

基于免疫信息 SV 捎带的机会网络低开销路由算法

任智, 陈葱, 曹亚楠, 彭晨, 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: 提出一种新的低开销路由算法——LRPI (low-overhead routing with piggybacked immunity information), 它包含以下 4 种新机制: 基于 SV (summary vector) 捎带的免疫信息存储和传送, 免疫信息跨层快速产生, 改进的 SV 交换, SV 自适应压缩。通过采用这些新机制, LRPI 算法不仅不需要专门的数据结构来存发免疫信息, 而且能够更快速地实现同样的免疫功能。理论分析和仿真结果表明, LRPI 算法在控制开销、节点缓存分组数和数据分组端到端时延等方面的性能均优于 Epidemic 路由算法和它的多个改进版本。

关键词: 机会网络; 路由算法; 免疫机制; 开销

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)10-0081-08

Low-overhead routing algorithm for opportunistic networks based on immunity information piggybacked by SV

REN Zhi, CHEN Cong, CAO Ya-nan, PENG Chen, CHEN Qian-bin

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

Abstract: A novel routing algorithm, LRPI (low-overhead routing with piggybacked immunity information) was proposed. LRPI contains the following four new mechanisms: piggybacking the immune information with SV(summary vectors), fast generation of the immune information through a cross-layer method, an improved exchange mechanism of SV, and adaptive compression of SV. Based on the above new mechanism, LRPI not only avoids using special data structure but also can achieve the same immune function more quickly. Theoretical analysis and simulation results show that LRPI outperforms the classical epidemic routing algorithm and a few of its improvements in terms of control overhead, the number of saved packets, and average end-to-end delay.

Key words: opportunistic networks; routing algorithms; immune mechanisms; overhead

1 引言

机会网络 (opportunistic network)^[1-3]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通信的时延和分裂可容忍的无线自组织网络。由于机会网络可运行于较苛刻的环境条件下, 因此, 近年来已成为移动 ad hoc 网络 (mobile ad hoc network) 技术的一个重要发展方向。

机会网络的拓扑间断或部分连接的特点, 给路由

算法的设计带来一定困难。近年来, 人们设计了多种路由算法, 其中研究与应用较广的是基于 Epidemic 机制的路由算法^[4-10], 它采用“接收—携带—转发”方式, 将收到的数据分组存储起来, 并携带分组运动, 在运动中若与其他节点相遇, 则将该数据分组的副本转发出去, 直至数据分组到达目的节点。在研究中发现该类算法使用了专门的数据结构来存储和传送免疫信息, 而且只能由目的节点产生免疫信息, 因而导致了不必要的存储、控制开销和传播时延。针对以上

收稿日期: 2013-06-13; 修回日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61379159); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT1299); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2012jjA40051); 重庆市教委基金资助项目 (Kjzh11206)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61379159); The Programs for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2012jjA40051); The Project of Chongqing Municipal Education Commission (Kjzh11206)

问题, 本文提出一种基于免疫信息 SV (summary vector) 捎带的机会网络路由算法——LRPI (low-overhead routing with piggybacked immunity information), 该算法通过采用 SV 捎带免疫信息、跨层快速产生免疫信息、改进 SV 交换以及自适应压缩 SV 等机制减小了控制、存储和通信开销以及数据分组时延, 提高了路由算法的效率。

2 相关工作

Epidemic 路由算法^[4]利用节点移动带来的相遇机会进行通信, 两节点相遇后交换自己存有而对方没有的数据分组, 从而使数据分组得以传送; 该算法实质上是泛洪的一种变形, 因而具有较高的数据分组传送成功率和较低的数据分组时延; 但它没有考虑从中间节点缓存中删除已到达目的节点的数据分组, 在存储和通信方面的开销较大。Matsuda 等^[5]提出的 (p, q) -Epidemic 路由算法使用专门的数据结构存储免疫信息, 并通过在全网范围内广播免疫信息来删除节点缓存中已到达目的节点的数据分组, 虽然能够减少存储开销, 但全网广播免疫信息会造成通信开销显著增加。在 Tower 等^[6]设计的路由算法中, 节点相遇后优先交换免疫信息, 并且用散列函数在节点标识与消息序号之间建立了“一对多”的关系, 达到了压缩存储空间的效果, 但因为需要存储、交换专门的数据结构而仍然存在冗余。Jin 等^[7]提出的路由算法在缓存中建立了一种名为“Ack_list”的数据结构来存储免疫信息, 并在周期性发送的 Hello 消息和 Reply 消息中捎带 Ack_list 以删除网络中已到达目的节点的数据分组, 这种方法能减少节点缓存的数据分组, 但加长周期性的 Hello 消息会使通信开销明显增加。王汝言等^[8]在免疫信息的发布方面提出了用自适应分发代替无条件泛洪的机制, 减少了全网泛洪带来的开销, 不过仍然使用了专门的数据结构。在近年来的有关研究中^[9-11], 人们一直未能解决上述使用专门的数据结构存储和传送免疫信息的问题, 而且另外一个问题——只能由目的节点产生免疫信息而导致额外的免疫信息传播时延, 也未得到解决。

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, 根据其特点, 给出以下定义。

定义 1 (网络模型) 机会网络的数学模型可

描述为有向图 $K=(V, E)$, 其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$, $n>1$ 为节点集合, 其中 n 为网络中节点数, v_i 为网络中的第 i 个节点; 机会网络的链路集合可表示为: $E=\emptyset \cup \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m\}$, $1 \leq m \leq n(n-1)$, 其中, e_i 为网络中的第 i 条链路。

定义 2 (Epidemic routing 模型) 用 $\{e_i, (t_{si}, t_{ei})\}$, $1 \leq i \leq n(n-1)$ 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, $t_{ei} > t_{si}$ 。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 $\sum \{e_i, (t_{si}, t_{ei})\}$, 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 2 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 $t_{si} < t_{e(i+1)}$ 。

3.2 假设与问题描述

为便于研究, 给出如下假设。

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之后, 任何源和目的节点之间都会存在有序的链路组合, 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存储、转发数据, 网络性能的瓶颈主要存在于传输链路。这样, 便可以将研究焦点集中于完成数据传输功能的路由算法上。

根据上述假设, 在研究中发现现有基于 Epidemic 机制的路由算法在免疫方面存在以下问题。

- 1) 使用专门的数据结构存储和传送免疫信息, 带来不必要的存储和控制开销。
- 2) 免疫信息只能由目的节点产生, 导致不必要的时延。
- 3) SV 交换机制含有冗余的控制分组。
- 4) SV 在长度上存在冗余。

4 基于免疫信息 SV 捎带的低开销路由算法

为解决上述 4 个问题, 本文提出一种新的路由算法——LRPI, 在其中设计了 4 种新机制以减少存储和传播免疫信息的开销和时延。

4.1 LRPI 算法包含的新机制

4.1.1 基于 SV 捎带的免疫信息传送机制

原始的 Epidemic 路由算法中的汇总矢量 SV 如

图 1(a)所示，将汇总矢量划分为 N 段，每段长度为 M ，即对应的每个源节点产生 M 个数据分组，共有 N 个节点作为源节点，图中 $N=5, M=10$ 。图中状态位值为“1”表示该位置对应的数据分组在当前节点缓存中存储，“0”则表示该位置对应的数据分组未在当前节点缓存中存储。

加入数据分组免疫信息后 LRPI 算法中的汇总矢量如图 1(b)所示，在每段的最后一个有效状态位“1”的后面加上一个结束标识位并置为“1”（如图中圆圈内的 1 所示），这样每段结束标识位前状态值为“0”表示该位置对应的数据分组已成功到达目的节点，即该“0”为相应数据分组的免疫信息(如图 1 中小方框内的 0 所示)。结束标识位前状态位值为“1”表示本节点存储有对应的数据分组，结束标识位后状态位值为“0”则表示该位置对应的数据分组在本节点中未进行存储。

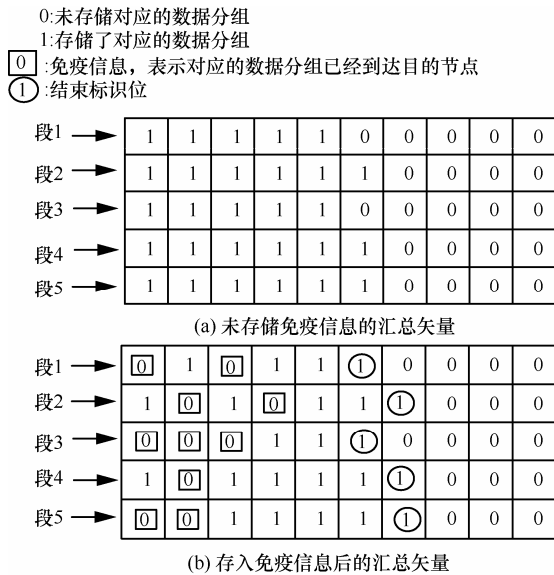


图 1 存入免疫信息前后的汇总矢量

4.1.2 免疫信息跨层快速产生机制

加入免疫机制的 Epidemic 路由相关改进算法中免疫信息是通过目的节点成功接收数据分组产生的，然后再由产生该免疫信息的目的节点对免疫信息进行传递。所提 LRPI 算法中产生免疫信息有 2 种途径：1) 由数据分组目的节点产生免疫信息；2) 通过跨层信息共享由数据分组目的节点的上一跳节点产生免疫信息。通过跨层信息共享产生免疫信息的原理如图 2 所示，节点相遇后进行数据分组传递时，发送节点首先判断该数据分组的目的是否为当前所遇节点，若当前所遇节点为数据分组的

目的节点，此时网络层触发免疫信息请求消息并向 MAC 层发送请求，当该数据分组被目的节点成功接收后，反馈回来分组的 ACK 确认帧到达分组发送节点的 MAC 层时将触发免疫信息的产生，并通过跨层信息共享传递给网络层，网络层获取该免疫信息后将该免疫信息存入汇总矢量 SV 中，并删除缓存中对应的数据分组。

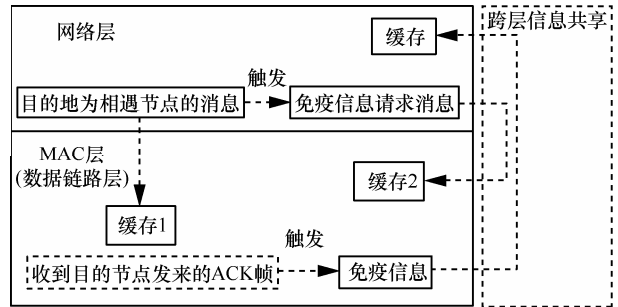


图 2 跨层信息共享产生免疫信息原理

4.1.3 改进的 SV 交换机制

当节点 A 与节点 B 相遇后发送各自的 SV 消息，如图 3 所示：A 节点向 B 节点发送 SV_A 消息，节点 B 收到 SV_A 后将 SV_A 按位取反后和 SV_B 进行“与”运算得到一个 A 节点的数据分组请求矢量 Req_A ，该矢量中值为 1 的状态位对应的是 B 节点中有而 A 节点中无的数据分组，然后 B 节点根据该请求矢量将数据分组发送给 A 节点。当 B 节点向 A 节点发送 SV_B 时也进行相同操作。由上述流程可知，同 Epidemic 算法的消息交互流程相比(如图 4 所示)，LRPI 算法的控制消息交互流程中取消了 2 个 Request 消息的交互，减小了控制开销。

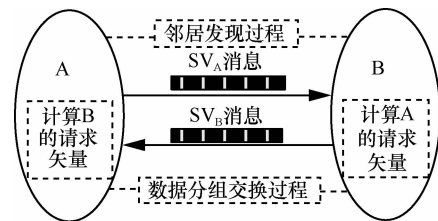


图 3 取消 Request 消息的交互

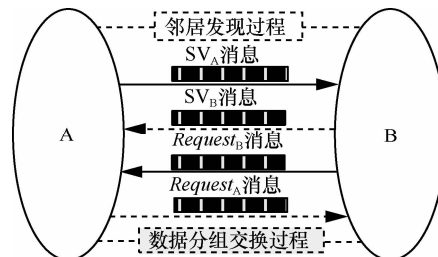


图 4 Epidemic routing 算法工作原理

4.1.4 SV 自适应压缩机制

汇总矢量 SV 由二进制位组成，并按照对应源节点分为 N 段，每段长度为 M 位。在网络运行中，可能会出现每段中的前几位状态值相同或者每段中最后几位状态值相同的情况。在所提 LRPI 算法中，通过对这些各段具有相同状态值的汇总矢量进行压缩操作以减小存储开销和通信开销，汇总矢量 SV 的压缩原理如图 5 所示，未经压缩的汇总矢量如图 5(a)所示，每段中的前 F 位和最后 L 位具有相同的状态值，中间 $M-F-L$ 位为不同的状态值。如图 5(b)中(i)所示，汇总矢量头部通过长度为 $\lceil \lg M \rceil + 1$ 的 length_star 字段表示前 F 位的压缩的位置，长度为 $\lceil \lg M \rceil + 1$ 的 length_end 字段表示最后 L 位的压缩位置，del_star 字段表示被压缩的前 F 位的状态值，del_end 字段表示最后 L 位被压缩的状态值。如图 5(b)中(ii)所示，汇总矢量中的 $M-F-L$ 部分按顺序进行存储。压缩后的汇总矢量由汇总矢量头部和汇总矢量 $N(M-F-L)$ 部分组成，压缩后的汇总矢量存储时占用更小的存储空间并且在对汇总矢量 SV 进行传递时同样减小了通信开销。

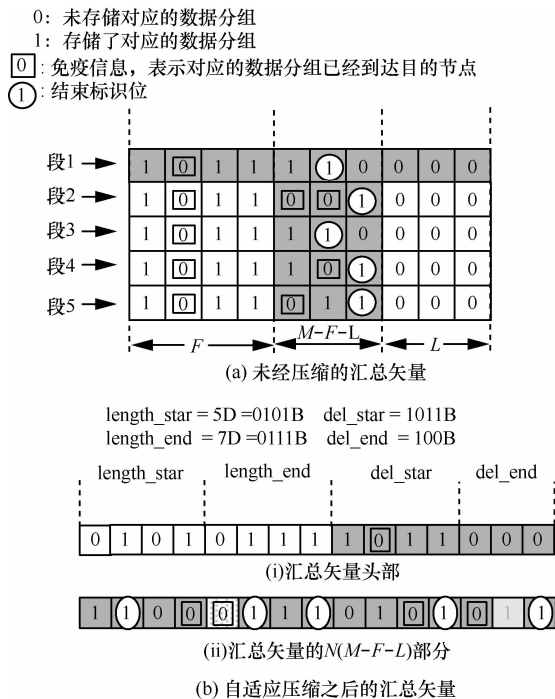


图 5 汇总矢量 SV 自适应压缩原理

4.2 算法操作

网络中节点 A、B 相遇后，由于 2 个节点进行控制消息交互的流程相同，因此，以下将以节点 A 向节点 B 发送汇总矢量 SV_A 的操作流程进行描述。

LRPI 路由算法的具体操作步骤如下。

步骤 1 A、B 节点相遇后 A 节点向 B 节点发送加入免疫信息的汇总矢量 SV_A 消息 (SV_A 进行自适应压缩)， SV_A 的压缩原理如 4.1.4 节所述。

步骤 2 节点 B 收到 SV_A 消息后，做如下操作。

1) 首先判断汇总矢量是否为压缩状态，若 SV_A 和 SV_B 是压缩状态，则将自存的汇总矢量 SV_B 和接收的 SV_A 进行解压缩操作，根据压缩后汇总矢量的头部和 $M-F-L$ 位段信息还原出原始的汇总矢量。

2) 比较还原后的 SV_A 和 SV_B 矢量的长度，若其中一个矢量长度为 $N(M+1)$ ，则在另外一个汇总矢量的每段的最后增加一个值为“0”的状态位，使得 2 个汇总矢量具有一致的长度。

3) 将长度一致的汇总矢量 SV_A 和 SV_B 进行逐段比较，更新自存矢量 SV_B 结束标识位前的免疫信息，将 SV_A 中对应 SV_B 结束标识位前的免疫信息加入 SV_B 中，并将更新免疫信息所对应的数据分组从节点 B 的缓存中删除。

4) 对长度一致的汇总矢量 SV_A 和 SV_B 进行复制得到副本矢量 SV_{AC} 和 SV_{BC} ，将 SV_{AC} 和 SV_{BC} 中每段结束标识位“1”前的状态值为“0”的免疫信息置为“1”并将该结束标识位删除，然后将 SV_{AC} 矢量进行按位取反操作得到 SV_{AC} ，再用 SV_{BC} 同 SV_{AC} 进行按位“与”运算，最后得到 A 节点的请求矢量 Req_A ，然后删除副本 SV_{AC} 和 SV_{BC} ， Req_A 矢量中值为“1”的状态位所对应的即为节点 B 中有而节点 A 中没有的数据分组。

步骤 3 节点 B 根据数据分组请求矢量 Req_A 向节点 A 发送数据分组，如果该请求矢量中的所有数据分组都已发送则结束该流程；如果还有数据分组需要进行发送，则节点 B 首先判断当前要发送的数据分组的地址是否为节点 A，操作如下。

1) 若当前数据分组目的节点为 A，节点 B 将在网络层产生一个免疫信息请求消息发往 MAC 层；节点 A 收到该数据分组后向 B 节点回复 ACK 确认帧，并且节点 A 产生一个该分组的免疫信息并存入汇总矢量 SV_A 中；当节点 B 的 MAC 层收到该 ACK 确认帧后，对应之前的请求信息产生一个该分组的免疫信息并通过跨层信息共享传到节点 B 的网络层，然后将该免疫信息存入 SV_B 中，并将该数据分组从节点缓存中删除。

2) 若当前数据分组的地址不为 A，则节点 A 在成功接收数据分组后将该数据分组存入节点缓

存，并将该分组所对应的 SV_A 中状态位置为“1”。

当节点 B 向节点 A 发送汇总矢量 SV_B 时，操作流程如上述步骤。

LRPI 路由算法的基本操作流程如图 6 所示。

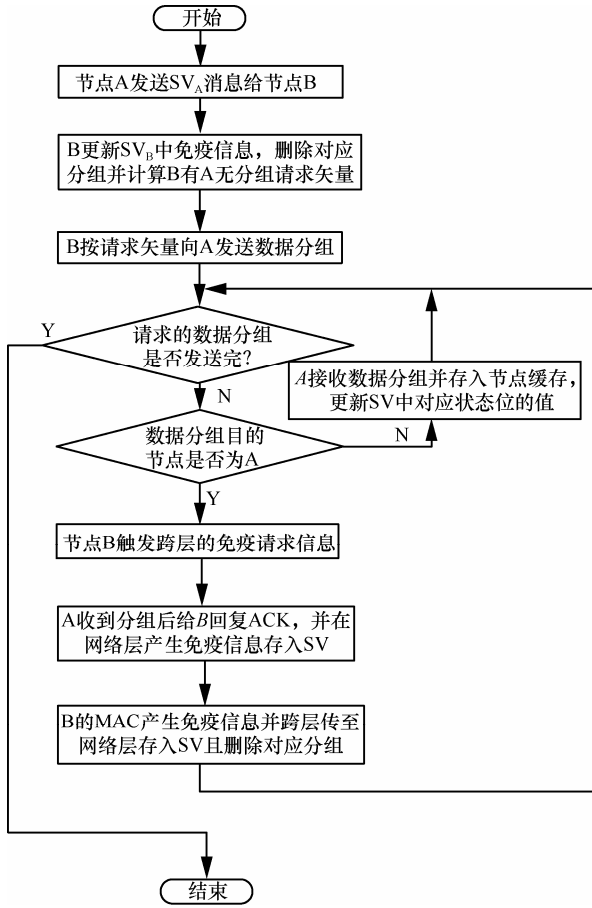


图 6 LRPI 算法操作流程

4.3 SV 消息压缩分析

原始的机会网络 Epidemic routing 算法中汇总矢量 SV 长度 L_0 为

$$L_0 = NM \quad (1)$$

汇总矢量由 N 段长度为 M 的二进制位段组成， N 段分别对应 N 个源节点，每一段中的 M 位对应同一个源节点产生的不同数据分组的存储状态。当这 N 段中的前 F 个状态位的值相同或者后 L 个状态位值相同时 ($F > 0, L > 0$)，对汇总矢量 SV 进行压缩， F 与 L 的值通过长度为 $\lceil \lg M \rceil + 1$ 的标识段表示，压缩原理如图 5 所示。

设压缩后的汇总矢量长度为 L_C ($L_C > 0$)，则有

$$\begin{aligned} L_C &= 2(\lceil \lg M \rceil + 1) + F + L + N(M - F - L) \\ &= NM - \{(N - 1)(F + L) - 2(\lceil \lg M \rceil + 1)\} \end{aligned} \quad (2)$$

对压缩前后的汇总矢量 SV 的长度进行比较即 $L_0 - L_C$ 的值为

$$L_0 - L_C = (N - 1)(F + L) - 2(\lceil \lg M \rceil + 1) \quad (3)$$

$$F + L > \frac{2(\lceil \lg M \rceil + 1)}{N - 1} \quad (4)$$

当式(4)满足时，即 $L_0 > L_C$ ，表示压缩后的 SV 具有较短的长度。以 N 等于 100， M 等于 200 为例

$$\frac{2(\lceil \lg M \rceil + 1)}{N - 1} > \frac{2(7 + 1)}{100} = 0.16 \quad (5)$$

则只需 $F + L > 0.16$ ，相当于 $F \geq 1$ 或 $L \geq 1$ ，即汇总矢量中每一段的头部或尾部只要有 1 bit 相同，压缩后的汇总矢量就更短。在网络运行的初期，由于许多消息尚未产生，汇总矢量中每一段的尾部会有多个“0”存在；而在网络运行的中期和后期，随着消息和免疫消息的逐渐扩散，汇总矢量中每一段的前部则会出现多个“1”或“0”；因此，压缩后的汇总矢量更短的条件较易满足。

5 仿真实验

本文选取经典的基于传染的 Epidemic 路由算法及其较新的改进路由算法 Immunity 和 APRA 将作为 LRPI 算法的对比方案，在相同的仿真参数条件和不同的网络场景中对算法的控制开销、平均端到端时延、平均节点缓存分组数、数据分组转发开销等性能进行比较分析。

5.1 仿真统计量

1) 控制开销

控制开销是累加所有节点发出的控制分组包含的总比特数。

2) 数据分组平均转发次数

数据分组平均转发次数是指网络中所有数据分组被转发的总次数与产生的分组数的比值，代表着网络的通信开销。计算公式为

$$S = \frac{F_r}{F_s} \quad (6)$$

其中， S 为数据分组平均转发次数， F_r 为所有数据分组被转发总次数， F_s 为产生的总数据分组数。

3) 数据分组平均端到端时延

平均端到端时延是指所有数据分组到达目的节点时的平均时延，计算公式为

$$\bar{T} = \sum_{i=1} T_i / \sum_{j=1} D_j \quad (7)$$

其中, T_i 表示第 i 个到达目的节点的数据分组的时延; D_i 表示已到达目的节点的数据分组个数。

4) 节点平均缓存分组数

节点平均缓存分组数代表着节点中缓存的使用情况, 即存储开销, 其计算公式为

$$\bar{T} = \sum_{i \in V} T_i / N \quad (8)$$

其中, T_i 为第 i 个节点拥有分组数, N 为节点个数。

5) 数据分组传送成功率

数据分组传送成功率是指已成功到达目的节点的数据分组数与所有源节点发送数据分组数的比, 计算公式为

$$D_{rate} = \sum_{i=1} D_i / \sum_{j=1} S_j \quad (9)$$

其中, D_i 表示已到达目的节点的数据分组个数, S_j 表示源节点发送的数据分组个数。

5.2 仿真参数设置

本文使用 OPNET 软件作为仿真平台, 节点移动模型采用 Random Waypoint, 主要的仿真参数设置如表 1 所示。

参数	数值
仿真场景	3 000 m×300 m
节点运动速度/(m·s ⁻¹)	1~20
传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	54
节点个数	100
分组产生间隔/s	1
节点通信半径/m	10, 25, 50, 75, 100
仿真时间/s	4 000

5.3 仿真结果及分析

通过选取不同的节点通信半径, 比较分析了 4 种算法的节点平均缓存分组数、控制开销、数据分组平均端到端时延、数据分组平均转发次数和数据分组传送成功率等性能。

1) 节点平均缓存分组数

图 7 显示, LRPI 算法的存储开销更小, 这是由于 LRPI 算法使用了目的节点的上一跳节点跨层产生免疫信息的新机制, 使得免疫信息可更快地在网络中产生和传递, 进而更快地删除已到达目的节点的数据分组, 从而降低节点缓存的占用率。

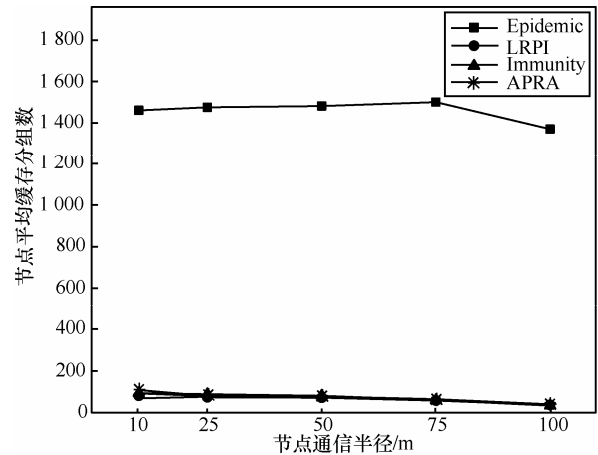


图 7 节点平均缓存分组数比较

2) 控制开销

图 8 显示, LRPI 算法的控制开销在每个场景中均低于 Epidemic 路由算法及其改进算法 APRA。Immunity。LRPI 算法能够减少控制开销主要原因是在节点相遇后的控制消息交互阶段取消了 Request 消息的发送, 节点通过接收 SV 消息算出相遇节点所需的数据分组列表, 并对 SV 消息中的汇总矢量部分进行了压缩操作, 减小 SV 的尺寸, 从而降低了控制开销。

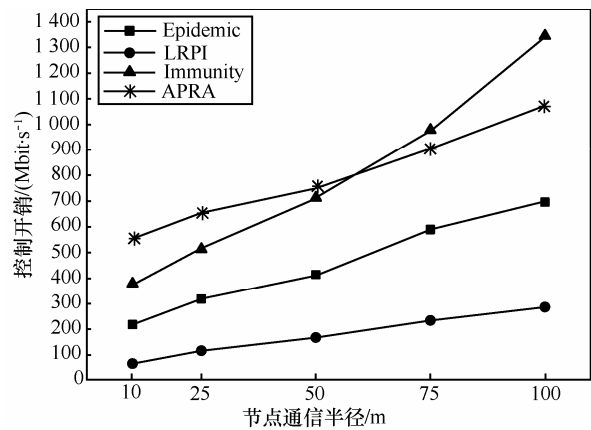


图 8 控制开销比较

3) 数据分组平均端到端时延

图 9 显示, LRPI 算法有较低的数据分组平均端到端时延, 这是由于 LRPI 算法中在节点相遇后取消了 Request 消息的交互, 通过 SV 消息接收节点计算出相遇节点的数据分组需求, 然后直接进行数据分组的发送, 使得数据分组可更快地发送到相遇节点, 缩短了分组在节点上的处理时延, 免疫信息的应用使已到达目的节点的分组不再进行转发从而进一步减小了分组的发送等待时间, 且由图 9 可知, 随着节点通信半径的增大, 数据分组平均端到

端时延呈下降趋势，这是由于随着节点通信半径的增大，节点达到目的节点所需的转发次数减小，从而数据分组的端到端时延也随之减小。

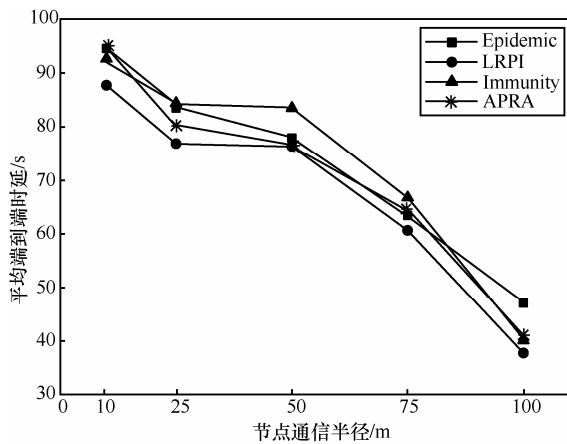


图 9 数据分组平均端到端时延比较

4) 数据分组平均转发次数

图 10 显示，在 4 个算法中，LRPI 算法的数据分组平均转发次数最低。这是由于 LRPI 算法将数据分组免疫信息存入汇总矢量 SV 中进行传递，更易于删除已经到达目的节点的数据分组，而且，LRPI 算法启用了目的节点的上一跳节点通过跨层信息共享产生免疫信息的新机制，使免疫信息可在整个网络中更快地产生和传播，能更快地删除缓存中已到达目的节点的数据分组，进一步减小数据分组转发次数。在通信半径为 100 m 时 LRPI 算法的转发次数略有增加，据分析主要原因在于节点通信半径增加会使邻居节点增多，而 Epidemic 机制向每个邻居发送数据分组副本的操作会导致数据分组平均转发次数趋于增加，从图中可看出，免疫机制的加入也未根本改变该趋势。

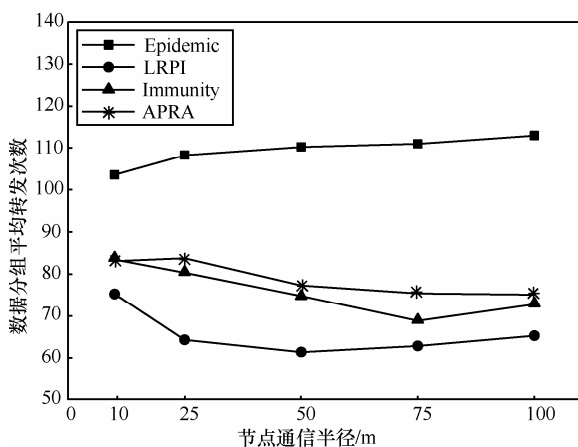


图 10 数据分组平均转发次数比较

5) 数据分组传送成功率

从表 2 可知，4 种算法的数据分组传送成功率都能达到 100%，说明 LRPI 算法在其他性能提高的同时未对数据分组传送的成功率造成影响。在网络运行期间，LRPI 算法在仿真时间 2 950 s 左右成功率达到 100%；4 种算法的数据分组传送成功率的增长曲线是不同的，但在网络运行结束时，它们最终达到了相同的数据分组传送成功率。

表 2 数据分组传送成功率

节点通信半径/m	数据分组传送成功率/%			
	Epidemic	APRA	Immunity	LRPI
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用专门的数据结构存储和传递免疫信息导致存储和控制开销增加、只由目的节点产生免疫信息导致其传播耗时增加、SV 交换机制和 SV 长度存在冗余等问题，提出采用基于 SV 捎带的免疫信息存储和传递机制、免疫信息跨层产生机制、改进的 SV 交换机制以及 SV 自适应压缩机制加以解决。理论分析和仿真结果显示 LRPI 算法较经典的 Epidemic 路由算法及其多个改进版本具有更小的开销和更低的分组时延。

现有的机会网络路由算法在节点自私性的抑制方面还存在不够完善的地方，因此，在未来工作中，将以博弈论为基础，深入研究如何通过演化博弈来促进节点在数据传输中的合作。

参考文献：

[1] 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.

[2] STAVROULAKI V, TSAGKARIS K, LOGOTHETIS M, et al. Opportunistic networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(3):52-59.

[3] 任智, 黄勇, 陈前斌. 机会网络路由协议[J]. 计算机应用, 2010, 30(3):723-728.
 REN Z, HUANG Y, CHEN Q B. Routing protocols for opportunistic

- networks[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(3):723-728.
- [4] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks[R]. Technical Report CS-2000-06, Duke University, Durham, 2000
- [5] 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.
- [6] TOWER J P, LITTLE T D C. A proposed scheme for epidemic routing with active curing for opportunistic networks[A]. The 22th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops[C]. 2008.1696-1701.
- [7] JIN Z, ZHAO X, LUO Y, *et al.* Adaptive priority routing with ACK_mechanism for DTN networks[A]. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing[C]. Nanjing, China, 2009.1-5.
- [8] 王汝言, 金勇, 吴大鹏等. 面向机会网络的自适应冗余副本删除机制[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2013, 25(1): 59-63,74.
WANG R Y, JIN Y, WU D P, *et al.* Adaptive redundant message deletion mechanism for opportunistic networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2013, 25(1): 59-63,74.
- [9] 任智, 黄勇, 曹建玲等. 基于邻居信息交换的机会网络低时延路由算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2):94-97.
REN Z, HUANG Y, CAO J L, *et al.* Low-delay routing algorithm for opportunistic networks by exchanging the neighborhood information[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science), 2011, 39(2):94-97.
- [10] 赵广松, 陈鸣. 自私性机会网络中激励感知的内容分发的研究[J]. 通信学报, 2013, 34(2):73-84.
ZHAO G S, CHEN M. Research of incentive-aware data dissemination in selfish opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(2):73-84.
- [11] WU F, CHEN T, ZHONG S. A game-theoretic approach to stimulate cooperation for probabilistic routing in opportunistic networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1573-1583.

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通信网络理论与技术。

陈葱 (1991-), 男, 湖南衡阳人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线网络通信协议优化。

曹亚楠 (1987-), 女, 河南鹤壁人, 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。

彭晨 (1989-), 男, 安徽宣城人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线多跳网络内容路由。

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, 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室主任, 主要研究方向为无线通信与网络。