

基于网络编码的机会网络高效路由算法

任智, 刘智虎, 姚玉坤, 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:针对采用 Epidemic 机制的机会网络路由算法在数据分组传送阶段存在通信冗余的问题, 提出了一种基于网络编码的高效路由算法——NCBER(network-coding-based epidemic routing)。NCBER 在传送数据分组的过程中使用主动异或网络编码和多播, 并取消了 Request (请求) 控制分组, 从而减少数据分组的转发次数和控制分组数量, 降低网络开销, 缩短分组传输时延。理论分析和仿真结果表明, NCBER 算法在网络开销和数据分组端到端时延性能方面优于经典的 Epidemic 路由算法及其改进算法 MRRMR (message redundancy removal of multi-copy routing), 并且使数据传送成功率保持在 100%。

关键词: 机会网络; 路由算法; 网络编码; 多播; 网络开销

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0016-08

Efficient routing algorithm for opportunistic networks based on network coding

REN Zhi, LIU Zhi-hu, YAO Yu-kun, CHEN Qian-bin

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Communications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To address the problem in opportunistic network that existing epidemic-mechanism-based routing algorithms incur redundant communication overhead during the transmission of data packets, an efficient routing algorithm based on network coding, called NCBER (network-coding-based epidemic routing), was proposed. During the transmission of data packets, NCBER adopts an active XOR coding operation and multicast, and cancels the transmission of the Request control packets, so as to reduce the time used to transmit data packets, as well as the number of control packets. As a result, NCBER cuts down the network overhead and shortens the end-to-end delay of data packets. Theoretical analysis and extensive simulation results show that NCBER outperforms the classical epidemic routing algorithm and its improvement called MRRMR (message redundancy removal of multi-copy routing) in terms of the network overhead and the end-to-end delay, while still keeping the delivery rate at 100%.

Key words: opportunistic network; routing algorithm; network coding; multicast; network overhead

1 引言

机会网络(opportunistic network)^[1]是一种具有间断或部分连接的网络拓扑, 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无线移动自组织网络。采用 Epidemic 机制的路由

算法^[2,3]为机会网络提供了一类可靠的数据传送方式, 但是该类路由算法基于泛洪机制, 易导致网络中存在大量的冗余报文副本, 使得路由算法的运行对网络资源要求较高; 因在机会网络环境中, 路由性能受网络资源限制的影响, 存在改进的需要。

收稿日期: 2012-08-17; 修回日期: 2012-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972068); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2010-1561); 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)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60972068); The Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars (2010-1561); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2012jjA40051); The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC) (D2011-24)

目前，网络编码^[4]已成为促进机会网络中数据高效投递的一个重要研究方向。Li 等^[5]在文献中指出，对于绝大多数网络多播问题，使用线性编码就能够达到网络吞吐量的理论上限。许多潜在的机会网络应用都是基于多播方式的，而网络编码正是传输多播数据的最佳方式之一。

为了解决上述机会网络路由算法在数据分组传送阶段存在通信冗余的问题，本文提出一种基于网络编码的机会网络高效路由算法——NCBER(network-coding-based epidemic routing)，并对其性能进行了理论分析和数值验证。

2 相关工作

Nguyen 等^[6]将网络编码技术应用于无线网络广播重传策略中，提出了 2 种编码重传策略：基于时间重传策略和改进型的基于时间重传策略，从而减少平均传输次数，提高重传效率。Katti 等^[7]提出了基于机会的网络编码 (COPE , completely opportunity encoding) 方法，使每个接收节点都对信道进行侦听，通过获取邻居节点的信息状态确定编码的机会，并且在本地的信息缓存区中进行编码，最后进行基于机会的路由，可以有效地提高无线网络的传输容量和吞吐量。Chachulski 等^[8]对 COPE 进行改进，提出了 MORE (MAC-independent opportunistic routing & encoding) 协议，将编码信息路由到多跳邻居节点并增加了针对编码信息的缓存管理机制，可使网络吞吐量得到提高。Lu 等^[9]提出 n -epidemic 路由算法，规定仅当节点当前拥有的邻居节点个数达到一个特定的门限值时，才进行数据传输，这就可以使用较少的传输次数传递数据分组，减少数据传送开销；但由于数据分组未能及时传递，导致数据分组投递时延的增加。Resta 等^[10]提出了一种用于分析延迟容忍网络中路由算法性能的理论架构，用来描述基于 Epidemic 机制的路由算法在分组投递时延和通信开销等基本性能指标精确分布的特性。Zhang 等^[11-13]将随机线性网络编码应用于 Epidemic 路由协议，通过建立基于常微分方程的 Epidemic 路由协议分析模型，分别分析和计算基于复制和基于网络编码的 Epidemic 路由传输时延；研究结果表明基于网络编码的传输延迟与缓存大小没有直接的关联，在带宽和缓存受限的网络环境中使用网络编码可显著降低网络时延，提高网络的可靠性，但当带宽和缓存足够大时，由于网络编

码增加了中间节点的计算复杂性，且信息的恢复需要收到足够的编码分组，因此将会增加传输时延和节点的资源消耗。Yu 等^[14]提出了一种用于在时延容忍移动自组网中控制消息冗余的新方案，让每个节点在 Epidemic 路由方案的基础上增加一个相遇计数器，用于记录节点遇到带有相同消息拷贝的节点数目，如果计数器值达到了设置的门限，则节点将该消息拷贝从缓存中移除，并且之后不再接收该消息拷贝；通过设置合理的门限值，可以在保证消息传送成功率的同时，将冗余拷贝控制在一个相对低的水平，但由于节点移动的随机性，合理门限值的选取比较困难。

3 模型及问题描述

3.1 网络和路由模型

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 为网络中的节点个数，且 $n>1$ ；链路集合 $E=\emptyset \cup \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ， e_m 表示网络中的链路 m ，且 $1 \leq m \leq n(n-1)$ 。

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} 分别为该链路的生成和终止时间， $t_{ei}>t_{si}$ 。机会网络 Epidemic 路由的数学模型为：在机会网络中，寻找至少 1 条在逻辑上有序相连的链路组合 $\{e_i, (t_{si}, t_{ei})\}$ ，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 $t_{si}<t_{e(i+1)}$ 。

定义 3 节点两两相遇的概率。

节点两两相遇的概率 p 为^[15]

$$p \approx \frac{2 \times w \times R \times E[V]}{A} \quad (1)$$

其中， w 是一个针对特定移动模型的常量，对于 Random Direction 移动模型， $w \approx 1$ ，对于 Random Waypoint 移动模型， $w \approx 1.3683$ 。 R 为节点通信范围， A 为节点移动的平面区域面积。

3.2 问题描述

由于节点的随机移动，当节点 B 广播 Hello 消息进行邻居发现时，有可能同时存在多个节点如 A 和 C 都在 B 的通信范围内，如图 1 所示。

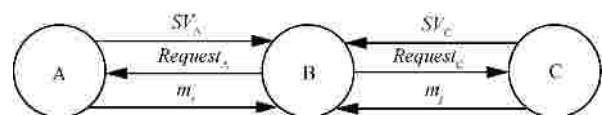


图 1 多邻居节点时的数据交互

从图 1 可看出,节点 A 和 C 分别回复自己维护的 SV_A 和 SV_C 给节点 B,然后 B 通过与自己维护的 SV_B 作对比,分别向 A 和 C 发送分组请求 $Request_A$ 和 $Request_C$ 。假设请求的数据分组集合分别为 M_A 和 M_C ,且 $M_{AC}=M_A \cap M_C$,如果 $M_{AC} \neq \emptyset$,则节点 B 将会分别收到来自 A 和 C 的相同数据分组,造成数据分组冗余,浪费无线网络带宽和移动节点存储空间,增加网络开销。同时,过多控制分组信息的交互,也会浪费节点之间短暂的接触时间,增加分组投递时延。

4 基于网络编码的机会网络高效路由算法

本节从包含的新机制、操作和关键参数确定等方面详述提出的基于网络编码的机会网络高效路由算法——NCBER,并进行深入的理论分析。

4.1 主动异或网络编码

在机会网络中,至少有 3 个节点处于同一连通域内时存在使用异或网络编码的条件,如图 1 中的节点 B,因为同时与节点 A 和节点 C 相连,可以进行异或网络编码。为了增加网络编码机会,设计了一种主动编码的新机制:当节点 B 收到 SV_A 后,不是立即发送 A 所需数据分组给节点 A,而是通过等待一段时间(时间长度阈值 T 根据网络条件确定),主动地创造网络编码的机会。如果在 T 内,节点 B 收到了节点 C 发来的 SV_C ,则将需要分别传送给 A 和 C 的数据分组进行异或网络编码后多播给 A 和 C,从而减少数据分组发送次数,降低分组传输时延。B 计算编码参与分组的过程具体如下。

1) 设在时间 T 内,B 先后收到 A、C 发出的 SV,即 SV_A 和 SV_C 。B 计算出 A、C 的请求矢量(表示 A、C 需要 B 发送的数据分组) $Request_{AB}$ 和 $Request_{CB}$

$$Request_{AB} = \overline{SV_A} + SV_B \quad (2)$$

$$Request_{CB} = \overline{SV_C} + SV_B \quad (3)$$

2) B 计算出 A、C 中有且仅有 1 个节点要求发送的数据分组的矢量:

$$Code_{AC} = Request_{AB} + Request_{CB} \quad (4)$$

矢量 $Code_{AC}$ 表示在 B 能够进行异或网络编码的数据分组。

4.2 数据分组多播

NCBER 算法设计了一种新的数据分组多播机制:如果当前节点满足多播条件{具有多个邻居} \cap {同一个数据分组要发送给多个邻居},则无论数据分组是否经过网络编码,它都采用“一对多”的多播发送模式,通过一次发送让多个邻居节点接收到同一个数据分组,从而达到减少转发开销和节省网络带宽的效果。

4.3 取消 Request 控制分组

在使用 Epidemic 机制的路由算法中,节点 B 收到节点 A 发送的 SV_A 后,会与自己维护的 SV_B 作比较,得到被节点 A 存储而节点 B 没有的数据分组的索引 $Request_{BA}$

$$Request_{BA} = SV_A + \overline{SV_B} \quad (5)$$

B 发送 $Request_{BA}$ 给 A,请求 A 发送相应的数据分组。经过研究,提出了如下无需发送 Request 分组的方法。

节点 B 收到节点 A 发送的 SV_A 后,会与自己维护的 SV_B 作比较,得到 $Reply_A$,即

$$Reply_A = SV_B + \overline{SV_A} \quad (6)$$

由此得到被节点 B 存储而节点 A 没有的这部分数据分组的索引 $Reply_A$,然后 B 根据该索引逐条发送数据分组给 A。同理,节点 A 收到节点 B 发送的 SV_B 后,也能计算出 $Reply_B$,从而无需 B 发送 $Request_A$ 。这样就取消了 Request 控制分组的发送,减少了控制分组的种类和数量。精简后的数据交互模型如图 2 所示。

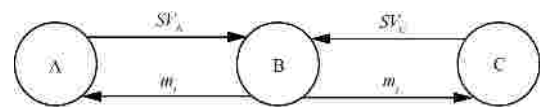


图 2 NCBER 算法数据交互模型

4.4 用 SV 清理节点缓存

NCBER 算法设计了一种用 SV 进行运算清理节点缓存的新机制,具体如下。

1) 当节点 A 收到 SV_B ,则进行

$$SV_C = SV_B \wedge SV_A \quad (7)$$

矢量 SV_C 显示的是 A、B 都含有的数据分组。

2) 节点 A 遍历 SV_C 中显示的数据分组,查询数据分组的节点是否为 B,如果是,则删除该数据分组,从而达到清理缓存、减少节点存储消耗的效果。

4.5 算法操作

定义 4 可用 SV。当节点收到邻居节点回复的控制分组 SV_N 并将其与自己维护的 SV_S 作比较，如果有数据分组要发送给该邻居节点，则称 SV_N 为可用 SV。

设一个节点至少拥有 n 个邻居节点的概率为 q ， p 为节点两两相遇的概率， D 表示节点的度；令 $h = p/q$ ；根据文献[9]可得

$$h = \frac{1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{e^{-D} \times D^i}{i!}}{1 - e^{-D}} \quad (8)$$

基于上式，对于常用场景 ($R=50\text{ m}$)，计算出 n 和 h 的关系如图 3 所示(此时 p 为常量，且 $0 < p < 1$)。

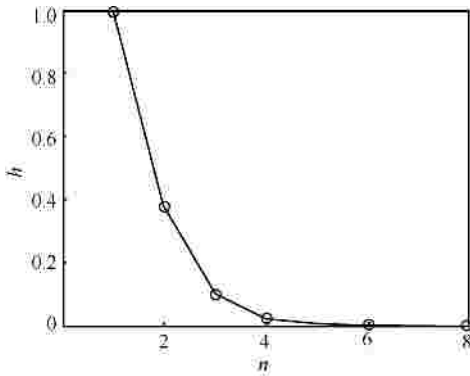


图 3 n 和 h 关系

NCBER 算法利用节点相遇机会来传输数据，因此是适用于机会网络的。由图 3 可以看出，随着节点个数 n 的增加， h 的值不断减小；当 $n=3$ 时， h 的值已经小于 0.1，表明区域内的节点比较稀疏；所以，NCBER 算法将网络编码中接收节点的最大个数设置为 2 (除非特别指出，下文皆用此设置)。

NCBER 路由算法的具体操作如下。

1) 节点 B 周期性地广播 Hello 消息进行邻居发现。在一个 Hello 周期内，如果节点 B 没有收到任何一个邻居节点 A 回复的可用 SV_A ，则在该周期结束后，启动下一周期的邻居发现过程；否则进入下一步。

2) 节点 B 启动等待时间 T 并将 SV_A 与自己维护的 SV_B 做比较，得到自己有而节点 A 没有的数据分组集合 M_A 。

3) 如果在等待时间 T 内，节点 B 没有收到另一个邻居节点 C 回复的可用 SV_C ，则立即发送 M_A

中的数据分组给 A；否则，进入下一步。

4) 查找数据分组集合 M_A 和 M_C 中的分组，若存在相同的分组，则将这些分组多播给 A 和 C，否则进入下一步。

5) 将数据分组集合 M_A 和 M_C 中剩余的分组分别逐一提取并对两分组进行异或编码，然后将编码分组多播给节点 A 和 C。

6) 如果数据分组集合 M_A 和 M_C 中还有一个集合存在剩余的分组，则将这些分组单播给该集合对应的节点并进入下一步；否则，直接进入下一步。

7) 节点 B 继续等待邻居回复，如果在该周期内又收到了邻居回复的可用 SV_A ，则返回步骤 2) 执行；否则，继续等待，直至下一个 Hello 周期到来，返回步骤 1)。

4.6 等待时间阈值 T 的确定

等待时间阈值 T 的物理含义为当节点 B 收到 SV_A 后，延迟发送 A 所需数据分组的最长时间。为了尽可能多地寻求编码机会，同时又保证 A 所需数据分组的成功投递，根据节点传输数据的时间 (设节点获取信道资源的概率相等) 加上等待时间不能大于相遇节点相互处于通信范围的最短时间的原则，定义等待时间阈值 T 为

$$T = \frac{R-d}{2V_{\max}} - N(S_F + t_{\max})(D+1) \quad (9)$$

其中， R 表示节点通信半径； d 表示两节点之间的距离，可由 RSSI (received signal strength indicator) 机制^[16]测得； V_{\max} 表示节点移动的最大速率； N 表示需要发送给节点 A 的数据分组数； S_F 表示信道中两帧之间的间隔； D 表示节点度； t_{\max} 表示发送最长的数据帧所需要的时间，其值为

$$t_{\max} = \frac{N_{\max}}{R_0} + t_1 + t_2 \quad (10)$$

其中， R_0 为数据速率； t_1 和 t_2 分别为传输 Preamble 字段和 SIGNAL 字段所需时间， N_{\max} 为每帧传输的最大比特数，其值为

$$N_{\max} = \text{ceil}((N_{\text{Service}} + N_{\text{Header}} + N_{\text{Dmax}} + N_{\text{FSC}} + N_{\text{Tail}}) / N_S) N_S \quad (11)$$

其中， ceil 为向上取整函数。

由此，节点就可以根据到邻居的距离以及要发送给邻居的数据分组个数等参数分布式地确定等待时间阈值 T 。

4.7 算法理论分析

4.7.1 数据转发次数分析

对于 NCBER 算法使用网络编码和多播来减少数据转发次数,有以下引理。

引理 1 在达到相同的数据分组扩散的前提下,使用网络编码可以减少数据分组转发次数。

证明 假设链路为无损链路,数据分组可以实现成功投递。节点 B 需要分别传送给节点 A 和 C 的数据分组集合分别为 M_A 和 M_C (分组个数为 N_A 和 N_C);节点 B 需要同时传送给节点 A 和 C 的数据分组集合为 M_{AC} ($M_{AC}=M_A \cap M_C$,且分组个数为 N_{AC}),且 $0 < N_A < N_C$ 。则原始 Epidemic 路由算法所需要的转发次数为

$$N_{ER} = N_A + N_C \quad (12)$$

根据 NCBER 算法操作,使用网络编码之后所需要的转发次数为

$$N_{NCBER} = N_{AC} + (N_A - N_{AC}) + (N_C - N_{AC} - (N_A - N_{AC})) = N_C \quad (13)$$

其中,第 1 个等号右端第 1 项为节点 B 将 M_{AC} 中的数据分组 P_{AC} 直接多播给节点 A 和节点 C 的数据分组转发次数,第 2 项为节点 B 分别逐一提取 M_A 中剩余的数据分组 P_A (此时节点 C 的缓存中已有该分组)和 M_C 中剩余的数据分组 P_C (此时节点 A 的缓存中已有该分组)进行异或编码,得到编码组合分组 $P_A \oplus P_C$ 并将这些编码组合分组多播给节点 A 和节点 C 所需要的转发次数;第 3 项为节点 B 将 M_C 中剩余的数据分组 P_C (此时 $M_A = \emptyset$)单播给节点 C 所需转发次数。

所以有 $N_{NCBER} < N_{ER}$,即 NCBER 算法较 Epidemic 路由算法的数据分组转发次数少,且减少量为

$$N_{Delta} = N_{ER} - N_{NCBER} = N_A \quad (14)$$

证毕。

4.7.2 计算复杂度分析

从时间、存储和通信 3 个方面分析 NCBER 算法的复杂度。NCBER 算法的时间复杂度在初始化后为 $O(d)$, d 是用跳数表示的网络直径。设网络节点数为 N ,每个节点产生数据的速率为 v ,网络运行时间为 t ;由于节点不会产生目的地为自己的数据分组,而且当遇到一个节点,虽然需转发的分组会增加,但可以发送并删除目的地为该节点的分组,因此存储复杂度为 $O((N-2)vt)$ 。在最极端的情

况下,节点之间需要进行 $N-1$ 次通信才能将数据分组传送到目的节点,因此,通信复杂度在初始化后为 $O(N-1)$ 。

5 仿真实验

采用业内流行的 OPNET 14.5 软件进行建模和仿真,在相同的条件下,从网络开销、数据分组平均端到端时延以及数据分组传送成功率等方面,将提出的 NCBER 算法与经典的 Epidemic 路由算法及其改进算法 MRRMR 进行性能比较与分析。

5.1 仿真参数设置

仿真实验中用到的主要参数设置如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数	
参数	取值
节点数量	100
仿真范围	1 500 × 600
移动模型/(m·s ⁻¹)	Random Waypoint
速率区间/s	[1, 19]
运动间歇时间/s	0
通信半径/m	10, 25, 50, 75, 100
仿真时间/s	3 000
最大数据速率/(Mbit·s ⁻¹)	54
数据分组大小/KB	1
数据分组发送间隔/s	1
发分组起始时间/s	5
发分组结束时间/s	1 984
节点缓存大小/KB	2 000
Hello 周期/s	3
相遇时间间隔阈值/s	21.65
随机种子	128, 130, 132, 134

随机选取其中的 45 个节点作为源和目的节点,这些节点分别在速率区间内随机选择移动速度,并且随机选定时间向各目的节点发送 1 个长度为 1 KB 的数据分组,各数据分组发送间隔为 1 s。从仿真时刻 5 s 开始发送,至 1 984 s 发送结束,共发送 45×44=1 980 个数据分组。在仿真结束时统计仿真数据。同时,为了避免结果的随机性,选取随机种子 $seed \{128,130,132,134\}$,每个仿真实验做 4 次,取统计结果的平均值。

5.2 仿真结果分析

5.2.1 网络开销

网络开销是指网络运行时间内,所有节点发送

的控制分组 (Hello 分组、SV 分组和 Request 分组以及数据分组) 所包含的总比特数。其值为

$$C_{total} = N_H \times S_H + N_{SV} \times S_{SV} + N_R \times S_R + N_D \times S_D \quad (15)$$

其中, C_{total} 为总的网络开销, S_H 和 N_H 分别对应 Hello 分组的长度和总的发送个数。同样, S_{SV} 和 N_{SV} 分别对应 SV 分组的长度和总的发送个数; S_R 和 N_R 分别对应 Request 分组的长度和总的发送个数; S_D 和 N_D 分别对应数据分组的长度和总的发送个数。

由图 4 可知, 随着通信范围的增大, 节点相遇机会和相遇持续时间都会增加, 导致各算法中相应的操作和网络开销增加。NCBER 算法的网络开销在各个场景都明显低于 Epidemic 算法和 MRRMR 算法, 这是由于 NCBER 算法取消了 Request 控制分组的发送, 并且引入主动异或网络编码和多播, 从而提高了数据传输效率, 降低了控制开销和数据分组冗余, 使得总的网络开销得到明显改善。而 MRRMR 算法由于删除了某些数据分组, 减少了数据分组发送次数, 但同时导致相应的 Request 控制分组发送数量的增加, 使得该算法在控制网络开销方面的效果不明显。

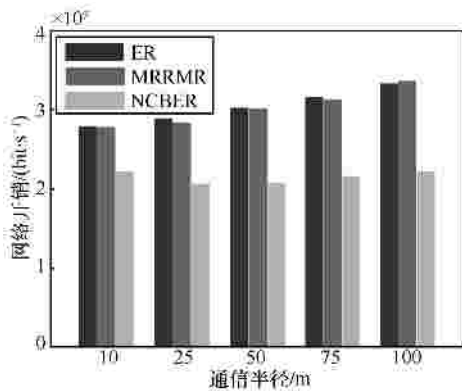


图 4 网络开销对比

5.2.2 数据分组平均端到端时延

数据分组的端到端时延包括数据分组在节点内存存储并携带的时间以及在节点之间传递的时间。该值与分组所经历的中继节点序列、节点通信范围以及运动模型等因素有关。其值为

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1} T_i}{N_{num}} \quad (16)$$

其中, T_{avg} 为分组平均端到端时延, T_i 为第 i 个到达

目的节点的数据分组的时延; N_{num} 为已到达目的节点的数据分组个数。

由图 5 可知, 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, 从而加快数据转发。NCBER 算法的数据分组平均端到端时延在每个场景中均明显低于 Epidemic 路由算法和 MRRMR 路由算法, 这是由于 NCBER 算法取消了 Request 控制分组的发送, 充分利用了节点之间短暂的接触时间, 传送更多的数据分组。同时, 网络节点更充分地利用了本地网络拓扑结构, 利用网络编码和多播的优势, 进一步减少无线网络带宽占用和网络开销, 缩短数据分组投递时延。

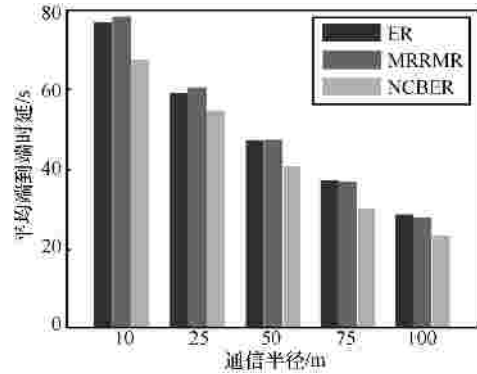


图 5 数据分组平均端到端时延对比

5.2.3 数据分组发送次数

节点发送的数据分组包括节点自身产生并发送的数据分组以及为其他节点转发的数据分组。数据分组发送次数是指在网络运行时间内, 所有节点发送的数据分组的总个数。其值为

$$N_{total} = N_S + N_T \quad (17)$$

其中, N_{total} 为总的的数据分组发送次数, N_S 和 N_T 分别对应节点自身产生并发送的数据分组次数和节点为其他节点转发的数据分组次数。

由图 6 可知, NCBER 算法的数据分组发送次数在各个场景都明显低于 Epidemic 算法和 MRRMR 算法, 这是由于 NCBER 算法取消了 Request 控制分组的发送, 并且引入主动异或网络编码和多播, 从而提高了数据传输效率, 降低了数据分组冗余, 使得总的的数据分组发送次数得到明显减少。MRRMR 算法主要用于后期删除缓存中已到达目的节点的数据分组, 从而减少冗余数据分组的发送次数。但

是，后期对于这类冗余数据分组的发送次数已经相对较少，使得该算法在控制数据分组发送个数方面的效果不是很明显。

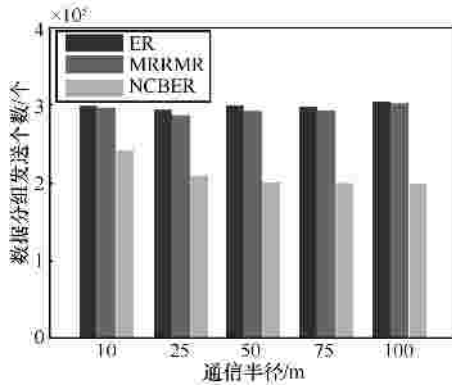


图 6 数据分组发送次数对比

5.2.4 数据分组传送成功率

数据分组传送成功率是指数据分组成功到达目的节点的个数占网络中所有源节点产生并发送的数据分组总个数的比例。其值为

$$D_{rate} = \frac{\sum_{i=0} D_i}{\sum_{i=0} S_i} \quad (18)$$

其中， D_{rate} 为数据分组传送成功率； D_i 为成功到达目的节点 i 的数据分组个数； S_i 为源节点 i 产生并发送的数据分组个数。3 种算法的数据分组传送成功率如表 2 所示。

表 2 3 种算法的数据分组传送成功率对比

通信半径/m	路由算法成功率/%		
	Epidemic	MRRMR	NCBER
10	100	100	100
25	100	100	100
50	100	100	100
75	100	100	100
100	100	100	100

由表 2 可知，Epidemic 路由算法、MRRMR 算法以及 NCBER 算法在仿真时间内，各个场景的数据分组传送成功率均达到了 100%，表明各算法都具有较好的可靠性。这是由于上述 3 种算法都是基于泛洪机制；结果还显示 MRRMR 路由算法通过设置合理的计数器门限值，也可以保证分组最终投递的成功率。

6 结束语

本文提出的 NCBER 路由算法通过引入主动异或网络编码和多播，充分利用节点本地网络拓扑结构，减少了网络开销并降低了数据分组平均端到端时延，同时通过取消 Request 控制分组的发送，进一步提高了基于 Epidemic 机制的机会网络路由算法的效率。未来笔者的研究将在网络编码和绿色节能机制的结合方面展开。

参考文献：

- [1] PELUSI L, PASSARELLA A, CONTI M, *et al.* Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(11):134-141.
- [2] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks[R]. Duke University, 2000.
- [3] WEN H, REN F Y, LIU J, *et al.* A storage-friendly routing scheme in intermittently connected mobile network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3):1138-1149.
- [4] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, *et al.* Network information flow[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
- [5] LI S Y R, YEUNG R W, CAI N. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2):371-381.
- [6] NGUYEN D, NGUYEN T, BOSE B. Wireless Broadcasting Using Network Coding[R]. Oregon State University, 2006.
- [7] KATTI S, RAHUL H, HU W, *et al.* Xors in the air: practical wireless network coding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497-510.
- [8] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, *et al.* Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing[A]. Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications(SIGCOMM'07)[C]. New York, USA, 2007.169-180.
- [9] LU X F, HUI P. An energy-efficient n-epidemic routing protocol for delay tolerant networks[A]. 2010 the Fifth IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage[C]. Macau, China, 2010.341-347.
- [10] RESTA G, SANTI P. A Framework for Routing Performance Analysis in Delay Tolerant Networks with Application to Noncooperative Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1):2-10.
- [11] ZHANG X L, NEGLIA G, KUROSE J, *et al.* On the benefits of random linear coding for unicast applications in disruption tolerant networks[A]. The Second Workshop on Network Coding, Theory, and Applications[C]. Massachusetts, USA, 2006.1-7.
- [12] LIN Y F, LI B C, LIANG B. Stochastic analysis of network coding in

epidemic routing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5):794-808.

- [13] ZHAO B K, SONG Z M, SU J S, *et al.* NTC: towards efficient network coding in delay tolerant networks[A]. 2011 the Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing [C]. Seoul, Korea, 2011. 57-64.
- [14] YU H Z, MA J F, BIAN H. Message redundancy removal of multi-copy routing in delay tolerant MANET[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(1):42-48.
- [15] ZHANG X, NEGLIA G, KUROSE J, *et al.* Performance modeling of epidemic routing[J]. Computer Networks, 2007, 51(10):2867-2891.
- [16] VIANI F, LIZZI L, ROCCA P, *et al.* Object tracking through RSSI measurements in wireless sensor networks[J]. Electronics Letters, 2008, 44(10):653-654.



刘智虎(1986-),男,山东济宁人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为网络编码。



姚玉坤(1964-),女,重庆人,重庆邮电大学副教授,主要研究方向为网络管理与应用、网络编码。

作者简介:



任智(1971-),男,四川内江人,博士,重庆邮电大学教授,主要研究方向为无线移动通信网络。



陈前斌(1967-),男,四川营山人,博士,重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授、博士生导师,主要研究方向为宽带无线网络技术、多媒体信息处理与传输。

(上接第15页)

Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)[C]. Cesme, Turkey, 2012. 545-549.

- [17] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- ZHANG X D. Matrix Analysis and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.



赵维杰(1986-),男,上海人,上海大学硕士生,主要研究方向为宽带无线通信。

作者简介:



方勇(1964-),男,四川内江人,博士,上海大学教授、博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、盲信号处理和智能信息系统。



汪敏(1957-),男,上海人,上海大学教授、博士生导师,主要研究方向为数字通信、宽带接入网技术和无线通信。