

# 基于分组索引增量交换的机会网络 高效低时延路由算法

任 智 黄 勇 陈前斌

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘 要** 基于 Epidemic 机制的路由算法为机会网络提供了一类可靠的数据传送方式,但在相遇节点感知和分组交换的操作中存在冗余,导致开销和时延增加;对此,作者提出一种基于分组索引增量交换的机会网络路由算法——ERBEI,在分组索引的交换过程中只传递增量信息,并借助 Request 消息从节点缓存中删除已到达目的节点的分组,同时在相遇节点感知过程中只使用 Hello 消息,且优先发送位于最后 1 跳的数据分组,从而减少开销、降低分组时延.理论分析和仿真结果说明,与经典的 Epidemic 路由算法和它的一种改进算法 ARER 相比,ERBEI 算法在控制开销、分组端到端时延、存储空间占用等方面的性能得到整体提升.

**关键词** 机会网络;路由算法;分组索引;增量;交换

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2010.01634

## An Efficient Low-Delay Routing Algorithm for Opportunistic Networks Based on Exchange of Increments in Packet Indexes

REN Zhi HUANG Yong CHEN Qian-Bin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology of Chongqing, Chongqing 400065)

**Abstract** Epidemic-based routing algorithms can reliably transmit data in opportunistic networks. However, they have some redundant control overhead in sensing encountered nodes and exchanging data packets. To address the issue this paper proposes ERBEI (Efficient Routing Based on Exchange of Increments of packet indexes), an efficient low-delay routing algorithm. ERBEI transmits only the increments of packet indexes in the process of packet exchange, deletes the packets reaching destinations from nodes' memory, utilizes only the Hello messages to sense the encountered nodes, and sends the packets approaching their destinations firstly. Theoretical analysis and simulation results show that ERBEI outperforms the classical epidemic routing algorithm and one of its present improvements in the terms of control overhead, end-to-end delay, and memory overhead.

**Keywords** opportunistic networks; routing algorithms; packet indexes; increments; exchange

## 1 引言

机会网络(opportunistic networks, oppnets)<sup>[1-2]</sup>是一种不需要在源节点和目的节点之间存在完整连通路程、利用节点移动带来的相遇机会实现通信的时延和断裂可容忍的自组织网络. 机会网络在运行中对连通性没有要求,更贴近自组网的实际应用状况,对于实现未来普适计算(ubiquitous computing)<sup>[3]</sup>具有重大影响,因此近年来引起了越来越多的关注,已成为移动 ad hoc 网络(Mobile Ad-hoc NETworks, MANETs)<sup>[4]</sup>技术的一个重要发展方向,在网络环境相对较为苛刻的野生动物监测、偏远地区 Internet 接入、星际互联网和车载传感信息系统等方面具有广泛的应用前景<sup>[5]</sup>.

机会网络中拓扑连通和端到端路径存在的不确定性,给其路由算法的设计带来挑战. 为了适应机会网络间断、部分连接的特点,人们设计了多种路由算法<sup>[6-8]</sup>,其中研究和应用较为广泛的是基于 Epidemic 机制的路由算法<sup>[9-13]</sup>,它们采用“存储—携带—转发”分组的方式和向相遇节点扩散信息的 Epidemic 机制<sup>[14]</sup>,在无需网络拓扑信息帮助的情况下传送数据. Epidemic 机制通过在网络中注入数据分组的多个副本来保证其可靠传输,实质上是泛洪机制的一种变形<sup>[15]</sup>;在该机制中,节点存储并携带着分组一起运动,与另一个节点相遇时,双方会交换彼此所存储数据分组的索引信息,进而交换彼此所没有的分组;通过分组交换,数据分组逐步在网络中扩散,直至最后达到目的节点. 虽然近年来基于 Epidemic 机制的路由算法一直在演进,但现有算法在相遇节点感知和分组交换的操作中仍然存在冗余,导致了通信开销、存储开销和分组时延的增加,本文针对这个问题提出一种基于索引增量交换的路由算法,通过缩减控制分组的数量和大小、节点缓存管理、最后 1 跳数据分组优先发送等方法,减少路由开销,降低分组端到端时延并减轻节点存储负担.

本文第 2 节介绍相关研究工作;第 3 节给出数学模型并描述问题;第 4 节提出并详述基于索引增量交换的高效低时延路由算法;第 5 节对所提算法进行理论和仿真分析;最后第 6 节给出结论并简介未来工作.

## 2 相关工作

Epidemic 机制最初由 Demers 等提出<sup>[14]</sup>,用于

网络中不同节点的数据库信息的管理和维护. Vahdat 等<sup>[9]</sup>结合机会网络拓扑间断连接的特点改进原有的 Epidemic 机制,提出了 Epidemic 路由算法,以 IMEP(Internet MANET Encapsulation Protocol)协议<sup>[16]</sup>作为支撑的邻居节点发现机制,采用“存储—携带—转发”的分组处理方式和分组索引及数据分组的交换机制,能够在机会网络中可靠地传输数据且时延较小. Ramanathan 等<sup>[10]</sup>提出了 Prioritized Epidemic 路由算法,以 Epidemic 路由算法为基础,利用计算出的路径开销对节点存储的数据消息划分优先级,并根据优先级对数据消息采取不同的删除和传送策略,通过抛弃相对无用的消息降低网络负载. Takahiro 等设计了  $(p, q)$ -Epidemic 路由算法<sup>[11]</sup>,根据网络状态综合使用 2-Hop 转发和传统的 Epidemic 路由算法,并采用一种被称为“VACCINE”的机制<sup>[17]</sup>通过广播控制分组来消除节点缓存中已到达目的节点的分组,减少存储开销. Wang Xin 等<sup>[12]</sup>提出了 ARER(Adaptive Randomized Epidemic Routing),一种自适应随机化的 Epidemic 路由算法,使用表达式  $W_{ij} = C_1 \cdot R_i(T_s) + C_2 \cdot p_{ij} + C_3 \cdot TTL_{ij}$  计算数据分组  $i$  经历了  $j$  跳传递后的权值(其中  $R_i(T_s)$  为复制密度,  $p_{ij}$  为转发概率,  $TTL_{ij}$  为生存时间,  $C_1, C_2, C_3$  是预设常数),并根据权值在转发和删除过程中对数据分组排序以提高时延等性能,同时在 Hello 消息中携带已到达目的节点的分组的信息供相遇节点清理缓存,但加长周期性的 Hello 消息会带来额外的开销. Li Feng 和 Wu Jie<sup>[13]</sup>将社团结构探测功能加入传统的 Epidemic 路由算法,用本地信息检测社团结构并加以利用从而提高数据分组转发效率,然而社团结构的差异会对性能提升造成影响. 由上可知,基于 Epidemic 机制的现有路由算法在相遇节点感知、分组交换和缓存管理等环节仍存在冗余开销,有进一步研究改进的需要.

## 3 模型与问题描述

### 3.1 数学模型

机会网络拓扑的连通和端到端路径的存在都具有不确定性,因此在数学模型方面与传统的多跳无线网络有所不同,作出定义如下.

**定义 1(网络模型).** 机会网络的数学模型为  $G=(V, E)$ ;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  $E=\emptyset \cup \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,  $e_m$  表示网络中第  $m$  条链路,

$1 \leq m \leq n(n-1)$ .

**定义 2**(路由模型). 用  $\{e_i, (t_{si}, t_{ei})\}$ ,  $1 \leq i \leq n(n-1)$  表示 1 条链路,  $t_{si}$ 、 $t_{ei}$  分别表示该链路的生成和终止时间,  $t_{ei} > t_{si}$ . 机会网络路由的数学模型为: 在机会网络中, 寻找至少 1 个在逻辑上有序相连的链路组合  $\sum \{e_i, (t_{si}, t_{ei})\}$ , 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 1 条链路的生成时间  $t_s$  必须小于后 1 条链路的终止时间  $t_e$ , 即  $t_{si} < t_{e(i+1)}$ .

### 3.2 问题描述

由于网络条件的改变, 机会网络路由问题已经演化为如何将数据从源节点成功地传送到目的节点, 而不仅仅是如何找到符合要求的最优路径. 为此, 作出如下假设.

**假设 1.** 在足够长的网络运行时间内, 源和目的节点之间端到端的有序链路组合客观存在.

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的有序链路组合(可称之为“虚拟路径”)都客观存在, 这样可以保证数据分组在正常的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和数据转发能力.

本文假设机会网络中的节点具有足够能力来处理 and 转发数据, 系统性能的瓶颈主要存在于传输链路上, 受路由结构和路由控制策略的影响. 机会网络路由算法的主要目标就是利用网络中节点的处理能力来选择合理的转发方式, 让数据通信能够顺利进行, 进而提高网络传输性能.

**假设 3.** 机会网络节点的物理层采用全向天线, 天线增益和无线传播介质均是各向同性的.

无线传播中各向同性的假设使网络中的链路呈现双向的特点, 从而避免专门考虑单向信道和链路的影响, 有利于突出路由算法设计的重点.

**假设 4.** 机会网络中每个节点的网络层都了解其它节点的“网络层地址—MAC 地址”对应关系.

基于上述假设, 本文所提路由算法处理的主要问题是利用已有网络条件, 通过相遇节点感知和分组交换机制的设计和优化, 解决现有基于 Epidemic 机制的路由算法存在的开销冗余问题, 提高网络路由的性能.

### 3.3 数据分组传送成功概率

关于机会网络路由算法的端到端数据分组传送成功概率, 有如下定理.

**定理 1.** 在网络容量和节点存储空间足够大

的情况下, 采用经典 Epidemic 机制的机会网络路由算法, 具有最大的数据分组传送成功概率.

证明. 设节点  $i$  遇到目的节点  $d$  的概率为  $P_i$ ; 因为网络容量和节点存储空间足够大, 根据经典 Epidemic 机制借助每一个相遇节点传送数据的原理, 数据分组从源节点  $s$  传送到目的节点  $d$  的概率为

$$P_E = 1 - \prod_{i \in V, i \neq s, d} (1 - P_i).$$

除了采用经典 Epidemic 机制的路由算法外, 机会网络中还有其它类型的冗余算法(除基于网络编码和擦除编码的算法之外)、基于效用的算法、冗余混合算法和基于主动运动的算法<sup>[5]</sup>, 这些算法采用不同的机制对参与数据分组转发的节点进行了限制, 因此它们的转发节点集合  $F$  是  $V$  的一个子集,  $F \subset V$ , 它们的端到端数据分组传送成功概率为

$$P_O = 1 - \prod_{i \in F, i \neq s, d; F \subset V} (1 - P_i),$$

因为  $0 \leq P_i \leq 1$ , 所以  $0 \leq 1 - P_i \leq 1$ , 有

$$\prod_{i \in V, i \neq s, d} (1 - P_i) < \prod_{i \in F, i \neq s, d; F \subset V} (1 - P_i) \Rightarrow P_E \geq P_O.$$

基于网络编码的冗余算法<sup>[18]</sup>的主要思路是编码多个待转发信息以减少传输次数从而降低开销; 如果它以概率 1 转发已编码信息, 因未限制转发节点, 其数据分组传送成功概率  $P_N$  与经典 Epidemic 机制的数据分组传送成功概率相等, 即

$$P_N = P_E = 1 - \prod_{i \in V, i \neq s, d} (1 - P_i).$$

如果以概率  $p_n$ :  $0 \leq p_n \leq 1$  转发已编码信息, 则转发节点集是  $V$  的一个子集, 因此其数据分组传送成功概率等于上文所述的  $P_O$ , 即

$$P_N = P_O = 1 - \prod_{i \in F, i \neq s, d; F \subset V} (1 - P_i),$$

于是有  $P_E \geq P_N$ .

在擦除编码算法中, 原始数据被分成  $m$  块并被编成  $k$  个小消息, 目的节点只需收到任意  $m \times (1 + \epsilon)$  个小消息就可以重建原始数据. 当大于  $k - m \times (1 + \epsilon)$  个小消息传送失败时, 数据传送便会失败. 设任意  $j$  个小消息经过的中继节点集合为  $J$ ,  $j > k - m \times (1 + \epsilon)$ , 显然  $J \subset V$ ; 这些消息同时传送失败的概率为

$$P_F = \prod_{i \in J, i \neq s, d} (1 - P_i),$$

所以数据传送成功的概率为

$$P_C = 1 - P_F = 1 - \prod_{i \in J, i \neq s, d} (1 - P_i),$$

因为  $J \subset V$ , 所以  $\prod_{i \in V, i \neq s, d} (1 - P_i) < \prod_{i \in J, i \neq s, d} (1 - P_i)$ .

因此同样有  $P_E \geq P_C$ .

证毕.

上述定理表明了经典 Epidemic 机制借助每一个相遇节点传送数据的方式在数据分组转发成功率性能方面具有优势, 因此我们在设计新路由算法时采用这种方式以保障数据传送的可靠性.

## 4 基于分组索引增量交换的高效低时延路由算法

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分组交换的操作中存在冗余从而影响开销和时延等性能的问题, 现提出基于分组索引增量的高效低时延路由算法——ERBEI (Efficient Routing Based on Exchange of Increments of packet indexes). ERBEI 算法采用“存储—携带—转发”方式, 对相遇节点感知和分组交换机制进行了重新设计, 从而达到减少开销和降低时延的效果.

**定义 3 (消息).** “消息”(message) 指根据路由算法的原理, 由节点的网络层发出的、能够完成一定路由功能的控制分组. 如 Epidemic 路由算法使用了 Hello、Echo、SV (Summary Vector, 用于装载分组索引信息) 和 Request 等消息.

**定义 4 (分组索引).** “分组索引”(packet index) 指能够唯一表示一个数据分组的标志性信息. 如本文仿真实验中用源节点地址和一个渐增的序列号作为一个数据分组的索引.

**定义 5 (交换).** “交换”(exchange) 指在节点之间相互、双向传递结构或意义相同的信息.

### 4.1 算法操作

ERBEI 算法包括两个交替出现的阶段内的操作.

#### 节点未相遇阶段

ERBEI 算法从节点的网络层在 1 跳范围内周期性地广播本地 Hello 消息, 该消息中包括节点的网络层地址.

#### 节点相遇阶段

1. 感知节点相遇. 一个节点的网络层可以通过 2 种方式判断出与其它节点的相遇: ① 收到对方节点广播的 Hello 消息, 且前后两次收到 Hello 消息的时间间隔大于设置的阈值; ② 收到对方节点发来的目的地为自己的数据分组, 对于这种情况, 节点的 MAC 层会将所收帧的源 MAC 地址跨层共享给网络层, 网络层根据所了解的“网络层地址—MAC 地址”对应关系查出对方节点的网络层地址并存储.

2. 确定与另一个节点相遇后, 节点首先会从数据分组缓存中搜索出目的地为该节点的分组并发送给它. 如果没有相应的分组, 则直接执行步 3.

3. 节点检查在上一次和该相遇节点交换分组之后是否

缓存了新的分组, 若是, 则将新分组的索引信息装入 SV 消息发送给对方, 否则, 不发送 SV 消息; 发送 SV 消息之后, 节点记录最新的分组在缓存中的位置, 以便于下次遇到该节点时只发送新存入分组的索引.

4. 收到对方节点发来的 SV 消息, 节点会通过比较确定自己没有的分组和已经到达目的地的分组, 并将这些分组的索引信息装在 Request 消息中发给对方.

5. 收到对方节点发来的 Request 消息, 节点会将对方请求发送的数据分组发给对方; 同时, 将已送达目的地的分组从缓存中删掉, 但保存它们的索引信息以供更新其它节点的分组缓存.

6. 如果 {收到 Hello 消息}  $\cap$  {前后两次收到 Hello 消息的时间间隔大于阈值}  $\cap$  {没有数据分组和 SV 消息要发给对方}, 则广播一个 Hello 消息告知对方自己的存在, 否则不进行任何操作.

### 4.2 ERBEI 算法中的新机制

#### (1) 分组索引增量交换

Epidemic 路由算法的控制开销来自于 Hello、Echo、SV 和 Request 等控制消息, Hello 和 Echo 消息的尺寸小于 SV 消息的尺寸, 且 Request 消息的数量和尺寸均不大于对应的 SV 消息的数量和尺寸, 这些情况意味着分组索引交换的开销 (即 SV 消息的开销) 在路由开销中具有重要作用. 表 1 是按照文献[9]中的仿真设置、使用比特数统计的 Epidemic 路由算法的分组索引交换开销占路由总开销的比重. 从该表的数据可看出, 各场景中分组索引交换开销所占比重不低于 97.3%, 说明了这项开销是路由总开销的主要组成部分, 因此减小它有利于明显降低路由总开销.

表 1 Epidemic 路由总开销中分组索引交换开销所占比重

节点通信范围/m	索引交换开销占比/%
10	97.3
25	97.5
50	97.6
75	97.7
100	97.7

我们通过研究发现, 节点收到的每一个 SV 消息中, 只有和上次收到的 SV 消息的内容之差, 即分组索引的增量, 才是有用的信息. 根据这个原理, 在 ERBEI 算法中我们进行了如下设计: 节点向另一个节点发送 SV 消息时记录下当前最新存储的分组的位置; 如果下一次遇到相同节点, 则在新的 SV 消息中只装载上次发送 SV 消息之后新存入分组的信息. 这样可以只传送分组索引的增量, 从而缩短 SV 消息的长度并减少对方节点比较运算的计算量, 降低节点资源和通信的开销.

## (2) 数据分组发送顺序优化

一个节点与其它节点相遇,会立即将目的地为该节点的数据分组发给对方,然后才发送 SV 消息,进行后续的 SV 消息和数据分组交换.这样能够尽可能地利用有限的节点相遇时间传递数据分组,既有助于提高分组传送成功率又能降低分组端到端传输时延.

## (3) 节点数据分组缓存按需管理

从缓存中删除已经到达目的节点的分组是节点管理缓存和减少存储开销的重要内容.目前在发布已达目的节点分组的信息方面,已有广播<sup>[11,17]</sup>和 Hello 消息携带<sup>[12]</sup>等方法,但广播的全局性和 Hello 消息的周期性会使控制开销增加.

ERBEI 算法采用一种按需携带的方式来发布已达目的节点分组的信息,不需要专门的控制分组,也避免了全局广播和周期性发送的问题,具体方式如下:一个节点成功收到相遇节点发来的目的地为自己的数据分组后,将在其后的 Request 消息中将这些分组的索引发给对方,对方节点收到相关信息后删除这些分组,但保留它们的索引信息以备更新其它节点的缓存;一个节点收到另一节点发送的 SV 消息,会进行分组索引信息比对,包括本节点没有的分组和已达目的地的分组,如果发现对方节点仍存有已到达目的地的分组,它会在 Request 消息中告知对方.这样既能节省节点的存储空间,又能减少控制信息的无谓传递.

## (4) 节点相遇感知

ERBEI 算法用周期性 Hello 消息的本地广播取代原来负责相遇节点感知的 IMEP 协议<sup>[16]</sup>,如果 {收到 Hello 消息} ∩ {前后两次收到 Hello 消息的时间间隔大于阈值},便判定与其它节点相遇;这样不再使用 Echo 消息,在不影响相遇节点发现功能的前提下简化了操作,减少了开销.

## 4.3 重要参数值的确定

### (1) Hello 消息周期

Hello 消息周期值的设置需要满足及时发现相遇节点和控制开销之间的平衡.综合考虑节点相遇时的相对位置、角度和运动速度,设置 Hello 消息发送周期如下:

$$T_{\text{Hello}} = \left\lfloor \frac{\sqrt{3} \times R}{\bar{v}} \right\rfloor \quad (1)$$

其中,  $R$  和  $\bar{v}$  分别表示节点的通信范围和节点相遇时的平均相对运动速率.在后文的仿真实验中,为了尽可能在相同的条件下考察算法的性能,统一设置  $T_{\text{Hello}}$  值如下 ( $R_{\min} = 10\text{m}$ ,  $\bar{v} = (1+19)/2 = 10\text{m/s}$ ):

$$T_{\text{Hello}} = \left\lfloor \frac{\sqrt{3} \times R_{\min}}{\bar{v}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\sqrt{3} \times 10}{10} \right\rfloor = 2\text{s}.$$

### (2) 相遇时间间隔阈值

如果收到对方节点广播的 Hello 消息,需要判断是再次相遇还是上次相遇的不间断延续,以确定是否启动相遇处理过程,因此设置 1 个相遇时间间隔阈值用于作该判断:记录每次收到 Hello 消息的时间;如果上次和此次记录的时间之差大于阈值,则认为再次相遇,启动相关处理流程,否则无操作.该阈值与节点通信范围和运动模型有关,设置时需要考虑及时感知再次相遇和控制开销之间的平衡,阈值  $T_{\text{th}}$  用下式设置:

$$T_{\text{th}} = \left\lfloor \frac{R}{\bar{v}} \right\rfloor \quad (2)$$

在后文的仿真实验中,除非专门考察  $T_{\text{th}}$  的影响,统一设置  $T_{\text{th}}$  值如下 ( $R_{\max} = 100\text{m}$ ,  $\bar{v} = 10\text{m/s}$ ):

$$T_{\text{th}} = \left\lfloor \frac{R_{\max}}{\bar{v}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{100}{10} \right\rfloor = 10\text{s}.$$

## 5 性能分析

### 5.1 理论分析

#### (1) 归一化控制开销

归一化控制开销用于评价算法的效率,二者呈负相关关系,即归一化控制开销越小,算法效率越高,反之亦然.设  $C_E$ 、 $C_H$  分别表示经典 Epidemic 路由算法和 ERBEI 算法的归一化控制开销,有

$$C_E = N_{EC} / N_{ED};$$

$$C_H = N_{HC} / N_{HD}.$$

其中,  $N_{EC}$ 、 $N_{HC}$ 、 $N_{ED}$ 、 $N_{HD}$  分别表示在两种算法中所有节点发送的控制分组包含的比特数和所有到达目的节点的数据分组包含的比特数.在相同的条件下,ERBEI 算法不发送 Echo 消息,并能够减少 SV 消息的数量且缩短其长度,因此有  $N_{HC} < N_{EC}$ , 所以  $C_H < C_E$ , 即 ERBEI 算法具有更高的效率.

#### (2) 分组端到端时延

设  $t_E$ 、 $t_H$  分别为经典 Epidemic 路由算法和 ERBEI 算法的分组端到端时延,从算法原理可知:

$$t_E = \sum t_{EC} + \sum t_{EX};$$

$$t_H = \sum t_{HC} + \sum t_{HX},$$

其中,  $t_{EC}$ 、 $t_{EX}$ 、 $t_{HC}$ 、 $t_{HX}$  分别表示在分组携带和分组交换过程中消耗的时间;在分组送达目的节点的那一跳的传送过程中,由于 ERBEI 算法在发送数据分组之前不像 Epidemic 路由算法那样要先发送 Echo 消息和交换 SV 消息,而是首先发送数据分组,从而

省去了相应的时间开销, 所以有  $\sum t_{HX} < \sum t_{EX}$ , 在网络条件相同的情况下,  $\sum t_{HC} = \sum t_{EC}$ , 因此,  $t_H < t_E$ .

### (3) 节点平均缓存分组数

节点平均缓存分组数用于评价节点存储空间的使用情况, 用下式计算:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i \in V} S_i}{N} \quad (3)$$

其中,  $S_i$  表示节点  $i$  缓存的分组数,  $N$  为节点个数. ERBEI 算法通过缓存清理过程减少缓存中的分组, 因此与经典 Epidemic 路由算法相比, 有

$$\sum_{i \in V} S_i \downarrow, \Rightarrow \bar{S} \downarrow.$$

### (4) 计算复杂度

两种算法的时间复杂度在初始化后都为  $O(d)$ ,  $d$  表示网络直径; 存储复杂度都为  $O(N)$ ,  $N$  表示网络中的节点总数; 通信复杂度在初始化后都为  $O(N)$ .

## 5.2 仿真分析

取经典的 Epidemic 路由算法和它的一种较新改进算法——ARER 作为比较对象, 在相同的仿真条件下比较分析它们和 ERBEI 算法的控制开销、时延、分组缓存使用等性能.

### (1) 仿真设置

仿真的软硬件环境是微机和 Windows XP 操作系统, 仿真软件平台是 OPNET. 50 个可自由移动的节点随机均匀分布在  $1500\text{m} \times 300\text{m}$  的矩形区域内, 移动模型为 Random Waypoint 模型, 为了避免节点速度最终趋向于 0, 速率随机均匀取值区间设为  $[1, 19](\text{m/s})^{[19-20]}$ , 运动间歇时间  $pause\_time = 0\text{s}$ ; 因为节点通信范围  $R > 100\text{m}$  时节点的度  $> 3.49$ , 网络趋于全连通, 为形成机会性的网络环境, 设置  $R \in \{10, 25, 50, 75, 100\}(\text{m})^{[9]}$ ; 节点 MAC 层和物理层采用 IEEE802.11a 标准, 最大数据速率  $V_{\max} = 54\text{Mbps}$ ; 节点通信范围及相关参数取值如表 2 所示.

表 2 不同节点通信范围  $R$  的参数设置

节点通信范围/m	发射功率/W	接收功率门限/dBm
100	0.0049	-79.9
75	0.0028	-79.9
50	0.0012	-79.9
25	0.0003	-79.9
10	$4.818 \times 10^{-5}$	-79.9

随机选取 45 个节点作为源和目的节点, 每个节点随机选择时间向各目的节点发送 1 个长度为  $8\text{kb}$  的数据分组, 各数据分组发送间隔为  $1\text{s}$ , 从仿真时

刻  $5\text{s}$  开始发送, 至  $1984\text{s}$  发送完毕, 共发送  $45 \times 44 = 1980$  个数据分组; 网络层分组缓存空间的大小  $M = 8\text{kb} \times 2000 = 16000\text{kb}$ . 按照前文的计算结果, Hello 消息发送周期 =  $2\text{s}$ , 相遇时间间隔阈值 =  $10\text{s}$ ; 仿真时间为  $4000\text{s}$ , 在仿真结束或 1980 个分组全部到达目的节点时统计仿真数据. 每个仿真实验做 4 次, 随机种子  $seed \in \{128, 130, 132, 134\}$ , 统计结果取平均值.

### (2) 仿真结果及分析

#### ① 归一化控制开销

通过累加所有节点发出的 Hello、Echo(有则计算)、SV 和 Request 等控制消息包含的比特数并除以达到目的节点数据分组的比特数来计算归一化控制开销; 其中, Hello 和 Echo 消息的长度是固定的, 而 SV 和 Request 消息的长度则会动态变化, 尤其当需要发送的数据分组索引量大时, 长度会显著增加; 如果它们的长度超过了分组发送的长度阈值  $64\text{KB}$ , 在仿真中则分为多个消息发送.

图 1 显示, 与 Epidemic 路由算法和 ARER 算法相比, ERBEI 算法能够减少归一化控制开销  $82.7\%(R=10\text{m}) \sim 94.9\%(R=100\text{m})$ , 因而具有更高的效率. 开销减少的原因主要来自于 Echo 消息的取消和 SV 消息在数量和长度上的缩减. 节点通信范围  $R$  较大时减耗效果更明显的原因在于  $R$  越大, 节点相遇机会和相遇持续时间都会增大, 导致 Epidemic 和 ARER 算法中相应的操作和控制开销增加, 而 ERBEI 算法按需进行 SV 消息交换, 只有当索引增量存在时才发送 SV 消息, 因此能够有效避免相遇机会和时间增加的负面影响, 在  $R=100\text{m}$  时开销的下降幅度最大 ( $94.9\%$ ).

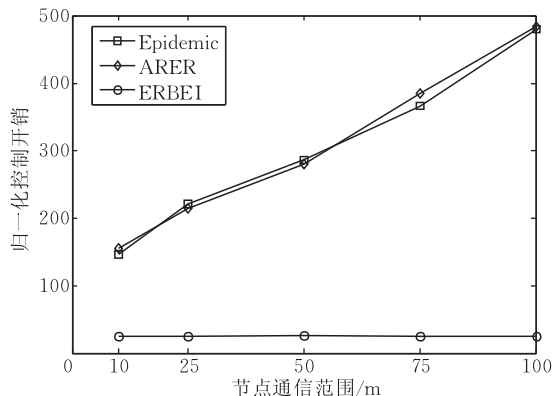


图 1 归一化控制开销比较

#### ② 分组平均端到端时延

数据分组的端到端时延包括分组在节点内存储并携带的时间和在节点之间传递的时间, 与分组所

经历的中继节点序列有关,涉及到节点通信范围、运动模型等因素。

从图 2 中可看出, ERBEI 算法的分组平均端到端时延在每个场景中均低于 Epidemic 路由算法,只是在少数场景中比 ARER 算法高. ERBEI 算法能够减小时延的原因主要有 3 个方面: (1) 优先发送数据分组, 减少了其等待时间; (2) 只交换分组索引的增量, 减少了控制消息交换的耗时; (3) 节点相遇感知过程中不使用 Echo 消息, 缩短了感知时延. 仿真结果还显示随着节点通信范围的增大, 3 种算法的平均时延在总体上都有下降的趋势, 这是由于节点通信范围的增大能够增加节点相遇机会从而有利于加快数据转发的缘故。

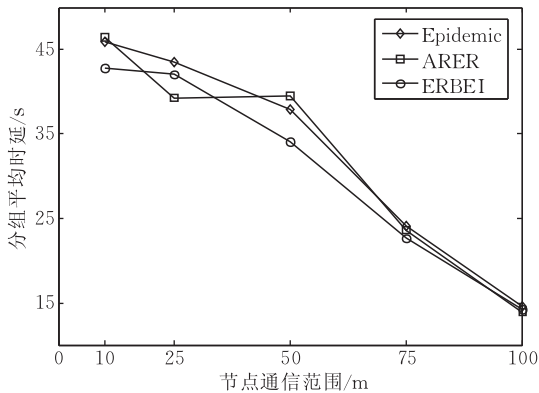


图 2 分组平均端到端时延比较

### ③ 节点平均缓存分组数

机会网络的节点需要携带缓存中的数据分组一起运动, 因此缓存分组数意味着储存开销, 数量越少越好, 它主要受到业务模型、缓存管理策略和数据分组传输状况的影响。

由于 ERBEI 算法进行了持续按需的节点缓存管理, 删除已达目的节点的数据分组, 因此节点缓存中的分组数明显小于另 2 种算法, 如图 3 所示, 节省的缓存空间在 81.4% ( $R=100\text{m}$ :  $(1898.360 -$

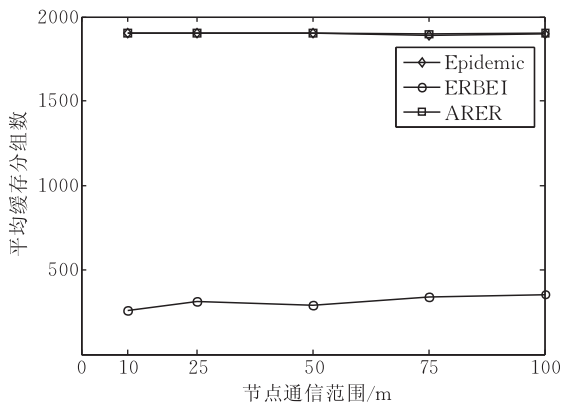


图 3 节点平均缓存分组数比较

$352.400)/1898.360 \approx 0.814$ ) 以上. ARER 算法也有管理缓存的设计, 但在节点缓存空间足够时不作处理, 因此缓存的分组数与 Epidemic 算法相近. 上述结果既说明了 ERBEI 算法缓存管理的有效性, 也说明了即使在存储空间足够时, 对节点缓存的管理同样有必要。

### ④ SV 消息平均尺寸

根据前文所述, 每次收发的 SV 消息中只传递有用的索引增量不会影响分组索引信息的发布. ERBEI 算法在 SV 消息中只装载分组索引的增量信息, 消息尺寸因而减小, 减小的幅度在 83.3% ( $R=10\text{m}$ )~94.5% ( $R=100\text{m}$ ) 之间, 如图 4 所示。

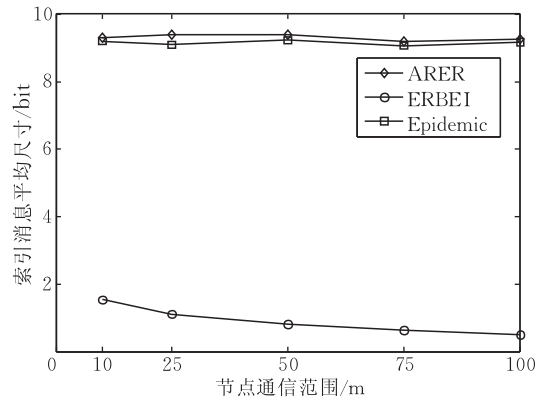


图 4 SV 消息平均尺寸比较

### ⑤ 其它性能

在节点通信范围  $R$  从 100m 到 10m 变化的 5 个场景中, ERBEI 算法的数据分组传送成功率、最大时延、最大与平均跳数等性能指标如表 3 所示。

表 3 ERBEI 算法的其它性能指标

节点通信范围/m	数据传送成功率/%	最大跳数	平均跳数	分组最大时延/s
100	100	23	6.067	93.843
75	100	19	5.224	136.559
50	100	14	3.721	138.884
25	100	8	2.792	223.948
10	100	7	2.880	203.708

表 3 中的数据显示, ERBEI 算法在 5 种节点通信范围的情况下均达到 100% 的数据分组传送成功率, 说明它具有稳定的可靠性. 最大跳数范围为 [7, 23], 平均跳数范围为 [2.792, 6.067], 二者在总体上随着节点通信范围的增大而增加. 分组最大时延总体上随节点通信范围的增加从 223.948s 下降到 93.843s, 主要原因是通信范围的变大增加了节点相遇的机会, 从而加速了数据分组的传递。

### ⑥ 相遇时间间隔阈值 $T_{th}$ 的影响

相遇时间间隔阈值  $T_{th}$  小, 能及时感知节点再

次相遇,但会增加重复操作的次数,引起控制开销增加,并导致无线信道中的信息增多,干扰加大; $T_{th}$ 大,控制开销和干扰会减少,但及时感知再次相遇的能力会降低.表 4 给出了  $R=50m$ (较为文献使用的典型值)<sup>[9]</sup>时  $T_{th}$ 对 ERBEI 算法性能的影响.

表 4  $T_{th}$ 值对 ERBEI 算法性能的影响

$T_{th}$	数据传送成功率/%	分组平均时延/s	归一化控制开销	平均缓存分组数	数据传送完成时间/s
0	100	28.369	25.398	344.460	2049.061
5	100	32.451	25.291	303.400	2053.651
10	100	34.033	25.366	292.020	2069.275
15	100	35.879	25.413	266.680	2088.383
20	100	39.980	25.340	282.020	2079.708

从表 4 可以看出,数据传送成功率保持在 100%,说明当  $R=50m$  时它对  $T_{th}$  值不敏感.随着  $T_{th}$  值从 0 增大到 20,分组平均时延从 28.369s 增加到 39.980s,平均缓存分组数从 344.460 减少到 282.020,数据传送完成时间则呈总体增加的趋势,分析其原因在于  $T_{th}$  值越小,相遇节点之间交换数据的机会就越多,于是分组平均时延和成功传送所有分组所需的时间都趋于减小,平均缓存分组数因节点收到分组数的增大而增加,但各指标的差距不算特别显著,在 29.04%(分组平均时延)和 1.88%(数据传送完成时间)之间.由于 ERBEI 算法只按需交换分组索引的增量,抑制了相遇次数的变化对控制开销的影响,因此归一化控制开销稳定在 25.3 左右,对  $T_{th}$  值的变化不敏感.

#### ⑦ 节点运动状况的影响

选择  $R=50m$ ,  $pause\_time$  在 {4000,2000,1000,500,250,0} 中取各值,分别对应节点从静止到持续运动的多种状况,获得 ERBEI 算法的性能参数如表 5 所示.

表 5 节点运动状况对 ERBEI 算法性能的影响

$Pause\_time$	数据传送成功率/%	分组平均/时延/s	归一化控制开销	平均缓存分组数
4000	99.545	314.074	12.259	938.800
2000	100	167.500	18.641	685.120
1000	100	128.127	20.136	580.660
500	100	81.836	22.887	445.720
250	100	58.501	23.997	389.720
0	100	34.033	25.366	292.020

节点运动性越强,相互之间相遇和通信的机会就越多,数据分组就更有可能、也更快地被传送到目的节点,所以分组的平均时延从 314.074s 递减到 34.033s,分组传送成功率从 99.545% 增加到 100%;控制开销有很大一部分是由于节点相遇时的

信息交换操作产生的,相遇机会的增加会导致开销的上升,因此归一化控制开销随着运动间歇时间的减少从 12.259 增加到 25.366;平均缓存分组数在内存管理策略的作用下,随着到达目的节点分组数的增加而下降,从 938.800 逐渐减小至 292.020,总存储空间(2000packets)的平均占用率约为 27.8%.

## 6 结束语


机会网络路由算法研究对于未来实现普适计算具有重要意义.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分组交换操作中存在冗余的问题,提出了一种基于分组索引增量交换的路由算法——ERBEI,通过在分组索引交换过程中只传递增量信息、从节点缓存中按需删除已到达目的节点的分组、在相遇节点感知过程中只使用 Hello 消息和优先发送位于最后 1 跳的数据分组等策略,达到减少开销、降低分组时延的效果,理论分析和仿真结果验证了 ERBEI 较经典的 Epidemic 路由算法和 ARER 算法具有更高效率、更低分组时延和更少的分组缓存占用.

在未来研究中,我们将以 ERBEI 算法为基础,通过跨层机制加强对物理层丰富的状态信息的利用,增强路由算法的拓扑感知和自适应能力,并引入能耗评测和节能机制,在提升路由性能的同时保护节点能量,延长网络寿命.

## 参 考 文 献

- [1] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Opportunistic networking: Data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(11): 134-141
- [2] Huang Chung-Ming, Lan Kun-chan, Tsai Chang-Zhou. A survey of opportunistic networks//Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Okinawa, Japan, 2008: 1672-1677
- [3] Kumar S. Challenges for ubiquitous computing//Proceedings of the 5th International Conference on Networking and Services 2009 (ICNS'09). Valencia, Spain, 2009: 526-535
- [4] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html> [EB/OL]. March, 2010
- [5] Xiong Yong-Ping, Sun Li-Min, Niu Jian-Wei, Liu Yan. Opportunistic networks. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137(in Chinese)  
(熊永平, 孙利民, 牛建伟, 刘燕. 机会网络. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137)
- [6] Chen Ling-Jyh, Yu Chen-Hung, Tseng Cheng-Long, Chu Hao-Hua, Chou Cheng-Fu. A content-centric framework for effective data dissemination in opportunistic networks. IEEE

- Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 761-772
- [7] Zhang Zhen-Sheng. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8(1): 24-37
- [8] Chen Hui, Fan Xiu-Mei, Shan Zhi-Guang. Forwarded history-based asynchronous routing for challenged networks and research of the number of relays. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(10): 1687-1694(in Chinese)  
(陈辉, 樊秀梅, 单志广. 受限网络中基于转发历史异步路由及中继数量研究. *计算机学报*, 2008, 31(10): 1687-1694)
- [9] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Duke University, Durham; Technical Report CS-200006, 2000
- [10] Ramanathan R, Hansen R, Basu P, Rosales-Hain R, Krishnan R. Prioritized epidemic routing for opportunistic networks//*Proceedings of the 1st ACM International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking*. San Juan, 2007: 62-66
- [11] Matsuda T, Takine T.  $(p, q)$ -epidemic routing for sparsely populated mobile ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(5): 783-793
- [12] Wang Xin, Shu Yan-Tai, Jin Zhi-Gang, Pan Qing-Fen, Lee Bu-Sung. Adaptive randomized epidemic routing for disruption tolerant networks//*Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*. Wu Yi Mountain, China, 2009: 424-429
- [13] Li Feng, Wu Jie. LocalCom: A community-based epidemic forwarding scheme in disruption-tolerant networks//*Proceedings of the 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. Rome, Italy, 2009: 1-9
- [14] Demers A, Greene D, Hauser C, Irish W, Larson J, Shenker S, Sturgis H, Swinehart D, Terry D. Epidemic algorithms for replicated database maintenance//*Proceedings of the 6th Symposium on Principles of Distributed Computing*. British Columbia, Canada, 1987: 1-12
- [15] Harras K A, Almeroth K C, Belding-Royer E M. Delay tolerant mobile networks (DTMNs): Controlled flooding in sparse mobile networks//*Proceedings of the International Federation for Information Processing (IFIP) Networking*. Ontario, Canada, 2005: 1180-1192
- [16] Corson M S, Papademetriou S, Papadopoulos P, Park V, Qayyum A. An internet MANET encapsulation protocol (IMEP) specification. draft-ietf-manet-imep-spec-01. txt, 1999
- [17] Haas Z, Small T. A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(1): 27-40
- [18] Widmer J, Boudec J L. Network coding for efficient communication in extreme networks//*Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking*. Pennsylvania, USA, 2005: 284-291
- [19] Yoon J, Liu M, Noble B. Random waypoint considered harmful//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2003*. San Francisco, USA, 2003: 1312-1321
- [20] Boudec J-Y L, Vojnovic M. The random trip model: Stability, stationary regime, and perfect simulation. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(6): 1153-1166



**REN Zhi**, born in 1971, Ph. D., professor (specially invited). His current research interests include broadband wireless networks and network coding.

**HUANG Yong**, born in 1985, M. S. candidate. His research interest is routing algorithms in opportunistic networks.

**CHEN Qian-Bin**, born in 1967, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include personal communications, multimedia information processing and transmission technology, next generation network technology, etc.

## Background

The study in this paper is about the efficiency and delay of epidemic-based routing algorithms, which belongs to the routing area of opportunistic networks. At present, the settlement of the routing issue in opportunistic networks is still imperfect in the world. Based on the present research work, the novel algorithm presented in this paper obviously decreases the control overhead in epidemic-based routing algorithms and the consumption of nodes' memory. In addition, the algorithm decreases the end-to-end delay of data packets. The study is supported by the following research project: National Natural Science Foundation of China (No. 60972068), Natural Science Foundation of Chongqing (No. 2009BB2085),

Chongqing Education Committee Science Research project (No. KJ090524), and Science Research Foundation of Chongqing University of Posts and Telecommunications (No. A2008-13). These projects devote themselves to improving the theory and technology of routing in wireless multi-hop networks including opportunistic networks. The authors have been studying the above issue for no less than eight years and published more than forty papers, as well as six patents. The achievement of this paper focuses on improving the performance of routing algorithms in opportunistic networks in terms of efficiency and delay.