

DTN 网络环境下基于蚁群算法的数据编码分发

邓广宏^{1,2}, 曹万华^{1,2}, 张 剑², 冯 力², 程 雄²

(1. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 武汉数字工程研究所系统科研部, 湖北武汉 430074)

摘 要: 提出了一种 DTN 多源多宿网络的数据编码分发机制(Data Dissemination Mechanism with Network Coding Based on Ant Colony Algorithm, DDM-NC). 在发布/订阅机制的基础上, 通过对主题数据的编码运算和传输, 充分利用网络容量进行数据多播, 使得数据传输具有更好的安全性和传输效率; 同时, 针对编码包洪泛传输过程中信息冗余大, 无效投递较多等问题, 设计了基于蚁群算法的编码包路由策略, 引导编码包向信宿聚集, 降低编码投递过程中的数据冗余, 减少投递延迟. 仿真实验表明, 相比传统的 DTN 传染病路由策略和随机网络编码传输方法, DDM-NC 方法有更好的数据投递性能.

关键词: 延迟容忍网络; 随机网络编码; 蚁群算法; 数据分发

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)08-1636-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.028

Data Dissemination Mechanism with Network Coding Based on Ant Colony Algorithm in DTN Environment

DENG Guang-hong^{1,2}, CAO Wan-hua^{1,2}, ZHANG Jian², FENG Li², CHENG Xiong²

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Department of Scientific Research on System, Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: It proposed a data dissemination mechanism with network coding based on ant colony algorithm (DDM-NC), used in multi-source multi-sink delay tolerant network (DTN). Based on the publish/subscribe mechanism, the topic data were computed and transferred using network coding method, which can take full advantage of the network capacity to multicast, to improve security and efficiency of the transfer process. At the same time, for working out the problem of large data redundancy and vast invalid deliveries in the packages broadcast process, a package routing scheme based on ant colony algorithm was brought up, to guide the packages deliver to destinations, and cut down the data redundancy and deliver latency. The simulation results show that, compared with the traditional DTN epidemic routing and random network coding method, the DDM-NC method can get better data delivery performance.

Key words: delay tolerant network; random network coding; ant colony algorithm; data dissemination

1 引言

延迟容忍网络^[1,2] (Delay Tolerant Networks, DTN) 是为解决异构、不可靠网络环境下的数据传输问题而提出的一种覆盖型网络架构. 如战场网络就是一种典型的 DTN 网络. 网络编码^[3~5] 是 DTN 网络中一种新的数据传输方式, 自提出以来就得到了广泛的关注^[6~10]. 研究表明网络编码是解决一些特定网络中网络信息流问题的有效方法, 在提高网络利用率、减小传输延迟、增强网络安全、节省节点能耗等方面均有其优越性^[5]. R. Ahlswede 等^[3] 以“蝴蝶网络”为例, 阐述了网络编码的原

理并证明其带宽利用率可提高 33%. 李硕彦等人^[4] 指出, 对于一般的组播网络, 采用线性网络编码可以达到组播容量的上限.

目前, 网络编码在 DTN 网络中应用大都是基于单源多宿组播网络^[6], 而实际战场环境中往往是多源多宿复杂网络环境. 多源多宿网络中由于存在多个信源, 节点间、数据间存在相互的关联性, 增加了网络组播容量计算、网络编码设计的复杂性^[11]. 同时, 网络编码的洪泛传播机制也存在信息冗余, 无效传播, 数据拥塞等问题^[9], 易造成编码包丢失、投递率下降、时延增加, 影响投递性能.

战场网络中众多数据源产生的信息是海量的且是多种多样的,数据接收者可能只对其中几种信息感兴趣,若数据以广播或端对端的传输方式都会造成较大的网络负载和网络资源浪费.为此,研究人员提出了一种订阅分发机制^[12],在信息生产者和消费者之间建立一个高效、松耦合的信息分发渠道,增强信息传播的方向性和目的性,提高数据传输效率^[13].但订阅分发机制往往以数据路由的方式应用在可靠网络中提供数据分发服务^[14],在 DTN 网络中结合网络编码的数据分发机制还鲜有文献研究.针对战场网络等不可靠网络环境下的数据分发需求,本文结合网络编码和数据订阅分发机制,提出了一种 DTN 多源多宿网络数据编码分发方法.将 DTN 多源多宿网络分解为多个主题数据在单源多宿网络的数据分发过程;并将网络编码应用在主题包分发过程以提高网络利用率,降低数据冗余;同时在数据投递过程中采用蚁群算法,以订阅信息诱导数据包向信宿聚集,提高数据投递效率.

2 基于发布/订阅的数据编码传输

2.1 数据编码传输

本文采用随机网络编码^[5]方法进行数据分发.数据编码传输的数据包格式如图 1 所示.包头描述了包的属性信息,编码数据信息是采用编码向量经过编码计算后的值.

包头	编码向量	编码数据信息
hh...h	$\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_h$	$I(e)$

图1 随机线性网络编码的数据包格式

假设信源以组播率 h 发布 $P = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n\}$ 的主题包,在发布主题数据 \mathbf{p}_1 时,播出的信息为 $\{\mathbf{p}_{11}, \mathbf{p}_{12}, \dots, \mathbf{p}_{1h}\}$.向输出信道 $e \in E$ 传输的编码数据记为 $I(e)$, $e = (i, j)$, $i = tail(e)$, $j = head(e)$.

编码节点 k 为每个的输出信道 e 随机生成一个长度为 h 的编码向量 $\mathbf{n}_e = (\mathbf{n}_{e,1}, \mathbf{n}_{e,2}, \dots, \mathbf{n}_{e,h})$,则 $I(e)$ 为编码向量与主题数据的累积:

$$I(e) = \sum_{i=1}^h \mathbf{n}_{e,i} x_i, tail(e) = k \tag{1}$$

对应每个编码节点输出信道 e 上的编码向量 $\mathbf{n}_e = (\mathbf{n}_{e,1}, \mathbf{n}_{e,2}, \dots, \mathbf{n}_{e,h})$ 形成了一个随机网络编码的编码方案,记为 Ψ .

$\Psi = \{(\mathbf{n}_{1,1}, \mathbf{n}_{1,2}, \dots, \mathbf{n}_{1,h}), \dots, (\mathbf{n}_{i,1}, \mathbf{n}_{i,2}, \dots, \mathbf{n}_{i,h}), \dots, (\mathbf{n}_{l,1}, \mathbf{n}_{l,2}, \dots, \mathbf{n}_{l,h})\}$, $0 < i \leq |E|$, $(|\cdot|$ 为向量的元素个数).

信宿节点收到的编码数据是多个编码节点多次编码计算后形成的全局编码数据.

$$I(e) = \sum_{i=1}^h \mathbf{g}_i p_i \tag{2}$$

其中, $\mathbf{g}_i = \mathbf{n}_{e,i} \mathbf{M}_{k,i}$, $\mathbf{n}_{e,i}$ 为输出边 e 的编码向量的第 i 个元素, $\mathbf{M}_{k,i}$ 是节点 k 的第 i 个输入向量.

信宿节点收到的所有编码包的编码向量和编码值构成一个矩阵方程组.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_{11} & \mathbf{g}_{12} & \cdots & \mathbf{g}_{1h} \\ \mathbf{g}_{21} & \mathbf{g}_{22} & \cdots & \mathbf{g}_{2h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{g}_{n1} & \mathbf{g}_{n2} & \cdots & \mathbf{g}_{nh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

根据线性方程组的可解条件可知,若以 \mathbf{g}_{ij} 形成的编码向量矩阵为满秩,则信宿可实现数据解码.由于网络中传输的是编码数据,只有满足可解码条件才能获得原始信息,因此数据编码传输也有更好的数据安全性^[3].

2.2 主题数据发布

信源将信息分为不同的主题数据,每个主题数据包再根据信源组播率分解成若干主题编码包向邻接节点发布编码数据.编码包格式如图 2 所示.

包主题	包分组号
最长生存时间	主题扩散级别
主题无订阅生存时间	
编码向量	
编码数据信息	

图2 编码数据包格式

为减少网络信息冗余,每个主题数据根据信息的时效性设定最长生存时间和主题无订阅生存时间,时间耗尽则从网络中移除.主题扩散级别以数据包最大可中继次数表示,扩散级别越高则数据副本越多,建立发布/订阅关系的机会越大,但增加了网络负载和信息冗余.由于 DTN 网络采取“存储-携带-转发”的传输策略,数据包在节点中的滞留时间不可确定,因此对数据转发过程中的最长生存时间和主题无订阅时间进行调整:

$$Time_i(send) = Time_i(receive) - elapse_i \tag{4}$$

其中 $Time_i(receive)$ 表示数据包接收时的包生存时间, $elapse_i$ 表示数据包在节点 i 的滞留时间, $Time_i(send)$ 为数据包转发时的剩余生存时间.

节点对主题数据包的中继转发过程如表 1 所示.

表 1 主题数据包中继转发过程

Input:
Q_p : 节点的发布信息队列
$Q_{topic-pub}$: 主题 topic 的发布信息队列
$Q_{topic-sub}$: 主题 topic 的订阅信息队列
$P_{topic-pub}$: 主题 topic 的发布数据包
$P_{topic-sub}$: 主题 topic 的订阅数据包
Steps:

```
1. if (  $Q_p$  is full );
2.  执行 2.4 节描述的包丢弃策略
3. endif
4. if (  $p_{topic-sub}$  未达到包最长生存时间、无订阅生存时间、主题扩散级别 )
5.    $p_{topic-sub} \rightarrow Q_{topic-sub}$ 
6. else return;
7. end if
8. 建立发布队列和订阅队列中主题数据的发布/订阅关系
9. if (  $Q_{topic-sub}$  is not empty )
10.  选择  $Q_{topic-sub}$  中信息素较高的前 50% 的订阅包,沿订阅路径转发
11. else
12.  随机生成编码向量,根据公式(2)对  $Q_{topic-sub}$  中的发布包生成编码包
13.  根据第 3 节描述更新编码包信息素,并向邻接节点转发.
14. end if
```

2.3 主题数据订阅

信宿根据信息需求订阅不同的主题数据,生成订阅包向网络扩散,告知主题数据的订阅源,订阅包数据格式如图 3 所示.订阅包扩散过程中采用蚁群算法以订阅信息素引导主题数据包向信宿聚集,以降低网络信息冗余、减少投递时延.

订阅主题	最长生存时间
订阅信息素	
转发路径	
.....	

图3 主题订阅数据包格式

订阅信息素反映了订阅路径的信道质量,订阅信息素越大说明链路传输质量越好,因此,应充分利用链路传输能力对投递数据量进行分配:

$$D_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} |g| \tag{5}$$

式中 D_i 表示向第 i 个订阅路径转发的编码包数量; $|g|$ 是节点编码向量的长度,表示节点需产生的编码包的数量; δ_i 为订阅包的信息素值.

节点对订阅包的处理流程如表 2 所示:

表 2 订阅数据包处理过程

```
Input:
 $Q_s$ : 节点的订阅信息队列
 $Q_{topic-sub}$ : 主题 topic 的发布信息队列
 $Q_{topic-sub}$ : 主题 topic 的订阅信息队列
 $p_{topic-sub}$ : 主题 topic 的发布数据包
 $p_{topic-sub}$ : 主题 topic 的订阅数据包
Steps:
1. if (  $Q_s$  is full );
2.  执行 2.4 节描述的包丢弃策略
```

```
3. endif
4. if (  $p_{topic-sub}$  未达到包最长生存时间 )
5.    $p_{topic-sub} \rightarrow Q_{topic-sub}$ 
6. else return;
7. end if
8. if (  $Q_{topic-sub} \geq 1 \& Q_{topic-sub} > 1$  )
9.  随机生成编码向量,根据公式(2)对  $Q_{topic-sub}$  中的发布包生成编码包
10.  根据第 3 节描述更新编码包信息素.
11.  选择  $Q_{topic-sub}$  中信息素较高的前 50% 的订阅包,按式(5)分配编码包投递数量,沿订阅路径转发
12. esle if (  $Q_{topic-sub} = 1$  )
13.  直接向订阅路径中的节点转发
14. esle
15.  继续向邻接节点扩散订阅包,并按第 3 节描述更新订阅包信息素
16. end if
```

订阅转发过程中,中继节点的每次订阅转发都会选择当前状态下信息素较高的订阅包进行编码投递,这种动态选择机制也确保在动态网络中数据包总能选择当前最佳路径传播.

2.4 节点信息队列维护

每个节点维护两个信息队列:订阅信息队列和发布信息队列,分别存储节点收到的主题数据发布包和订阅包,并据此建立发布/订阅关系.

当订阅信息队列满时,则采用如下丢弃策略:

(1)时效性丢弃:若达到订阅包的最长生存时间,则自动丢弃该订阅包.

(2)失效丢弃:若信宿译码完成或订阅变更,节点收到订阅撤销信息,则丢弃该订阅包.

(3)强制丢弃:若上述丢弃操作后仍不满足信息存储需求,则强制丢弃队列中订阅信息素最小的订阅包.订阅信息素小则信道质量差,数据可达率越低.

发布信息队列采用如下丢弃策略:

(1)时效性丢弃:若达到发布包的最长生存时间或主题无订阅时间,则丢弃该发布包.

推论 1 节点对收到的同一主题同一分组的数据包进行编码输出的数据包个数达到输入编码包向量矩阵的秩后,则无须再进行编码输出.

证明 假定某主题某分组的编码数据为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,节点接收到的所有编码数据包为 $\{[a_{11}, \dots, a_{1n}], [a_{21}, \dots, a_{2n}], \dots, [a_{k1}, \dots, a_{kn}]\}$,编码向量矩阵的秩为 $m (m \leq n, m \leq k)$:

$$m = rank \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

随机网络编码操作是对上述编码向量的线性运算,在此基础上形成的新的编码矩阵的秩都不可能大于 m ,因此无需再进行编码输出。

(2)强制丢弃:根据推论 1,节点首先丢弃编码输出达到输入编码向量矩阵的秩的发布包,再选择丢弃节点中滞留时间最长和订阅次数最少的发布包。

2.5 信宿节点译码

本节讨论采用基于主题的发布/订阅方式进行数据编码分发时,信宿节点能否实现数据解码。

推论 2 在有限域足够大的情况下,DTN 多源多宿网络中采用基于主题发布/订阅的数据编码分发方法,信宿可解码的概率趋近于 1。

证明 文献[5]证明了在有限域足够大时单源多宿网络中采用随机网络编码进行数据传输,信宿可解码概率趋近于 1。将文中的数据订阅分发过程按主题数据流分解为若干简单的编码分发网络,每个分发网络由一个主题发布源、若干个订阅信宿和中继节点构成。每个主题数据包的编码分发过程与其它节点和其它主题无关。因此,可将多源多宿编码分发网络分解为若干单源多宿网络的编码传输过程。

以图 4 所示节点网络为例,信源 b 发布主题数据包 p ,信宿 x, y 订阅该主题数据, b 向 2,3,5,4,9,6,8 节点发布了数据包 p , x, y 的主题订阅包扩散过程中途经 7,11,12,1,8,9,6 等节点,并在 8,9,6 节点建立发布/订阅关系向信宿投递。数据包 p 分发过程中所有途经节点构成一个单源多宿编码传输网络,根据文献[5]的证明, x, y 的可解码率趋近于 1。以此类推,各主题的订阅分发都可视为一个独立的单源多宿网络编码传输过程,因此信宿可解码概率都趋近于 1。

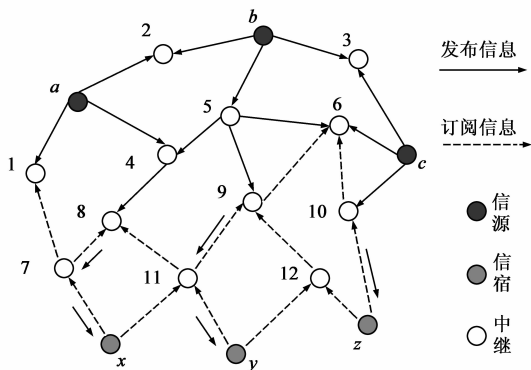


图4 数据传输示意图

当信宿接收到的数据包达到可解码数量时,判断编码向量构成的编码矩阵是否满秩,若为满秩则根据公式(3)计算得到信源发出的原始数据;若不是,则随机选择一个输入节点请求重新编码计算后发送一个新的编码包,信宿节点再进行数据解码。

3 基于蚁群算法的编码包路由

本文采用蚁群算法优化订阅分发的路由选择过程,以订阅信息素引导主题数据包向订阅源投递,降低数据洪泛造成的信息冗余,提高数据投递效率。

订阅信息素综合反映数据传输过程中的中继次数、传输时延和携带转发时延等要素。中继次数越多说明投递路径越远;传输时延长说明信道可靠性差,带宽低;携带转发时延长说明节点相遇概率低,投递率差。订阅信息素更新策略如下:

$$p_j(tpc - d_k) = (p_i(tpc - d_k)(1 - \frac{t_{delay}}{TTL_{tpc - d_k}}))^{\alpha}(1 - \frac{\tau}{TTL_{tpc - d_k}}) \quad (7)$$

其中, $i, j, k \in V, (i, j) \in E$, 节点 k 发布的主题为 $tpc - d_k$ 的订阅包从节点 i 向 j 传播, $p_i(tpc - d_k), p_j(tpc - d_k)$ 分别为节点 i, j 中 $tpc - d_k$ 订阅包的信息素, t_{delay} 为订阅包在节点 i 中的携带时延, $TTL_{tpc - d_k}$ 为订阅包最长生存时间, $\alpha = 1/\text{主题扩散级别}$, τ 为订阅包由 i 向 j 的传输时延,在本地节点统计获得。

订阅包在节点滞留期间,信息素更新策略如下:

$$p_i(tpc - d_k) = (p_i(tpc - d_k)(1 - \frac{t_{delay}}{TTL_{tpc - d_k}}))^{\alpha} \quad (8)$$

为避免信息素较低但有价值的订阅包长期无法订阅到主题数据(如离信源较远有较强信息需求但中继次数多、携带转发时延长的订阅包),对已订阅到数据的订阅包信息素进行弱化,每次完成订阅后将其信息素减半:

$$p_i(tpc - d_k) = p_i(tpc - d_k)/2 \quad (9)$$

在后续的数据投递过程中,信息素较低的订阅包将会因其信息素浓度相对升高而获得订阅机会。

4 仿真实验

4.1 仿真环境

本文在 ONE^[15] 仿真环境下设计了一个典型的微缩型战场 DTN 网络场景:在半径为 2000m 的区域内随机分布若干移动侦察节点,节点运动符合 RandomWaypoint 移动模型,有效通讯距离为 1~5m,缓存为 5MB。区域内分布着一些沿路径移动的车载汇聚节点,节点运动符合 MapBasedMovement 移动模型,有效通讯距离为 1~20m,缓存为 20MB。此外,还有少量固定的数据中心执行数据收集和处理,其有效通讯距离为 1~100m。所有节点可发布、订阅和中继数据,仿真过程中分别都选取 10% 的节点作为信源和信宿,其余为中继节点。DDM-NC 方式下的部分仿真参数如表 3 所示。

仿真过程中,各节点按设定的移动方式在区域内移动,信源节点分别以路由或网络编码的方式向信宿

投递 1000 个大小为 100kB~1MB 的主题数据包, 信宿统计接收数据量和接收时间, 然后根据信源的发送数据量和发送时间计算数据投递率和投递延迟, 仿真结束时, 统计所有节点的缓存数据量, 再根据发布数据量计算各种方法的数据冗余率。

表 3 部分仿真参数配置

配置项	说明	数值
Scenario. nrofHostGroups	节点分组数	3
btInterface1. transmitRange	组 1 链路传输距离	1,5m
btInterface2. transmitRange	组 2 链路传输距离	1,20m
btInterface3. transmitRange	组 3 链路传输距离	1,100m
Group1. bufferSize	组 1 节点缓存大小	5MB
Group1. interface	组 1 节点传输设置	btInterface1
Group1. nrofHosts	组 1 节点数	80
Group1. movementModel	组 1 节点移动模型	RandomWaypoint
Group2. nrofHosts	组 2 节点数	15
Group2. interface	组 2 节点传输设置	btInterface2
Group2. movementModel	组 2 节点移动模型	MapRouteMovement
Group2. bufferSize	组 2 节点缓存大小	20MB
Group3. nrofHosts	组 3 节点数	5
Group3. interface	组 3 节点传输设置	btInterface3
Group3. movementModel	组 3 节点移动模型	StationaryMovement
Group3. bufferSize	组 3 节点缓存大小	100MB

4.2 结果分析

本文对 DTN 网络环境下的传染病路由 (Epidemic Routing, ER), 随机网络编码传输 (Random Network Coding, RNC) 和基于蚁群算法的数据编码分发方法 (DDM-NC) 进行了仿真实验, 分析了三种方法的数据投递率、投递延迟和数据冗余率。

图 5、图 6 和图 7 是 ONE 仿真环境中 ER、RNC、DDM-NC 三种方法随网络节点数变化的数据投递率、投递延迟和数据冗余率的对比分析。随节点密度增加, 信源信宿间的投递路径增多, 投递成功率更高, 但投递转发次数增多, 数据冗余率增大, 投递时延更长。ER 方法采用多副本洪泛, 造成网络中存在大量冗余数据包, 影

响了投递率和投递延迟等投递性能。RNC 采用洪泛编码传输的策略, 数据冗余率较低, 但编码包洪泛传播容易造成网络中无效数据包过多, 解码时延过长, 投递率下降等问题。DDM-NC 采用编码分发策略, 以蚁群算法引导数据包向信宿投递, 编码包相对集中的向信宿传播, 因此相比 RNC, DDM-NC 方法投递性能更优。

为验证算法在节点速度加快、网络变化加剧情况下的数据投递性能, 对比分析了 100 个网络节点时三种方法随节点移动速度变化的数据投递率、投递延迟和数据冗余率, 如图 8、图 9、图 10 所示。

节点移动速度增加使得节点间链路变化更频繁, 但节点相遇并转发数据的机会增多。ER 方法中, 传输链路的频繁变化造成数据冗余增多, 丢包增加, 投递率降低, 但节点移动加快使得携带转发时延变短, 投递时延降低。RNC 方法中数据以网络编码方式传输, 冗余数据包相对减少, 平均延迟和投递率都略好于 ER 方法, 但节点移动加剧也造成编码包扩散范围加大, 无效投递增多。DDM-NC 采用蚁群算法引导编码包向信宿投递, 冗余率较低, 移动速度加快使得信源与信宿间的连通路径增多, 信宿收集编码包的机会增多, 投递率增高; 然而移动加剧也使得算法寻径时投递路径频繁选择和变更, 增加了处理开销, 因此数据投递率和投递延迟不再有明显提升; 但相比 ER 和 RNC, DDM-NC 方法仍能获得较好的投递率和较低的投递延迟。

5 结论

结合网络编码和数据发布/订阅机制提出了一种 DTN 多源多宿网络基于蚁群算法的数据编码分发方法。该方法以网络编码的方式进行数据分发, 并在数据投递过程中采用蚁群算法进行编码包路由, 以订阅信息索引引导编码包向信宿聚集。该方法弥补了传统路由方法对网络资源利用不充分, 数据重传风险大等缺点; 同时也弥补了随机网络编码方法在编码包洪泛过程信息冗余大, 无效编码投递多, 投递效率低等问题。最后在 DTN 仿真环境中进行了仿真实验, 结果表明, 该方法有良好的数据投递性能。

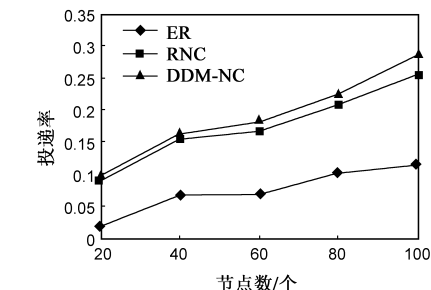


图5 数据投递率随节点增加的性能比较

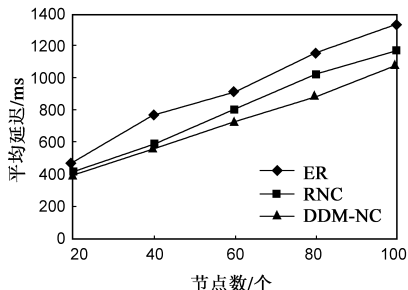


图6 平均投递延迟随网络规模变化的性能比较

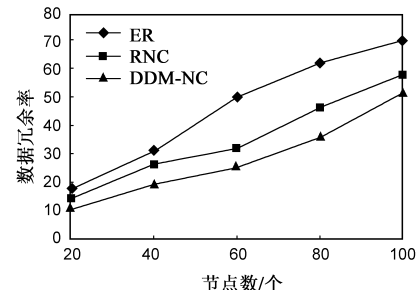


图7 数据冗余率随节点增加的性能比较

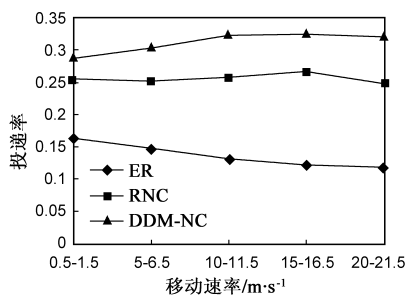


图8 数据投送率随节点移动速度变化的性能比较

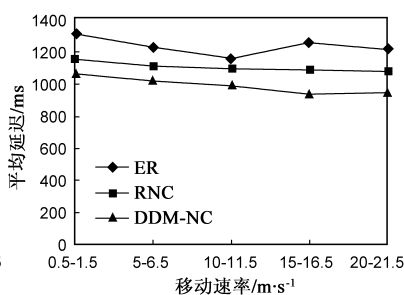


图9 平均投递延迟随节点移动速度变化的性能比较

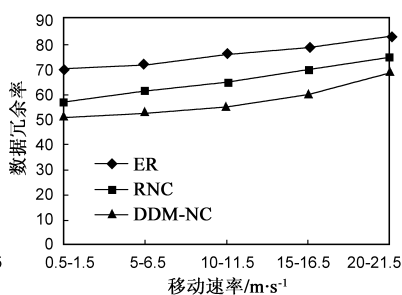
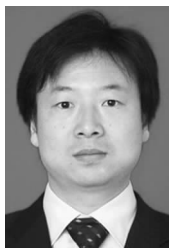


图10 数据冗余率随节点移动速度变化的性能比较

参考文献

- [1] Fall K. A delay tolerant network architecture for challenged internets[A]. Proc of the 2003 Conf on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications [C]. Karlsruhe, Germany: ACM, 2003. 27 – 34.
- [2] 熊永平, 等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124 – 137.
Yongpin Xiong, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124 – 137. (in Chinese)
- [3] Ahlswede R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204 – 1216.
- [4] Shuo Yen Robert Li, et al. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371 – 381.
- [5] Tracey H, Muriel M'E, Ralf K, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(10): 4413 – 4430.
- [6] 蒲保兴, 杨路明, 王伟平. 网络拓扑未知环境下确定性网络编码数据传输[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2119 – 2124.
Baoping Pu, Luming Yang, Weiping Wang. A deterministic data transmission approach with network coding under unknown network topology[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2119 – 2124. (in Chinese)
- [7] 卢冀, 吴成柯, 肖嵩, 等. 基于机会式网络编码的高效广播传输算法[J]. 通信学报, 2012, 33(1): 64 – 70.
Ji Lu, et al. Efficient broadcast transmission algorithms based on opportunistic network coding[J]. Journal on Communications, 2012, 33(1): 64 – 70. (in Chinese)
- [8] Salim E L Rouayheb, Alex Sprintson, Costas Georgiades. Robust network codes for unicast connections: a case study[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(3): 644 – 656.
- [9] Bao Chun Li, Di Niu. Random network coding in Peer-to-Peer networks: from theory to practice[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(3): 513 – 523.
- [10] Fong S L, et al. Variable-rate linear network coding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2010, 56(6): 2618 – 2625.
- [11] Youail, R S, Wenqing Cheng, Shaoguo Tao. Cost minimization for multi-source multi-sinks network coding[A]. ICYCS 2008 [C]. Hunan, China: IEEE, 2008. 253 – 258.
- [12] Eugster P T, Felber P A, Guerraoui K, Kermarrec A M. The many faces of publish/subscribe[J]. ACM Computing Surveys, 2003, 35(2): 114 – 131.
- [13] 朱金奇, 等. 延迟容忍传感器网络中面向发布/订阅系统的事件传输[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1954 – 1967.
Jinqi Zhu, et al. Event delivery in publish/subscribe system for delay tolerant sensor networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(8): 1954 – 1967. (in Chinese)
- [14] 苏金树, 胡乔林, 赵宝康, 等. 容延容断网络路由技术[J]. 软件学报, 2010, 21(1): 119 – 132.
Jinshu Su, Qiaolin Hu, Baokang Zhao, et al. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(1): 119 – 132. (in Chinese)
- [15] Ari Kerönen, et al. The ONE Simulator for DTN protocol evaluation[A]. SIMUTools 2009[C]. Rome, Italy: ICST, 2009.

作者简介



邓广宏 男, 1981 年 9 月出生, 湖北钟祥人. 2006 年毕业于哈尔滨工业大学计算机系, 其后在武汉数字工作研究所从事电子信息系统设计工作, 2010 进入哈尔滨工程大学计算机系. 现为博士研究生, 从事机会网络及电子信息系统方面的有关研究.

E-mail: stephenden@163.com



曹万华 男, 1966 年 1 月出生, 江苏金坛人. 研究员、博士生导师、总装备部舰船系统技术专业组、海军预研电子信息装备专家组成员. 1987 年、1990 年分别在华中工学院、中国舰船研究院获工学学士和硕士学位. 现为武汉数字工作研究所副所长, 主要从事综合电子信息系统、舰载指控系统等技术研究.