

# 一种基于节点位置余弦相似度的机会网络转发算法

朱 坤 刘林峰 吴家皋

(南京邮电大学计算机学院 南京 210023) (江苏省大数据安全与智能处理重点实验室 南京 210023)

**摘 要** 针对机会网络中数据送达率较低的问题,文中根据节点历史接触信息即节点相遇次数、相遇时间长度、节点关系稳定性来计算节点转发效用值。首先选择通信范围内效用值最大的邻居节点作为初始转发节点,再根据余弦相似度选择其他转发节点,使得转发节点能够尽可能均匀地分布。在此基础上,提出一种基于节点位置余弦相似度的机会网络转发算法(Opportunistic Network forwarding algorithm based on Node Cosine Similarity, ONNCS)。该算法使得转发节点能够均匀地分布,因此数据报文能够尽快地被转发到目的节点。实验结果表明,ONNCS具有较高的转发成功率和较低的转发能耗,转发成功率高出其他算法5%~8%。

**关键词** 机会网络,转发效用值,余弦相似度

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.008

## Opportunistic Network Forwarding Algorithm Based on Node Cosine Similarity

ZHU Kun LIU Lin-feng WU Jia-gao

(School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Jiangsu Key Laboratory of Big Data Security & Intelligent Processing, Nanjing 210023, China)

**Abstract** Aiming at the problem of low data delivery ratio in opportunistic networks, this paper defined and computed the node forwarding utility according to the historical contacts between nodes, e. g., the number of nodes contacts, the length of contacts and the stability of nodes relations. First, the node with the largest utility value falling into the communication range is selected as the initial forwarding node. Then, other forwarding nodes are selected by their cosine similarities, such that the forwarding nodes can be evenly distributed approximately. On this basis, an opportunistic network forwarding algorithm based on node cosine similarity (ONNCS) was proposed. ONNCS enables the selected forwarding nodes to be evenly distributed and improves the data delivery ratio. The simulation results show that ONNCS has a higher forwarding success rate and lower forwarding energy consumption, and the success rate of the algorithm is 5% to 8% higher than other algorithms in this paper.

**Keywords** Opportunistic network, Forwarding utility value, Cosine similarity

## 1 引言

近年来,大量低成本、具备短距离无线通信能力的智能设备发展迅速,由此产生了利用节点移动带来的相遇机会来实现数据传输的机会网络(Opportunistic Network)。作为一种全新的组网方式,机会网络以“存储-携带-转发”的路由模式实现节点间的数据传输,该模式引起了研究人员的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。机会网络作为一种网络通信的新技术,是移动自组织网络新的发展方向,具有组网方式灵活、支持分布式控制等特点,在野生动物追踪、城市车载网络、灾难应急救援、偏远山区建设等方面有着广泛的应用前景<sup>[3]</sup>。

随着移动设备的普及,机会网络的节点一般为手持设备,

通常以人为载体,并且移动节点间的数据频繁交换,逐渐形成了大规模的以人为主体的机会网络。由于人类之间的社会关系具有一定的依赖性和稳定性,因此与陌生人相比,人更容易与具有亲密社会关系(亲友、邻居等)的个体进行接触<sup>[4-5]</sup>。文献<sup>[6]</sup>的研究表明,利用机会网络中节点之间相对稳定的社会关系可以减少数据的交换次数,达到提高转发效率的目的。

近年来,研究人员提出了基于多副本的路由算法<sup>[7-8]</sup>(如 Epidemic, Spray and Wait, Spray and Focus 等),这类算法利用多副本转发数据来提高传输成功率并减少传输时延,但是会带来较大的开销。文献<sup>[9]</sup>提出基于社区的路由算法 Bubble Rap,即如果某个节点要将数据传送到目的节点,那么该节点在分层等级树中逐层上传,直到携带该数据的节点转发

到稿日期:2017-11-19 返修日期:2018-02-01 本文受国家自然科学基金(61373139, 61502250),中国博士后科学基金面上项目(2014M560379),中国博士后科学基金(2015T80484)资助。

朱 坤(1991-),男,硕士生,主要研究方向为机会网络;刘林峰(1981-),男,博士,教授,主要研究方向为机会网络, E-mail: liulif@njupt.edu.cn (通信作者);吴家皋(1969-),男,博士,副教授,主要研究方向为机会网络。

数据给与目的节点在同一社区的节点,此后在这个社区内,该节点利用该社区内部的等级顺序将数据再传至目的节点。但是,Bubble Rap 算法目标不明确,路由开销仍然较大。

在实际应用中,由于节点的移动随机性较强,并且目的节点的位置不断改变,难以获得实时位置,节点如果只根据与邻居节点的距离来转发数据,可能会导致数据分发不均匀,从而不利于提高数据的转发成功率。在这种背景下,如何保证在较低能耗下尽量提高节点传输的成功率是研究的重点。基于上述考虑,首先利用节点间的历史相遇信息(节点相遇次数、相遇时间长度、节点关系稳定性)来计算节点的转发效用值,并从通信范围中选出最大效用值的节点作为第一个转发节点,之后结合转发效用和余弦相似度方法来选择其他转发节点。本文从节点转发效用值和节点转发策略出发,提出一种基于节点位置余弦相似度的机会网络转发算法 ONNCS。

## 2 相关工作

根据转发策略,机会网络可分为基于复制的转发算法和基于效用的转发算法<sup>[1]</sup>。基于复制的转发算法把待发送的副本扩散到网络中,形成多数据副本拷贝的转发算法,代表性算法为 Epidemic<sup>[7]</sup>。基于效用的转发算法主要借助某些信息(相遇预测、链路状态和上下文信息等不同的参数)来计算节点的转发效用,并将数据转发给效用值高的节点,直至数据转发至目标节点。文献[10]提出的基于历史信息的转发机制中,动物身上的传感器节点维持了一个到达基站的概率,当节点移近基站通信范围时,该概率值增加,否则概率值随时间的推移而逐渐降低。当两个节点相遇时,概率低的节点将自身消息转发给概率高的节点。文献[11]结合节点的剩余能量,提出了一种差分概率的数据转发策略,每个节点参与转发的概率依赖于该节点的剩余能量。

基于复制的转发算法通常送达率高但资源占用率也较大,基于效用的转发算法能在一定程度上减少数据副本的过多复制,但送达率较低且时延较大。本文采用一种基于复制和基于效用的混合转发算法,同时兼顾数据送达率和数据副本复制数量两个方面。

目前,基于复制和效用混合的转发算法也已取得了很多成果。文献[12]提出一种基于区域朋友关系的机会路由算法,其首先统计节点的历史接触信息,然后基于节点历史接触信息挖掘节点的热点区域以及相应区域的朋友关系,最后根据节点当前位置和区域朋友关系的效用值转发数据。文献[13]提出了基于历史信息的路由算法,将网络的地理区域划分为不同的区域单元并编号,每个节点利用 GPS 软件记录自身的位置信息,并统计访问最频繁的区域,源节点将 1 份消息传输给地理位置上与目的节点更近的中继节点,不断缩短携带消息的节点与目的节点的距离。文献[14]提出利用节点的接触频率、平均接触时长、接触规律性来识别节点的社会关系,认为朋友节点之间应该具有较高的接触频率、较长的接触时间以及相对固定的交互活动,并以此为基础设计了一种面向朋友关系的转发策略。文献[15]发现在机会网络中节点和邻居节点的接触处于一个稳定状态,可根据节点的接触次数

保存联系最频繁的几个节点,并通过节点之间的数据交互获得其他节点的信息,从而构造出节点的关系图,关系图中每条边被赋予反映节点亲密程度的权值,最后利用 Dijkstra 算法得到节点转发效用值,不断将数据传向效用值较高的节点。类似地,文献[16]提出一种基于朋友关系的机会转发算法,在文献[14]的基础上引入了节点间相遇的分离时间,提出了效用模型指标来激励朋友节点之间进行交流。

文献[17]提出了一种新颖的结构化余弦相似度方法,它为文档聚类提供了一种新的文档聚合建模方法,考虑到了文档中的术语结构来提高语音文档聚类的质量。本文受文献[17]的启发,将余弦相似度概念引入机会网络数据转发问题中,用于选择转发节点,能够使得转发节点更均匀地分布。

## 3 基于余弦相似度计算的机会转发算法

### 3.1 问题建模

假设若干节点  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$  均匀地分布在边长为  $L$  的正方形区域内,其中节点的移动方式遵循 Random Walk Mobility Model 模型<sup>[18-20]</sup>。为了描述问题,首先给出以下定义。

**定义 1(节点坐标)** 对于任意节点  $v_i \in V$ ,其在  $t$  时间的坐标表示为  $(x_i^t, y_i^t)$ 。

**定义 2(链接)** 对于任意的两个节点  $v_i$  和  $v_j$ ,如果它们在通信范围之内,则节点  $v_i$  和  $v_j$  间可以形成一个通信链接。

**定义 3(传输时延)** 节点  $v_i$  和  $v_j$  在  $t$  时刻的传输时延为  $d_{(i,j)} = \frac{L_s}{B} + \frac{d_{(i,j)}^t}{\mu}$ 。其中,  $L_s$  是数据包的长度,  $B$  是数据包的传输速率,  $\mu$  表示电磁波在空气中的传输速率,  $d_{(i,j)}^t$  表示在  $t$  时间节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的距离。

假设源节点  $v_s$  产生一个发往目的节点  $v_d$  的数据,数据及副本在网络中通过中继节点尽快地送达到目的节点,且传播的可容忍时延为  $Dl_{\text{upp}}$ ,数据及副本的上限为  $N_{\text{max}}$ 。

假设节点  $v_i$  在  $t$  时间携带数据,其中数据及其副本在传输过程中的可容忍时延为  $Dl_{\text{upp}}$ ,那么本算法的思想就是在数据和其副本可容忍时延  $Dl_{\text{upp}}$  内,利用转发效用和余弦相似度方法选择转发节点,使数据在网络中均匀转发,从而提高数据的送达率。每个节点对它的邻居节点都会保存历史相遇记录,用来计算邻居节点间的转发效用值,该效用值会随着时间的变化而变化。

节点关系稳定性表示两节点间的联系是否稳定。通常情况下,节点与邻居节点之间每次分离的时间长度越接近,相遇次数越多,越说明两者之间存在定期相遇,节点间的通信关系也就越稳定。图 1 给出节点  $v_i$  和  $v_j$  在一段时间内的相遇信息,包括节点相遇的时间长度以及节点分离的时间长度。假设两个节点在第  $n$  次相遇时,相遇时间为  $t_n^{\text{start}}$ ,离开时间为  $t_n^{\text{end}}$ ,则通过式(1)计算节点  $v_i$  和  $v_j$  的相遇时间总长度为:

$$T_{en(i,j)} = \sum_{en=1}^n [t_n^{\text{end}}(i,j) - t_n^{\text{start}}(i,j)] \quad (1)$$

其中,  $en(i,j)$  表示节点  $v_i$  和  $v_j$  相遇的次数。式(2)表示节点  $v_i$  和  $v_j$  的第  $n$  次分离时间长度:

$$T_{se(i,j)}^n = t_n^{\text{start}}(i,j) - t_{n-1}^{\text{end}}(i,j) \quad (2)$$

其中,  $se(i,j)$  表示节点  $v_i$  和  $v_j$  的分离次数。

由式(2)可以得到, 节点  $v_i$  和  $v_j$  的平均分离时间长度

$$\bar{T}_{se(i,j)} = \frac{\sum_{en=1}^n [t_n^{\text{start}}(i,j) - t_{n-1}^{\text{end}}(i,j)]}{n}$$

节点分离时间长度的方差代表节点关系的稳定值。节点分离长度的方差越小, 说明节点每次分离的时间长度越接近, 两个节点间的联系更紧密, 节点间的关系也更为稳定。节点  $v_i$  和  $v_j$  分离时间长度的方差表示为:

$$S^2(i,j) = \frac{\sum_{en=1}^n [\bar{T}_{se(i,j)} - T_{se(i,j)}^n]^2}{n} \quad (3)$$

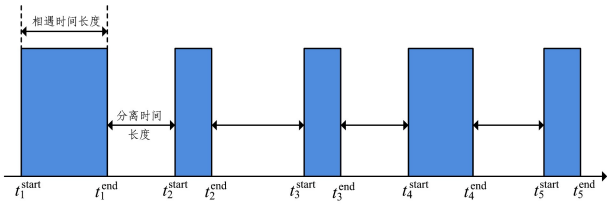


图 1 节点  $v_i$  和  $v_j$  在一段时间内的相遇时间长度、次数和分离时间长度

Fig.1 Meeting period, meeting frequencies and separation period between  $v_i$  and  $v_j$

此外, 节点  $v_i$  和  $v_j$  的转发效用值记为  $U(i,j)$ , 它与相遇次数、相遇时间长度、节点关系稳定性相关: 节点间的相遇次数越多, 相遇时间长度越长, 节点关系稳定值越小, 节点间的转发效用值也就越高。计算节点  $v_i$  和  $v_j$  的转发效用值的公式为:

$$U(i,j) = \frac{[n \cdot T_{en(i,j)}]^\alpha}{[S^2(i,j)]^\beta} \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是对应因素的影响指数。

### 3.2 基于余弦相似度的数据转发算法

#### 3.2.1 余弦相似度的计算

当节点相遇时, 节点记录它们之间的相遇信息, 并更新转发效用值。为了保持接触信息的实时性, 仅保留最近时间长度  $T$  内的历史信息。假设节点  $v_i$  通信范围内的节点集合表示为  $V_i$ , 节点  $v_i$  携带消息准备转发时, 如果检测到周围存在其他节点, 则其根据周围节点反馈的历史信息计算得到转发效用值, 假设最大的效用值的节点  $v_p \in V_i$ , 则标记节点  $v_p$ 。节点进行数据转发时需要从通信范围内选择  $k$  个节点作为转发节点。如图 2 所示, 假设在时间  $t$ , 节点  $v_i$  需要转发数据, 则以  $v_i$  为圆心在通信半径范围内进行数据转发。

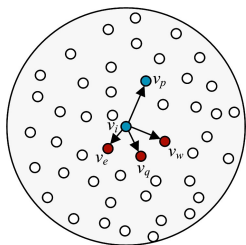


图 2 节点  $v_i$  通信范围内的邻居节点分布

Fig.2 Neighbor node distribution of communication range on node  $v_i$

以  $V_i$  中  $v_p, v_q, v_w, v_e$  为例, 分别计算节点  $v_i$  和  $v_p$  周围

通信范围内节点的余弦值。以节点  $v_i$  为起点, 向量  $\vec{v_i v_p}$  为起始方向, 向量  $\vec{v_i v_p}, \vec{v_i v_w}, \vec{v_i v_e}$  分别为节点  $v_i$  指向  $v_q, v_w, v_e$  的向量, 根据余弦定理, 以节点  $v_i, v_p, v_q$  为例, 用式(5)计算夹角的余弦值:

$$\cos(\vec{v_i v_p}, \vec{v_i v_q}) = \frac{\vec{v_i v_p} \times \vec{v_i v_q}}{|\vec{v_i v_p}| \times |\vec{v_i v_q}|} = \frac{(x_p' - x_i', y_p' - y_i') \times (x_q' - x_i', y_q' - y_i')}{\sqrt{(x_p' - x_i')^2 + (y_p' - y_i')^2} \times \sqrt{(x_q' - x_i')^2 + (y_q' - y_i')^2}} \quad (5)$$

为了使数据转发更平衡, 利用余弦相似度选择其他转发节点。在以节点  $v_i$  为圆心的通信范围内, 因为节点  $O_p$  已被选中, 所以只需从通信范围内再选择  $k-1$  个节点, 即将圆分成  $k-1$ , 每个圆弧角等于  $\frac{2\pi}{k-1}$ 。为了使数据比较均匀地分布在网络中, 选择的转发节点应尽可能在不同的扇区。如图 3 所示, 以顺时针为正方向, 以  $v_i$  为圆心, 节点  $v_i$  和  $v_p$  连成直线所在半径为起始方向, 第二个转发节点应该分布在以节点  $v_i$  和节点  $v_p$  正下方圆弧角的大小为  $\frac{\pi}{k-1}$  的扇形内, 即  $\theta \in (\frac{(k-2)\pi}{k-1}, \frac{k\pi}{k-1})$ , 从  $V_i$  中选出与  $v_i v_p$  夹角为  $\theta$  ( $\cos\theta \in [-1, \cos(\frac{(k-2)\pi}{k-1})]$ ) 并且效用值最大的节点并标记。按照上述步骤依次选出所有的转发节点。

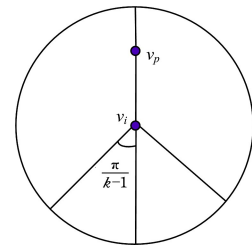


图 3 下一个转发节点所在的区域

Fig.3 Location area of next forwarding node

#### 3.2.2 ONNCS 机会转发策略

ONNCS 机会转发策略的具体步骤如下。

步骤 1 在  $t$  时刻, 节点  $v_i$  携带数据准备转发时, 如果检测到周围存在其他节点, 则将请求转发的报文发送给通信范围其他节点, 通信范围内的其他节点接收到节点  $v_i$  发送的报文后发送收到请求报文给节点  $v_i$ 。

步骤 2 节点  $v_i$  收到其他节点发送的报文后, 更新相遇历史信息, 并根据式(4)计算通信范围内节点的转发效用值。

步骤 3  $v_i$  选择效用值最大的节点作为第一个转发节点, 同时将其作为选择下一个节点的基点, 并标记该节点。

步骤 4 根据余弦相似度式(5)计算出节点  $v_i$  周围其他节点的余弦值, 从余弦值符合  $(-1, \cos(\frac{(k-2)\pi}{k-1}))$  条件的节点中再选出效用值最大的节点作为转发节点, 并将其作为下一个节点转发的基点。

步骤 5 逐步选择  $k$  个转发节点, 完成当前时刻数据的转发。

得到邻居节点转发效用值后,搜索通信范围内的中继节点是否存在目的节点,若存在,则直接转发;否则,依据转发效用值和余弦相似度方法选择转发节点。

#### 4 数学分析

假设节点在网络中均匀分布,数据及其副本的可容忍时延为  $Dl_{upp}$ ,数据每次转发需要的时延为  $dl'_{(i,j)} = \frac{L_s}{B} + \frac{d'_{(i,j)}}{\mu}$ ,

其中  $d'_{(i,j)} = (x'_i - x'_j)^2 + (y'_i - y'_j)^2$ ,因此最大转发次数为  $m = \frac{Dl_{upp}}{dl'_{(i,j)}}$ 。源节点为了向目的节点发送数据,可以将数据发送给通信范围内的  $k$  个节点,通过多次转发将数据发送到目的节点。

假设邻居节点  $v_i$  到节点  $v_j$  的相遇概率为  $P(i, j)$ ,节点转发效用值为  $U(i, j)$ ,经过分析和观察,它们之间的关系近似于  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1 + \frac{1}{n})^n}{e}$  曲线,当  $n$  无穷大时,  $\frac{(1 + \frac{1}{n})^n}{e}$  接近于 1。为了便于计算,引入  $P(\cdot)$ :

$$P(\cdot) = \frac{(1 + \frac{1}{U})^U}{e} \quad (6)$$

数据被送达到目的节点的次数小于或等于  $m = \frac{Dl_{upp}}{dl'_{(i,j)}}$ ,因此节点  $v_i$  将数据送达到目的节点的期望转发跳数表示为:

$$E(\delta) = \sum_{\gamma=1}^m \gamma \times P^\gamma \quad (7)$$

通过式(8)可以计算出数据送达到目的节点的概率为:

$$\bar{P} = P^{E(\delta)} \quad (8)$$

由式(8)可知,送达率与节点和邻居节点间的相遇概率和转发跳数相关。数据每次转发需要的时延为  $dl'_{(i,j)} = L_s/B + d'_{(i,j)}/\mu$ ,由于电磁波的传输速率非常大,因此两个节点的距离传输时延可以忽略不计,转发跳数  $m \approx Dl_{upp}/(L_s/B)$ 。由式(7)得到,节点将数据送到目的节点的转发跳数  $E(\delta)$  由节点与邻居节点间的相遇概率和转发跳数决定。由式(6)可知,节点与邻居节点间的相遇概率由节点的转发效用值决定,且转发效用值  $U$  越高,节点与邻居节点间的相遇概率  $P$  就越高。在时延上限  $Dl_{upp}$  和  $L_s/B$  已经确定的情况下,选择转发效用较高的节点在一定程度上可以提高送达率。

#### 5 实验分析

本节通过实验来分析节点数量以及数据的可容忍时延上限对算法的影响,主要从数据的送达率、平均包开销比例和平均时延方面来分析算法的性能,并且将所提算法与经典的机会网络算法 Epidemic 和 Bubble Rap 进行比较。送达率是指成功接收的数据数与产生的数据数的比值,表示数据能够被成功接收的概率。平均传输时延是指在某个时间段内所有成功接收的数据从源节点传至目的节点所耗费的时间。平均开销比例指数据转发总数和成功接收数据总数之差与成功接收数据总数的比值,它是从数据转发数量的角度来表示转发代价,其值越大,表示每个成功转发的数据平均产生的副本数量越多,同时也就消耗了更多的资源。为了对 ONNCS 进行验

证,利用 Myeclipse 工具进行多线程编程,主要参数设置如表 1 所列。

表 1 主要参数设置

Table 1 Setting of main parameters

参数名称	取值
覆盖面积 $L \times L/m^2$	800 × 800
$\alpha$	0.02
$\beta$	0.02
$k$	2
节点通信半径/m	20
时隙长度/s	1000
节点数量/个	40~200

如图 4 所示,当数据可容忍时延较小时,由于大量数据包在送达到目的节点前被丢弃,各算法的数据包送达率均比较低;随着数据容忍时延的增加,不同算法的数据包送达率增加,3种算法的送达率有了明显的改善;达到峰值后,送达率逐渐降低。以上说明,适当的数据可容忍时延可以提高送达率。随着数据可容忍时延的增加,ONNCS 的送达率提升得最为明显,因为 ONNCS 利用转发效用值进行数据转发选择,可以增大节点间相遇的机会。图 5 表明,ONNCS 的平均开销比例低于 Epidemic 和 Bubble Rap 算法,其利用节点转发效用能够准确地预测节点间的相遇概率。不同于 Epidemic 的洪泛,ONNCS 方法限定了每次转发的数据副本个数,随着数据可容忍时延的增加,数据得到合理的存储和转发,网络开销也趋于稳定。图 6 中,随着数据可容忍时延的增加,3种算法的平均传输时延都逐渐增加,Epidemic 算法没有限制数据转发副本数量,导致节点剩余缓存变少;Bubble Rap 算法每次转发目标时是将目标转发给目标节点所在社区内的节点,转发节点和目的节点关系不明确,不能及时转发到目的节点,平均时延较高。

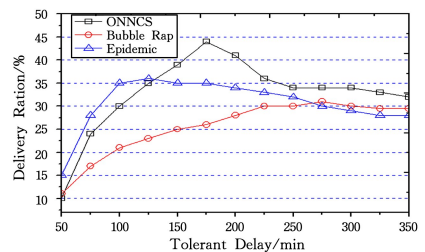


图 4 数据可容忍时延对送达率的影响

Fig. 4 Effect of data tolerant delay on delivery ratio

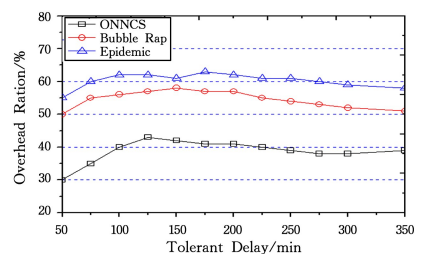


图 5 数据可容忍时延对平均开销的影响

Fig. 5 Effect of data tolerant delay on overhead ratio

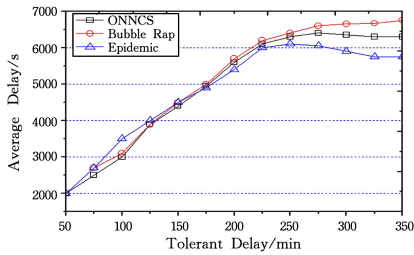


图 6 数据可容忍时延对平均时延的影响

Fig. 6 Effect of data tolerant delay on average delay

如图 7 和图 8 所示,随着节点数目的逐渐增加,ONNCS 算法和 Bubble Rap 算法的送达率不断提高,均高于 Epidemic 算法,但 ONNCS 算法送达率提升最大。在节点数量较少时,3 种算法的平均开销比例较为接近;随着节点数目的增加,ONNCS 的平均开销比例低于 Epidemic 和 Bubble Rap 算法。送达率的逐渐提高是由于随着节点数量的增多,节点间的相遇机会增多,送到目的节点的机会也就越大;同时节点数量增多使得节点间的历史相遇记录增多,节点可以根据转发效用值和余弦相似度进行数据转发,数据的转发也更加均匀,在一定程度上提高了送达率。在图 9 中,3 种算法的平均时延总体呈下降趋势,这是因为节点数量增加后,网络中的数据副本数量也随之增加,节点与目的节点相遇的机会增加,所以平均时延会降低。

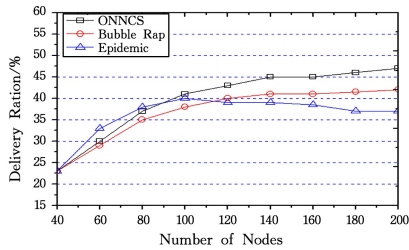


图 7 节点数目对送达率的影响

Fig. 7 Effect of number of nodes on delivery ratio

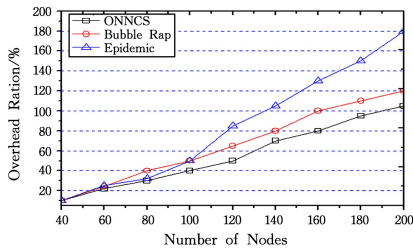


图 8 节点数目对网络开销的影响

Fig. 8 Effect of number of nodes on overhead ratio

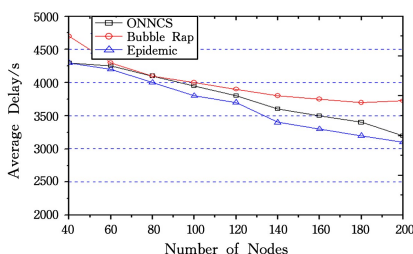


图 9 节点数目对平均时延的影响

Fig. 9 Effect of number of nodes on average delay

**结束语** 本文根据节点间相遇的历史信息(相遇次数、相遇时间长度、节点关系的稳定性)来定义节点的转发效用,可以计算出邻居节点间的转发效用值。考虑到数据持有节点在网络中的分布情况,本文利用余弦相似度方法选择多个转发节点,实现了数据在网络中的均匀分布,同时结合转发效用值和余弦相似度方法设计了一种基于节点位置余弦相似度的转发算法 ONNCS。数学分析和仿真表明,该算法具有较高的送达率和较低的能耗。

### 参 考 文 献

- [1] XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, et al. Opportunistic Networks [J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137. (in Chinese)  
熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
- [2] IRTF. Delay Tolerant Networking Research Group [EB/OL]. (2015-08-09). <http://www.dtnrg.org>.
- [3] MA H D, YUAN P Y, ZHAO D. Research Progress on Routing Problem in Mobile Opportunistic Networks [J]. Journal of Software, 2015, 26(3): 600-616. (in Chinese)  
马华东, 袁培燕, 赵东. 移动机会网络路由问题研究进展 [J]. 软件学报, 2015, 26(3): 600-616.
- [4] DZIEKONSKI A M, SCHOENEICH R O. DTN Routing Algorithm for Networks with Nodes Social Behavior [J]. International Journal of Computers, Communications & Control, 2016, 11(4): 457-471.
- [5] WANG X, LIN Y, ZHAO Y, et al. A novel approach for inhibiting misinformation propagation in human mobile opportunistic networks [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2017, 10(2): 377-394.
- [6] YUAN P Y, MA H D, DUAN P R. Impact of strangers on opportunistic routing performance [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2013, 28(3): 574-582.
- [7] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks: CS2200006 [R]. Durham North Caro: Duke University, 2000.
- [8] AYYATSA, HARRAS K A, ALY S G. Interest aware people rank: towards effective social-based opportunistic advertising [C] // Proc. of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai, China, 2013: 4428-4433.
- [9] LI Q H, ZHU S C, CAO G H. Routing in Socially Selfish Delay Tolerant Networks [C] // Proc. of IEEE INFOCOM 2010. Washington DC, USA: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [10] JUANG P, OKI H, WANG Y, et al. Energy-Efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with Zebra Net [C] // Proc. of the 10th Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM, 2002: 96-107.
- [11] ZHAO D, MA H D, YUAN P Y, et al. Differentiated probabilistic forwarding for extending the lifetime of opportunistic networks [C] // Proc. of the IEEE WCNC 2012. 2012: 3002-3007.
- [12] GUO D Y, LIU L F. An opportunistic routing algorithm based on regional friendship [J]. Computer Science, 2017, 44(3): 105-109. (in Chinese)

相比于 ARP, ARP-PL 寻找到的任播路径的长度较短,因此 ARP-PL 的端对端传输时延性能也同时优于 ARP, 其实实验结果曲线与图 5 相同(只讨论节点各跳的传输时延,不讨论其他时延)。

**结束语** 针对在 WSN 中重建通信树需要消耗大量资源的问题,文中提出一种轻量级的路由发现过程来构建新的任播路径。在路由发现过程中,本文协议采用基于前缀路由策略的单播寻路方法,从而能够避免在网络中充斥大量的路由消息包。相比于传统标签方法,该协议的前缀标签开销有所增加,但增加幅度不大。实验数据表明,相比于传统的基于通信树的任播路由协议,当查找新的替代任播路径时,该协议具有较低的路由查询开销(路由查询消息包数量)、较强的路由查询能力和较优的端对端传输时延性能。

### 参 考 文 献

- [1] LENDERS V, MAY M, PLATTNER B. Density-based anycast: a robust routing strategy for wireless Ad Hoc networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(4): 852-863.
- [2] KIM J, LIN X, SHROFF N B. Optimal anycast technique for delay-sensitive energy-constrained asynchronous sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(2): 484-497.
- [3] KIM J, LIN X, SHROFF N B, et al. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with anycast[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(2): 515-528.
- [4] YERRA R, MALYALA K, PACHAMUTHU R. Reliability and delay analysis of slotted anycast multi-hop wireless network targeting dense traffic IoT applications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 727-730.
- [5] DINH T, KIM Y. Actor-oriented directional anycast routing in wireless sensor and actor networks with smart antennas[J]. *Wireless Networks*, 2016, 23(5): 1467-1478.
- [6] WANG X, WANG J, LU K, et al. GKAR: A novel geographic k-anycast routing for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(5): 916-925.
- [7] KOSTIN A E, FANAEIAN Y, AL-WATTAR H. Anycast tree-based routing in mobile wireless sensor networks with multiple sinks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(2): 579-598.
- [8] GAO D, LIN H, LIU X. Routing protocol for k-anycast communication in rechargeable wireless sensor networks[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2016(43): 12-20.
- [9] FLURY R, WATTENHOFER R. Routing, Anycast, and Multicast for Mesh and Sensor Networks[C]// *IEEE Inforcom-IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2007: 946-954.
- [10] XUAN D, JIA W, ZHAO W, et al. A routing protocol for anycast messages[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2000, 11(6): 571-588.
- [11] BAKKER E M, VAN LEEUWEN J, TAN R B. Prefix routing schemes in dynamic networks[J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1993, 26(4): 403-421.
- [12] WU J, SHENG L. Deadlock-free multicasting in irregular networks using prefix routing[J]. *Journal of Supercomputing*, 2005, 31(1): 63-78.
- [13] LEE S W, HA J S, KO Y B. A lightweight prefix-based routing for content-centric networking[C]// *Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE Press, 2013: 656-660.
- [14] XU G, REN K, GU N. Stochastic Prefix-based fault tolerant source routing algorithm for network on chip[C]// *International Conference on Computer & Information Science (ICIS)*. IEEE, 2012: 712-717.
- [15] 郭东岳, 刘林峰. 一种基于区域朋友关系的机会路由算法[J]. *计算机科学*, 2017, 44(3): 105-109.
- [13] SANJAY K, DHURANDHER D, KUMAR S, et al. Shruti Bhati HBPR: History Based Prediction for Routing in Infrastructure-less Opportunistic Networks[C]// *2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. 2013: 931-936.
- [14] LI F, WU J. Local Com: A Community-based Epidemic Forwarding Scheme in Disruption-tolerant Networks[C]// *6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. 2009: 1-9.
- [15] CHEN K, SHEN H Y. Smart: Lightweight distributed social map based routing in delay tolerant networks[C]// *Proc. of the IEEEICNP 2012*. 2012: 1-10.
- [16] BULUT E, SZYMANSKI B. Exploiting friendship relations for efficient routing in mobile social networks[J]. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(12): 2254-2265.
- [17] YUAN S T, SUN J. Ontology-Based Structured Cosine Similarity in Speech Document Summarization[C]// *Proc. of IEEE/WIC/ACM Conference on Web Intelligence*. 2004.
- [18] OH S. An advanced taxi movement model in the working day movement for delay tolerate networks[J]. *Cluster Computing*, 2014, 17(3): 751-756.
- [19] RUBIN I, CHOI C. Impact of the location area structure on the performance of signaling channels in wireless cellular networks[C]// *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 1996: 1761-1765.
- [20] GONOOZI M, DASSANAYAKE P. User mobility modeling and characterization of mobility pattern[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(7): 1239-1252.

(上接第 65 页)