据分组。若相遇节点是通过跨层方式感知到的,则在广播新数据分组之后,立即产生一个 SV 分组并在一跳范围内广播(以便通知未感知到的邻居);同时,MAC 层在每发送完一帧(数据帧或控制帧)之后,都会立即跨层通知网络层将 HELLO 分组发送计时器的值清零以重新计时。

5) 若一个节点收到邻居节点发出的 SV,则将满足条件{目的节点为对方∩双方共同缓存}的数据分组从自己的缓存中删除;然后,发送目的节点为对方的数据分组;最后,通过 Request 分组将满足{自己未存储∩对方已存储}条件的数据分组的信息发送给对方。

6) 若节点收到 Request 分组,则将请求发送的数据分组发送给对方;同时,将已到达目的节点的数据分组从缓存中删除,但保存它们的索引信息以

供更新其他节点的数据缓存。

4.3 相遇时间阈值计算

相遇时间阈值主要用于判断节点相遇事件是再次相遇还是上次相遇的不间断延续。

设节点相遇时的平均速率为 \bar{v} , 节点的通信半径均为 R , 节点 A 、 B 相遇后相距为 x , 则可得 x 的分布函数为

$$\begin{aligned} F(x) &= P(X \leq x) \\ &= \frac{\pi x^2}{\pi R^2} \\ &= \frac{x^2}{R^2} \end{aligned} \quad (1)$$

根据上述的分布函数可得概率密度函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = F'(x) = \frac{2x}{R^2} \quad (2)$$

因而可得节点 B 与 A 的平均距离,即图 2 中的 a 为

$$\begin{aligned} E[x] &= \int_0^R \frac{2x}{R^2} x dx \\ &= \frac{2R}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

根据图 2 及余弦定理可得

$$a^2 + b^2 - 2ab \cos(\pi - \theta) = c^2 \quad (4)$$

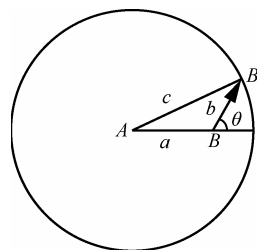


图 2 节点相对运动示意

则 BB' 的距离 $R(\theta)$ 为

$$R(\theta) = -\frac{2R}{3} \cos \theta + \frac{R}{3} \sqrt{7 + 2 \cos(2\theta)} \quad (5)$$

其中, θ 在 $[0, \pi]$ 服从均匀分布 (θ 在 $[0, 2\pi]$ 具有对称性), 则概率密度函数为

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}, & 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

根据式 (5) 和式 (6), 则可得到节点 B 离开节点 A 通信范围的平均距离 $S(\theta)$ 为

$$\begin{aligned}
S(\theta) &= \int_0^\pi f(\theta)R(\theta)d\theta \\
&= \int_0^\pi \frac{1}{\pi} \left(\frac{-2R \cos \theta}{3} \right) d\theta + \int_0^\pi \frac{R\sqrt{7+2\cos(2\theta)}}{3\pi} d\theta \\
&= \frac{R}{3\pi} \int_0^\pi \sqrt{7+2\cos(2\theta)} d\theta \quad (7)
\end{aligned}$$

令 $W(\theta) = \sqrt{7+2\cos(2\theta)}$ ，采用泰勒级数展开为

$$\begin{aligned}
W(\theta) &= W(0) + \frac{W(0)'}{1!}\theta + \frac{W(0)''}{2!}\theta^2 + \\
&\quad \frac{W(0)'''}{3!}\theta^3 + \dots + \frac{W(0)^n}{n!}\theta^n + \dots \\
&\approx 3 - \frac{2}{3}\theta^2 + \frac{4}{27}\theta^4 \quad (8)
\end{aligned}$$

将式 (8) 代入式 (7) 中可得

$$\begin{aligned}
S(\theta) &\approx \frac{R}{3\pi} \int_0^\pi \left(3 - \frac{2}{3}\theta^2 + \frac{4}{27}\theta^4 \right) d\theta \\
&\approx R - \frac{2\pi^2}{27}R + \frac{4\pi^4}{405}R \quad (9)
\end{aligned}$$

则相遇时间阈值为

$$T_{th} = \frac{(405 - 30\pi^2 + 4\pi^4)R}{405v} \quad (10)$$

4.4 性能分析

4.4.1 相遇节点感知时间

关于 ERCES 算法的相遇节点感知时间，有如下引理。

引理 1 ERCES 算法的相遇节点感知时间少于 ER-HELLO 算法。

证明 假设节点 A 、 B 发送 HELLO 分组的周期均为 T ，发送开始时刻分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别表示 A 、 B 发送非 HELLO 分组（如数据分组）的时刻，为具有一般性，设 $t_1=0$ ， $t_2>0$ ，节点相遇事件的发生概率为随机均匀分布，任取一个周期的时序如图 3 所示。

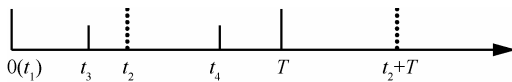


图 3 HELLO 分组发送时序

根据图 3，可计算 ER-HELLO 感知相遇节点所需时间的数学期望为

$$E_{t_{old}} = \frac{t_2}{T} \cdot \frac{t_2}{2} + \frac{T-t_2}{T} \left(t_2 + \frac{T-t_2}{2} \right) \quad (11)$$

经过跨层协同设计后，节点感知相遇节点所需时间的数学期望为

$$E_{t_{new}} = \frac{t_2}{T} \cdot \frac{t_3}{2} + \frac{T-t_2}{T} \left(t_2 + \frac{t_4-t_2}{2} \right) \quad (12)$$

对比式 (11) 与 (12)，有

因为 $t_3 \leq t_2$ 且 $t_4 \leq T$

$$\text{可得 } E_{t_{new}} \leq E_{t_{old}} \quad (13)$$

即相遇节点感知时间被缩短。

证毕。

4.4.2 计算复杂度

设机会网络的覆盖面积为 S ，节点数为 N ，节点的通信半径为 r 、平均运动速度为 v ，数据分组平均产生速率为 p ，网络运行时间为 T 。以下从时间复杂度、存储复杂度和通信复杂度 3 个方面推导 ERCES 算法的计算复杂度。

1) 时间复杂度

由条件可知节点的度 D 为

$$D = \pi r^2 N / S - 1 \quad (14)$$

一个数据分组在最极端的情况下需要经过 $N-1$ 次转发才能到达目的节点，即需要与 $N-1-D$ 个节点相遇。假设节点在网络中均匀分布，则节点间的平均距离为 $\sqrt{S/N}$ ，则节点在最极端情况下需运动的距离 d 为

$$d = (N-1-D) \cdot \sqrt{S/N} \quad (15)$$

消耗的时间 t 为

$$t = (N-1-D) \cdot \sqrt{S/N} / v \quad (16)$$

则时间复杂度 C_t 为

$$C_t = o((S\sqrt{N} - \pi r^2 \sqrt{N}) / v\sqrt{S}) \quad (17)$$

2) 存储复杂度

节点在网络运行 t 之后存储的数据分组与 p 、 T 、 N 等参数正相关，存储复杂度 C_s 为

$$C_s = o(pTN) \quad (18)$$

3) 通信复杂度

由于一个数据分组在最极端的情况下需要经过 $N-1$ 次转发才能到达目的节点，因此通信复杂度 C_c 为

$$C_c = o(N) \quad (19)$$

5 仿真实验

选取经典的 ER 算法及其改进版 ER-HELLO、

ARER 算法作为比较对象，在相同的仿真参数条件下，比较 4 种算法的归一化控制开销等性能。

5.1 仿真统计量

1) 归一化控制开销

归一化控制开销是所有节点发出的控制分组包含的比特数与所有节点发送的控制分组和到达目的节点的数据分组包含的比特数之比，计算公式为

$$C = P_c / (P_c + P_D) \quad (20)$$

其中， P_c 表示所有节点发送的控制分组包含的比特数， P_D 表示所有到达目的节点的数据分组的比特数。

2) 平均端到端时延

平均端到端时延是指到达目的节点的数据分组的平均耗时，计算公式为

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^D T_i / D \quad (21)$$

其中， T_i 表示第 i 个到达目的节点的数据分组的时延， D 表示到达目的节点的数据分组数。

3) 节点平均缓存分组数

节点平均缓存分组数用来表明节点使用缓存的情况，计算公式为

$$\bar{K} = \sum_{i \in V} K_i / N \quad (22)$$

其中， K_i 表示第 i 个节点缓存的分组数， N 为节点数。

4) 相遇节点平均感知时间

相遇节点平均感知时间用于显示感知相遇节点的平均用时，计算公式为

$$\bar{T}_{\text{discovery}} = t_{\text{all}} / C_{\text{discovery}} \quad (23)$$

其中， t_{all} 表示感知相遇节点总耗时， $C_{\text{discovery}}$ 表示感知到相遇节点的次数。

5) 数据分组传送成功率

数据分组传送成功率是指到达目的节点的数据分组数与所有源节点发送的数据分组数之比，计算公式为

$$D_{\text{rate}} = D / S \quad (24)$$

其中， D 表示已到达目的节点的数据分组数， S 表示所有源节点发送的数据分组数。

5.2 仿真参数设置

本文以 OPNET 作为仿真软件平台，并根据文献[9]设置节点的业务模型，节点移动模型选用 random waypoint，主要仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数设置

参数	数值
网络面积/m ²	1 500×300
节点运动速度/(ms ⁻¹)	1~19
传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	54
节点个数	50
分组产生间隔/s	1
节点通信范围/m	10,25,50,75,100
相遇时间阈值/s	1.23, 3.07, 6.15, 9.22, 12.3
仿真时间/s	4 000

5.3 仿真结果及分析

根据节点通信范围的不同共设有 5 种仿真场景，在每种仿真场景下分别运行 ERCES、ARER、ER-HELLO、ER-IMEP 路由算法；每组实验分别进行 4 次，实验结果取平均值；然后比较分析 4 种算法的归一化控制开销、数据分组平均端到端时延等 5 方面性能。

1) 归一化控制开销

从图 4 可看出，ERCES 算法的归一化控制开销在每个场景中均低于 ER-IMEP 算法及其改进算法 ER-HELLO、ARER，而且随着节点通信范围的增加，从 0.89 下降到 0.82。ERCES 算法能够减少归一化控制开销主要原因是通过跨层动态调整 HELLO 分组发送计时起点，减少了不必要 HELLO 分组；而控制开销随节点通信范围增大而降低的原因，则在于大的通信范围能产生更多的通信链路，进一步抑制 HELLO 分组的发送。

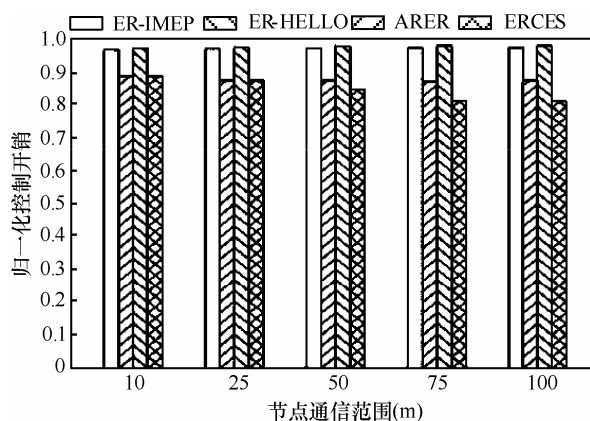


图 4 归一化控制开销比较

2) 数据分组平均端到端时延

图 5 显示，与 ARER 等算法相比，ERCES 算法能够减小分组平均端到端时延 11.3% ($R=100$ m:

(46.959-41.673)/46.959≈0.113)~54%(R=25 m: (156.5-72.024)/156.5≈0.54), 产生这个结果的原因主要有三方面: (a) ERCES 使用跨层信息共享的方式快速感知相遇节点, 缩短了相遇节点感知时延; (b) 广播新产生的数据分组, 加快了数据分组的传播过程; (c) 优先发送目的节点为相遇节点的数据分组, 对分组时延有降低作用。

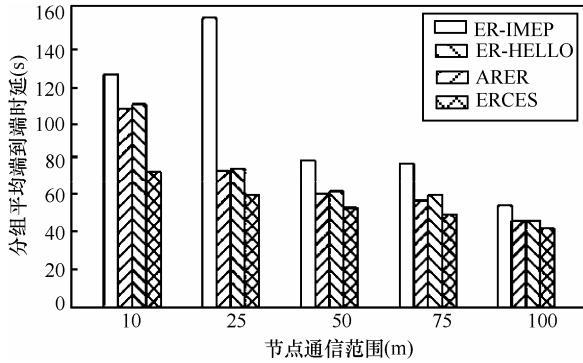


图 5 分组平均端到端时延比较

3) 节点平均缓存分组数

由图 6 可知, ERCES 算法中节点的平均缓存分组数低于其他 3 种算法, 其原因在于 ERCES 算法借用 SV 分组删除了节点缓存中已到达目的节点的数据分组。ARER 算法只在节点缓存空间受限的情况下才对缓存进行处理, 所以与另外 2 种算法缓存的分组数相近。

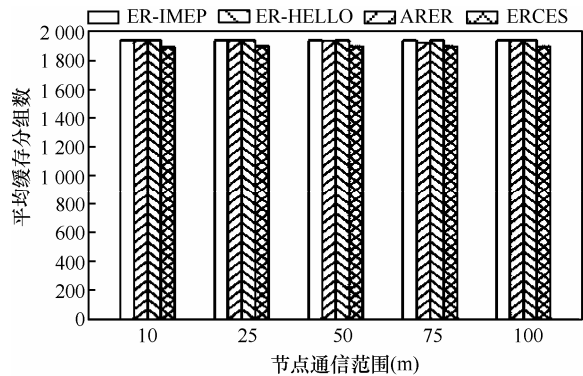


图 6 节点平均缓存分组数比较

4) 相遇节点平均感知时间

相遇节点感知时间与选择的 HELLO 分组发送周期、相遇时间间隔阈值等因素有关。如图 7 所示, ERCES 算法的相遇节点平均感知时间在每个场景中均低于其他 3 种算法, 它至少减少了 16.6%(R=10 m: (1.401-1.168)/1.401≈0.166) 的感知时间, 其主要原因是 ERCES 算法采用跨层信息共享的方式使网络

层更快地对节点相遇事件做出反应, 从而降低了相遇节点感知耗时。

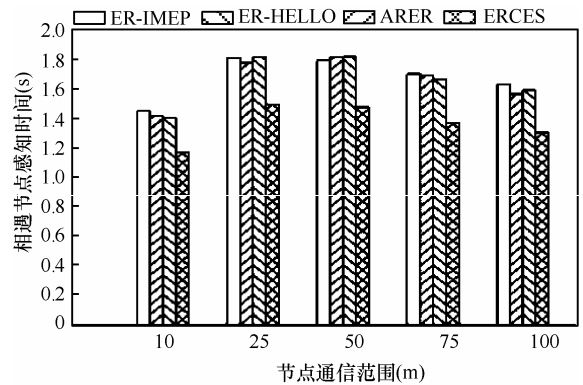


图 7 平均相遇节点感知时间比较

5) 发送的 HELLO 分组数

如图 8 所示, 在 ERCES 算法中节点发送的 HELLO 分组数明显小于其他 3 种算法, 这主要是由于它采用了动态自适应的 HELLO 分组发送机制, 从而减少了不必要的 HELLO 分组发送, 减少幅度为 13.6%(R=10 m)~44.3%(R=100 m)。

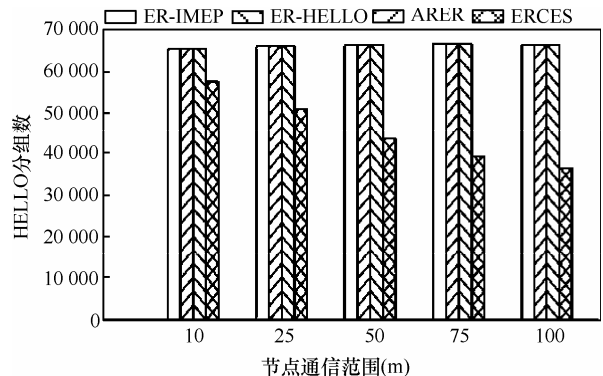


图 8 节点发送的 HELLO 分组数比较

6) 数据分组传送成功率

从表 2 可以看出, ERCES 算法与其他 3 种算法一样, 在 5 个场景中的数据分组传送成功率均达到了 100%, 这说明它保持了数据传输的高可靠性。

表 2 数据分组传送成功率比较

通信范围/m	数据分组传送成功率/%			
	ER-IMEP	ER-HELLO	ARER	ERCES
10	100	100	100	100
25	100	100	100	100
50	100	100	100	100
75	100	100	100	100
100	100	100	100	100

6 结束语

本文针对现有基于 epidemic 机制的机会网络路由算法在相遇节点感知和数据分组交换过程中存在冗余的问题,提出了采用跨层感知思路的 ERCES 路由算法加以解决,理论分析和仿真结果显示 ERCES 算法较经典的 ER 算法及其多个改进版本具有更低的控制开销和数据分组时延,从而提高了基于 epidemic 机制的机会网络路由算法的可用性和用户体验,有助于推动机会网络路由相关研究和应用的深入开展。在未来研究中,将以 ERCES 算法为基础,设计跨层节能的路由算法,构建绿色的机会网络^[18]。

参考文献:

- [1] STAVROULAKI V, TSAGKARIS K, LOGOTHETIS M, *et al.* Opportunistic networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(3):52-59.
- [2] 熊永平, 孙利民, 牛建伟等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, *et al.* Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):124-137.
- [3] 叶晖, 陈志刚, 赵明. ON-CRP: 机会网络缓存替换策略研究[J]. 通信学报, 2010, 31(5):98-107.
YE H, CHEN Z G, ZHAO M. ON-CRP: cache replacement policy for opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(5): 98-107.
- [4] 刘乔寿, 周建二, 张普宁. 机会网络中基于消息副本数量的自适应缓存管理策略[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 23(4): 394-399.
LIU Q S, ZHOU J E, ZHANG P N. Adaptive cache management method for opportunistic network based on number of message copies[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2012, 23(4):394-399.
- [5] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, *et al.* Maxprop: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[A]. The 25th IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Washington DC, USA, 2006. 1-11.
- [6] BURNS B, BROCK O, LEVINE B N. Mv routing and capacity building in disruption tolerant networks[A]. The 24th Annual Joint Conference of Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. Miami, USA, 2005. 398-408.
- [7] JATHAR R, GUPTA A. Probabilistic routing using contact sequencing in delay tolerant networks[A]. 2010 the Second International Conference on Communication Systems and Networks[C]. Bangalore, India, 2010.1-10.
- [8] KO H, OH S, KIM C. Adaptive, asynchronous rendezvous protocol for opportunistic networks[J]. Journal of Electronic Letters, 2012, 48(8): 462-464.
- [9] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks[R]. 2000.
- [10] MATSUADA T, TAKINE T. (p, q) -Epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5):783-793.
- [11] TOWER J P, LITTLE T D C. A proposed scheme for epidemic routing with active curing for opportunistic networks[A]. The 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops[C]. Okinawa, Japan, 2008. 1696-1701.
- [12] WANG X, SHU Y T, JIN Z G, *et al.* Adaptive randomized epidemic routing for disruption tolerant networks[A]. The 5th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Networks[C]. Wu Yi Mountain, China, 2009. 424-429.
- [13] 任智, 黄勇, 陈前斌. 基于分组索引增量交换的机会网络高效低时延路由算法[J]. 计算机学报, 2010, 33(9):1634-1642.
REN Z, HUANG Y, CHEN Q B. An efficient low-delay routing algorithm for opportunistic networks based on exchange of increments in packet indexes[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9):1634-1642.
- [14] DEMERS A, GREENE D, HAUSER C, *et al.* Epidemic algorithms for replicated database maintenance[A]. The 6th Symposium on Principles of Distributed Computing[C]. British Columbia, Canada, 1987.8-32.
- [15] 任智, 陈前斌, 黄勇. 机会网络中基于跨层触发的相遇节点快速感知方法[P]. 中国发明专利, 201010042051.2, 2010.
REN Z, CHEN Q B, HUNAG Y. A Fast Approach for Sensing Encountered Nodes in Opportunistic Networks Based on Cross-Layer Triggering[P]. China Invention Patent, 201010042051.2, 2010.
- [16] CORSON M S, PAPADEMTRIQU S, PAPADEMTRIQU P, *et al.* An internet MANET encapsulation protocol (IMEP) specification[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-imep-spec-00>, 2011.
- [17] GROSSGLAUSER M, TSE D N C. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4):477-486.
- [18] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4):593-612.
LIN C, TIAN Y, YAO M. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4):593-612.

作者简介:



任智(1971-), 男, 四川内江人, 博士后, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为宽带无线移动通信网络及网络编码。

索建伟(1987-), 男, 河南林州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为机会网络路由协议。

陈红(1987-), 男, 安徽六安人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为机会网络的跨层设计路由协议。

徐中浩(1987-), 男, 湖北孝感人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线多跳网络路由算法。

陈前斌(1967-), 男, 四川南充人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络。