

节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略

吴大鹏, 张普宁, 王汝言

(重庆邮电大学 宽带泛在接入技术研究所, 重庆 400065)

摘要: 利用节点保存的相遇历史信息, 提出一种节点连接态势感知的消息传输策略, 通过建立时序图模型估计节点间的连接态势, 以时延、投递率以及负载率为联合优化目标参数, 采用均衡和量化方法, 为消息分布式地选择最佳中继节点。仿真结果表明, 所提出的消息传输策略能够有效降低网络负载 48% 以上, 并改善消息投递率和平均时延性能。

关键词: 机会网络; 节点连接态势; 时序图模型; 消息转发效用值

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)03-0044-09

Connection status aware cost efficient message transmission mechanism in opportunistic networks

WU Da-peng, ZHANG Pu-ning, WANG Ru-yan

(Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A novel connection status aware cost efficient message transmission mechanism (CSAMT) was proposed. The presented mechanism constructed a dynamic temporal graph matrix based on historical data stored in the cache of the peers to estimate the connection status. Furthermore, the delay, delivery ratio and overhead together were selected as object optimizing parameters, and then the preferable relay peers could be distributively chosen by adopting equalization and quantification schemes proposed. Numerical results show that CSAMT mechanism can efficiently reduce overhead for more than 48% while the message delivery ratio and latency are improved also.

Key words: opportunistic networks; connection status; temporal graph matrix; message forwarding weight

1 引言

随着各种智能设备的大量涌现, 移动自组织网络 (MANET, mobile ad hoc network) 得到了快速的发展, 内置蓝牙或 Wi-Fi 模块的移动终端可自组织成各种微型网络, 以实现数据共享和交互^[1], 其应用范围包括交通状况信息交互^[2]、野生动物监控^[3,4]、偏远地区无线网络接入^[5,6]等。但是, 在移动自组织网络中, 节点间转发数据之前需建立端到端路径^[7], 由于网络稀疏、节点快速移动和通信范围受限等因素, 源节点和目标节点间的路径经常出现断裂, 导致节点之间无法通信。为实现该种环境下的通信,

充分利用节点移动过程所带来的相遇机会, 研究人员提出了机会网络体系结构^[8]。

机会网络的概念部分继承于延迟容忍网络 (DTN, delay tolerance network), 其数据转发形式与系统架构具有延迟容忍网络的一般化特征, 但针对机会网络的相关研究强化了对节点高速移动、拓扑快速变化的网络环境的适应性, 以满足复杂动态场景下的通信需求。机会网络中节点转发数据前不需建立端到端路径, 与 MANET 所采用的存储—转发通信模式不同, 机会网络采取更为灵活的存储—携带—转发模式进行通信。显然, 通信过程充分利用了节点随机移动带来的相遇机会, 有效地克服了

收稿日期: 2011-11-20; 修回日期: 2012-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61001105, 60972069); 重庆市教委基金资助项目 (KJ100521)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61001105, 60972069); The Projects of the Education Council of Chongqing (KJ100521)

端到端路径失效所造成的通信中断问题。但是，机会网络在增加通信灵活性的同时，也为路由协议的设计带来了巨大的挑战。

目前，针对机会网络的特点，国内外的研究人员提出了多种路由机制。根据相同消息在网络中的分布情况，可以将这些机制分为 2 类：多副本机制和单副本机制。文献[9]指出多副本机制拥有较低的时延和较高的可靠性，但其占用了大量的网络带宽及缓存空间，消耗了节点大量能量，不适用于资源受限的机会网络。文献[10]对当前的单副本机制进行了深入研究，指出在节点能量及带宽受限的情况下，单副本路由策略在网络资源开销方面具备较强的优势。然而，机会网络中的链路具有间断连接特性，单副本机制的设计需要考虑多种因素，以合理地选择中继节点，达到有效降低网络资源开销的目的。目前，单副本路由机制中比较具有代表性的是 PROPHET 机制^[11]，其基本原理是根据节点运动过程历史信息，利用概率传递性预测相遇状态，进而决定消息的转发。但是，与其他类型的通信网络路由协议研究类似，所提出的 PROPHET 机制采用静态抽象图建立网络中节点和链路之间的关系^[12]。对于机会网络中的节点来说，随机运动过程使得节点间的链路具有时变特性，传统的静态抽象图无法准确、及时地反映链路随时间的变化情况，导致相关路由机制无法有效工作^[13]。

本文提出了一种适用于机会网络的消息转发策略 CSAMT(connection status aware message transmission)，节点根据历史态势信息建立时序图模型，描述与网络中各个节点之间的关系，并动态地以多维方式感知节点间的连接态势，其中，包括可达率、时延及跳数 3 个方面因素，利用所提出的均

衡方法，经过非均匀量化，进而以分布式的方式对消息转发进行决策。

2 时序图模型

传统静态图方法将节点间非同时出现的链路聚合为非时变的连接图。然而，网络拓扑动态改变是机会网络的内在属性，这种静态或聚合的分析方法忽略了节点间连接出现的时间顺序，使得节点间可用的通信路径被严重高估。时序图模型将传统的非时变静态图以时间顺序划分为一系列有限的离散时间序列图，以反映机会网络拓扑动态演进过程和趋势，进而，感知节点的运动规律及连接态势。

采用静态图方法将节点运动过程进行抽象的结果如图 1(a)所示，随机运动的节点作为图 1(a)中的顶点，节点之间的相遇过程则抽象为边，其中， e_i 表示节点之间通过随机运动过程产生连接。

时序图模型可将上述多个节点之间的运动过程表示为 $G = \langle V(G), E(G), j(G) \rangle$ ，其中， $V(G) = \{A, B, C, D, E\}$ ， $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$ ， $j(G): E \rightarrow V \times V$ ，如图 1(b)所示，可知，图 G 为无向简单图。图 $G_{T_i} = \langle V(G_{T_i}), E(G_{T_i}), j(G_{T_i}) \rangle$ 为 T_i 时刻的时间序列图，其中， $V(G_{T_i}) \subset V(G)$ ， $E(G_{T_i}) \subset E(G)$ ， $j(G_{T_i}): E(G_{T_i}) \rightarrow V(G_{T_i}) \times V(G_{T_i})$ ，且图 G_{T_i} 为 G 的真子图。连接序列图中对应节点间的虚线为时间演进边，其权值如式(1)所示，表示为节点的相遇间隔时间。

$$w[V(G_{T_i})] = T_{i+1}[V(G_{T_i})] - T_i[V(G_{T_i})] \quad (1)$$

图 1(a)中存在节点 A 经边 e_3 、 e_6 投递消息到达节点 B 的路径，而由图 1(b)可知，边 e_6 先于 e_3 出现，此时 A 尚未与节点 D 相遇，进而，节点 B 就无法

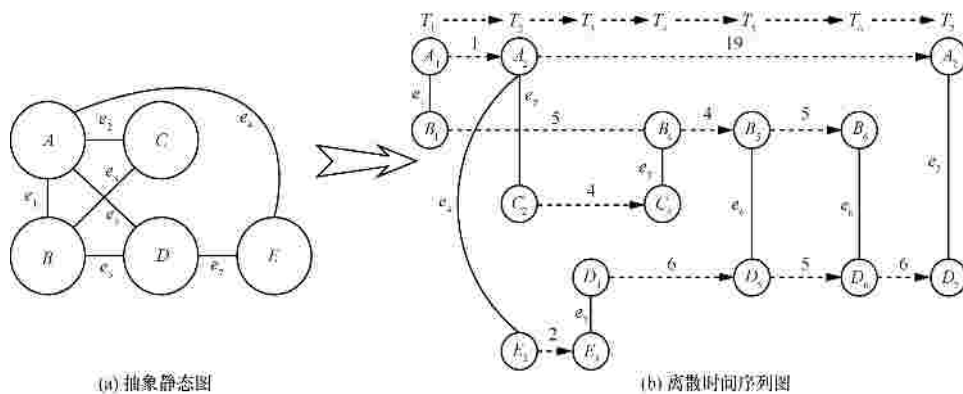


图 1 时序图转化过程

通过节点 D 收到来自于节点 A 的消息。显然，静态抽象图方法忽略了节点相遇间隔、相遇频率及连接出现的先后顺序，视节点间的连接为同时存在，过高地估计了节点间存在的通信链路。图 1(b)所示的时序图保存了节点相遇时间间隔、相遇频率及连接次序等信息，忽略实际中并不存在的通信路径，为准确分析节点间连接态势提供了依据。

机会网络中节点相遇状态在时间域内连续可变，为了便于分析，可将其抽象为离散化状态，每个节点在本地缓存内保存相遇信息列表，如表 1 所示，其中包含相遇节点的 ID 号及相遇时间。

表 1 相遇信息

节点	相遇时间
N_1	T_1
N_2	T_2
⋮	⋮
N_i	T_i

与机会网络中的消息转发原理类似，当随机运动的节点相遇之后，交换彼此缓存内的相遇信息列表，该列表相对消息较小，其传输开销可忽略不计。网络状态在有限的时间尺度内趋于稳定，通过不断地交换相关信息，节点能够近似地获知全网的节点相遇状态，进而，以获得的相遇时间顺序为轴线即可得到网络连接态势时序。其建立过程分为 2 个步骤进行。1) 状态点创建。在每个相遇时刻，为网络中的每个节点创建相应的状态点。如节点 A 发生了 3 次相遇事件，则在时序图中分别在 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻建立 A_1 、 A_2 、 A_3 3 个状态点；2) 建立关联。以沿时间顺序的有向虚线连接相同节点的不同状态点，每一条虚线的权值为前后相遇时刻的差值，代表 2 个状态点之间的时间距离，再以无权重的无向实线连接当前时刻相遇的两节点的状态点，即可建立不同状态点之间的关联。

3 网络状态感知方法

对于采用存储—携带—转发消息传输方式的机会网络来说，节点随机运动使得网络状态具有时变特性，中继节点的选择至关重要，需要考虑当前网络状态。通常，节点间的相遇间隔时间、网络负载率以及可达率为典型的网络状态表征参数，中继节点选择过程中需要对三者进行综合考虑。

根据时序图 G_{T_i} 中相关信息，由时间演进边

$e_{T_i}[V(G_{T_i})]$ 的对应权值 $w[V(G_{T_i})]$ ，可获知任意节点之间的相遇间隔时间估计值 $P(i, j)$ ，如式(2)所示。

$$P(i, j) = \sum p(i, j, T_i, \text{null}) / n, p(i, j, T_i, \text{null}) \neq \text{null} \quad (2)$$

其中， $p(i, j, T_i, \text{null})$ 表示给定时刻 T_i ，节点 i 在 T_i 后任意时刻与节点 j 的最短相遇间隔时间。节点随机移动使得节点之间在不同时刻可能多次相遇，本文选取各次相遇间隔时间的均值用于相遇间隔时间估计过程。

其次，网络负载率反映了成功投递消息所需的转发次数，其定义如式(3)所示，其中， g 为网络负载率， N_{del} 为转发的消息总数， n_s 为成功投递到目标节点的消息数。可见，转发次数越多，则网络负载率越大。

$$g = (N_{\text{del}} - n_s) / n_s \quad (3)$$

根据时序图 G_{T_i} 中的相关信息，采用最短路径算法可获知任意节点间投递消息所需的跳数 $G(i, j)$ ，如式(4)所示。

$$G(i, j) = \sum g(i, j, T_i, \text{null}) / n, g(i, j, T_i, \text{null}) \neq \text{null} \quad (4)$$

其中， $g(i, j, T_i, \text{null})$ 为给定 T_i 时刻，节点 i 在 T_i 后任意时刻投递消息到达节点 j 所需的最小跳数。通过比较消息到达目标节点所需的平均跳数，选择所需跳数较少的节点作为中继节点进行消息转发，能够有效减少网络负载。

网络中任意节点间可能存在多条潜在通信链路，源节点与目标节点间存在的潜在通信路径越多，则消息被成功投递的概率越高。因此，网络中任意两节点间的相对可达率 $V(i, j)$ 如式(5)所示。

$$V(i, j) = \text{Nrof}\{g(i, j, T_i, \text{null}) \neq \text{null}\} / n \quad (5)$$

其中， $V(i, j)$ 表示在节点 i 的 n 次相遇中存在从节点 i 到节点 j 的路径的概率。显然，若节点到达目标节点的 V 值越大，消息由该节点转发到达目标节点的成功率越高。

4 消息传输策略

根据动态时序图模型及所感知的相关网络状态，本部分对节点转发消息的能力进行分析，并综合考虑多个因素对消息转发过程的影响，然后利用非均匀量化方法获得转发消息的相对能力，进而更加合理地选择中继节点，完成对消息转发。

4.1 节点转发消息能力分析

根据建立的时序图模型，节点能够利用保存的历史信息，估计消息到达网络中任意节点的期望时延、平均跳数及相对可达率。然而，机会网络中节点随机移动，本地监测结果无法准确反应网络中其他节点状态，需要以分布式的方式感知整个网络范围内节点间的连接态势，进而预测节点转发消息的能力。

机会网络中的各个节点独立地进行随机运动，节点相遇之后彼此交换本地时序图相关信息，随着运动过程的持续，节点能够获知网内其他节点的相关连接状态。

从时延角度来说，中继节点的选择应以最小化时延为目标，因此，定义网络中节点投递消息到达给定节点 j 的最小时延 $P_{\min}(j)$ 如式 (6) 所示。

$$P_{\min}(j) = \min\{P(i, j), i = A, B, C, L\} \quad (6)$$

通过所建立的时序图模型，可获知到达节点 j 的最小时延，进而获知在整个网络内，各个节点在消息转发时延方面的相对能力，即时延度 $W_p(i, j)$ ，如式 (7) 所示，从定义可知，节点相遇间隔时间越长，则节点投递消息到目标节点的期望时延越大，即式 (7) 中 $P(i, j)$ 越大，则其针对节点 j 的时延度 $W_p(i, j)$ 就越小。

$$W_p(i, j) = P_{\min}(j) / P(i, j) \quad (7)$$

同理，从网络负载角度来说，需选择到达目标节点跳数最少的节点作为中继节点，利用时序图模型，通过式 (8) 可获知到达节点 j 所需的最小跳数。

$$G_{\min}(j) = \min\{G(i, j), i = A, B, C, L\} \quad (8)$$

节点 i 针对 j 在转发跳数方面的相对能力，即中继度 $W_g(i, j)$ 如式 (9) 所示。

$$W_g(i, j) = G_{\min}(i) / G(i, j) \quad (9)$$

节点 i 转发消息到达节点 j 所需的平均跳数越多，即式 (9) 中 $G(i, j)$ 越大，则其对节点 j 的中继度 $W_g(i, j)$ 越弱，经节点 i 转发消息到 j 的网络开销越大。

与时延和跳数不同，针对节点 j 的相对可达率 $V_{\max}(j)$ 可定义为网络中的所有节点在有限次机会内与节点 j 相遇的最大概率，如式 (10) 所示。

$$V_{\max}(j) = \max\{V(i, j), i = A, B, C, L\} \quad (10)$$

进而，节点 i 转发消息到节点 j 的能力，即可达度 $W_v(i, j)$ 如式 (11) 所示，节点 i 转发消息到达节点 j 的相对可达率 $V(i, j)$ 越大，则可达度 $W_v(i, j)$ 越高，经该节点成功转发消息到达节点 j 的概率越大。

$$W_v(i, j) = V(i, j) / V_{\max}(j) \quad (11)$$

4.2 节点转发消息效用值均衡及量化方法

机会网络的网络性能与所采取的消息传输策略直接相关，其中，中继节点的选择至关重要，需要综合考虑时延度、中继度与可达度 3 个方面因素，使所提消息传输策略获得较好的网络性能。

对于由三维向量组成的空间来说，若将一组由 3 个空间向量构成的线性无关向量组作为基底，则该几何空间中的任意元素都可以唯一地表示成这一向量组的线性组合^[14]。以本节点为坐标原点，与 3 个不共面的向量 $\vec{e}_p, \vec{e}_g, \vec{e}_v$ 构成空间的一个仿射标架 $[O; \vec{e}_p, \vec{e}_g, \vec{e}_v]$ ，如图 2 所示。

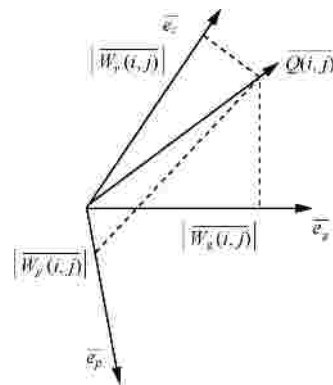


图 2 节点转发消息效用度抽象模型

其中， $\vec{e}_p, \vec{e}_g, \vec{e}_v$ 为坐标向量，则空间中的任一自由向量对 $\vec{e}_p, \vec{e}_g, \vec{e}_v$ 分解系数构成的有序数组为该向量的仿射坐标。如前所述，节点转发消息的能力与时延度、中继度及可达度密切相关，可将三者视为以本节点为坐标原点，方向指向目标节点的空间向量，但三者必须满足不共线和不共面的约束条件，具体证明过程如下。

假设时延度与中继度共线，则可推得式 (12)。

$$\vec{W}_p(i, j) = l \vec{W}_g(i, j) \quad (12)$$

进而，得到式 (13)。

$$|\vec{W}_p(i, j)| = l |\vec{W}_g(i, j)| \quad (13)$$

由式 (1)、式 (3)、式 (5)~式 (8) 可进一步推得式 (14)。

$$p(i, j, T_k, \text{null}) = l \times g(i, j, T_k, \text{null}) \quad (14)$$

根据时序图 G_{T_k} 中对 $p(i, j, T_k, \text{null})$ 及 $g(i, j, T_k, \text{null})$ 的定义可知, 不存在同一 l 使得 $p(i, j, T_k, \text{null})$ 与 $g(i, j, T_k, \text{null})$ 在不同的 T_k 时刻均满足线性关系, 因此, 时延度与中继度不共线。同理可证得可达度与中继度不共线。

再设 $W_p(i, j) = (x_1, y_1, z_1)$ 、 $W_v(i, j) = (x_2, y_2, z_2)$ 及 $W_g(i, j) = (x_3, y_3, z_3)$ 线性相关, 则存在一组不全为零的数 K_1, K_2, K_3 使得式 (15) 成立。

$$K_1 W_p(i, j) + K_2 W_v(i, j) + K_3 W_g(i, j) = 0 \quad (15)$$

若 K_1, K_2, K_3 中, 最后一个不为零的数为 K_n , 显然 $n \neq 1$, 若 $n = 1$, 因 $K_1 \neq 0, W_p(i, j) \neq 0$, 故 $K_1 W_p(i, j) \neq 0, 1 < n \leq 3$ 。

若 $K_2 \neq 0$, 则 $K_1 W_p(i, j) + K_2 W_v(i, j) = 0$, 即 $W_v(i, j) = -K_1/K_2 W_p(i, j)$, 与所得 $W_v(i, j)、W_p(i, j)$ 不共线矛盾, 故 $K_2 = 0$ 。

再设 $K_3 \neq 0, \partial = -K_1/K_3, b = -K_2/K_3$, 则存在唯一的实数对 (∂, b) 满足式 (16)。

$$W_g(i, j) = \partial W_p(i, j) + b W_v(i, j) \quad (16)$$

由此可知,

$$|W_g(i, j)| = \sqrt{(\partial x_1 + b x_2)^2 + (\partial y_1 + b y_2)^2 + (\partial z_1 + b z_2)^2}$$

由式 (4)、式 (8)、式 (9) 可进一步推得式 (17)。

$$|W_g(i, j)| = \min \left\{ \sum_k g(i, j, T_k, \text{null}) / n, i = A, B, C, L \right\} / \sum_j g(i, j, T_j, \text{null}) / n \quad (17)$$

由 $g(i, j, T_k, \text{null})$ 的定义可知, 在不同的 T_k, T_j 时刻, $g(i, j, T_k, \text{null})$ 取值不同, 因此, 不存在唯一的实数对 (∂, b) 满足式 (16), 故 $K_3 = 0$, 不存在不全为零的数使得式 (15) 成立。因此, $W_p(i, j)、W_v(i, j)、W_g(i, j)$ 为线性无关向量组, 则节点转发消息的效用度就可由 $W_p(i, j)、W_v(i, j)、W_g(i, j)$ 3 个向量唯一的表示。

设 $e_p = W_p(i, j) / |W_p(i, j)|, e_v = W_v(i, j) / |W_v(i, j)|, e_g = W_g(i, j) / |W_g(i, j)|$, 则任一节点 i 转发消息到达

目标节点 j 的效用度 $Q(i, j)$, 定义如式 (18) 所示。

$$Q(i, j) = |W_p(i, j)| e_p + |W_v(i, j)| e_v + |W_g(i, j)| e_g \quad (18)$$

为满足不同场景下的需求, 实现网络性能的动态可控调整, 定义 $a_m, m = p, v, g$ 分别为时延度、中继度及可达度对节点转发消息效用度的影响因子, 且三者满足式 (19) 所示归一化条件。

$$a_p + a_v + a_g = 1 \quad (19)$$

由此, 节点转发消息效用值 $Q(i, j)$ 的计算方法如式 (20) 所示。通过调整 a_m , 并对节点投递消息的时延度、中继度及可达度取模, 实现对效用值 $Q(i, j)$ 的动态均衡。

$$Q(i, j) = \sqrt{\sum_{m=p,v,g} a_m |W_m(i, j)|^2}, m = p, v, g \quad (20)$$

不同节点转发消息到达目标节点的能力差异程度无法由单个节点的态势体现, 均匀量化的方法只在量化初始值为均匀分布时才能达到最佳效果, 而机会网络中节点的移动具有随机性, 无法确定根据节点相遇时间信息得出的消息转发效用值服从 $[0, 1]$ 内的均匀分布, 因此, 本文采用适用于绝大多数情况的非均匀量化的方法^[15], 如式 (21) 所示。

$$Q' = \begin{cases} \frac{bQ}{\ln b + 1}, 0 < Q < \frac{1}{b} \\ \frac{\ln b Q + 1}{\ln b + 1}, \frac{1}{b} < Q < 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中, Q 为输入量化值, Q' 为量化输出值。 b 为常数, 它决定了量化器的压扩程度。针对目标节点的 Q 值越大, 则量化输出值 Q' 越高, 其转发消息到达目标节点的能力越强。随机运动过程中, 相遇的节点利用量化效用值感知自身与对方节点转发消息能力的差异, 进而对消息的转发进行分布式决策, 直至消息到达目的节点。

所提出消息传输机制的伪代码如下。

Initialize AllNode

{

Set TransmissionCapability(Node)=null;

Set TransmissionWeight(Node)=null;

```

        Set EstablishTemporalMatrix=false;
    }
    Public void NodeMeet (Node i,Node j)//节点 i 与
    j 相遇
    {
        If (Period.isWarmingup())
        {
            Return;
        }else if(TemporalWindow.isopen())//时间窗口开启
        {
            Exchange.TemporalMessage(i,j);
            //交换时间信息
            EstablishTemporalMatrix=true;
            //建立时序图模型
            CalculateRelatedParameters;
        }else
        {
            Node i.j.TransmissionCapability(Node d).weight;
            //节点转发能力均衡量化
            Node i.j.TransmissionUtility(Node d);
            While(Q'(i,d)<= Q'(j,d))//比较相遇节点效
            用值
            {
                Node j.ConformForwarding;
            }
            End while;
        }
        }
        TransmissionUtility(Node d)
        {
            Node.TransmissionCapability.Weight(d);
            Node.TransmissionUtility.add;
        }
    }
    End TransmissionMechanism;
    
```

5 仿真验证及结果分析

本文采用机会网络环境 (ONE, opportunistic network environment)^[16-18] 仿真平台验证所提出机制的有效性，并与典型的多副本路由机制 Epidemic 以及单副本路由机制 PROPHET 进行对比。仿真参数设置如表 2 所示。本文选取 $\partial_p = 0.45$, $\partial_v = 0.35$, $\partial_g = 0.2$ 。

参数	数值
仿真时间	10 800s
仿真区域	4 500m×3 400m
节点运动模型	社区模型
热身时间	500s
时间窗口	1 200s
节点组	5 个
节点个数	45~95 个
节点通信方式	蓝牙
节点速度	5~10m/s
节点缓存空间	6~22MB
传输范围	10m
传输速率	2 Mbit/s
消息大小	50~150KB
消息产生间隔	25~35s

5.1 节点数量对传输策略影响分析

显然，在给定网络区域及节点移动速度后，节点相遇总次数与节点的个数直接相关。本部分主要验证节点数量变化对所提出的 CSAMT 消息传输策略的影响情况，其中主要包括网络负载率、消息成功投递率及消息平均时延 3 个方面。

CSAMT、PROPHET、Epidemic 的负载率如上图 3 所示。结果表明网络负载率随节点数量的增加而逐渐上升，3 种消息传输策略中，CSAMT 增长幅度远小于 PROPHET 与 Epidemic。CSAMT 较 PROPHET 与 Epidemic 在网络负载率方面平均降低了 48.3% 以上，且由图 3 所示曲线可知：增加节点数量会使得 CSAMT 较 PROPHET 与 Epidemic 在负载率性能增益上进一步提高。

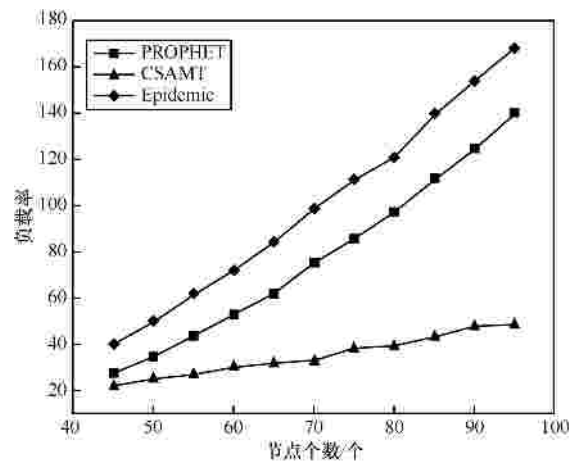


图 3 不同节点个数下负载率的比较

节点个数对消息成功投递率的影响如图 4 所示,随着节点数量的增加,CSAMT、PROPHET、Epidemic 三者的消息成功投递率都呈上升趋势,当节点个数为 85 时,CSAMT 较其他两者有大约 5.6% 的性能提升,且由图 4 可知,节点数量的增加会使 CSAMT 在投递率方面的优势更为明显。

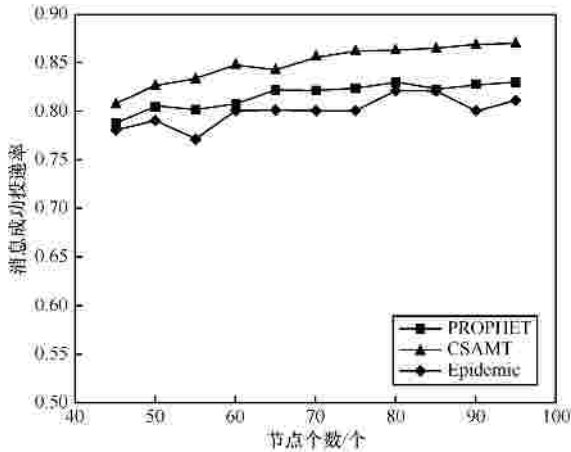


图 4 不同节点个数下消息成功投递率的比较

图 5 描述了节点个数对消息传输时延的影响情况,CSAMT、PROPHET 及 Epidemic 的消息平均时延都随着节点数量的增加而快速下降。当节点个数为 55 时,CSAMT 比 PROPHET 的时延减小约 7.8%,仅较 Epidemic 略差。节点个数大于 55 时,CSAMT 较 PROPHET 性能增益幅度逐渐减小,到 95 个节点时两者的时延性能已基本相当。

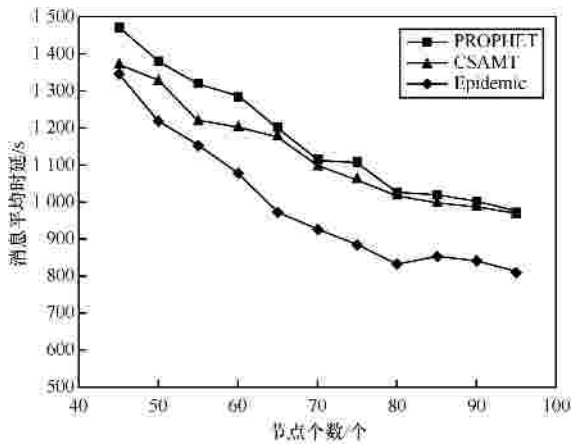


图 5 不同节点个数下消息平均时延的比较

由上述结果可知,当节点采用 PROPHET 机制进行消息传输时,虽然节点数量的增加使得各个节点能够获知较多的相遇概率信息,但是如前所述,该机制没有考虑到节点间链路出现的时间顺序,过高地估计

了节点之间的连接性,因此,消息转发次数较多,使得网络负载率随节点数量增加而急剧上升,同时,PROPHET 与 Epidemic 对于中继节点选择不合理性也限制了消息投递率、时延及网络负载的性能提升;另外,对于多副本传输策略 Epidemic 来说,中继节点的选择过程并未考虑节点之间的连接态势,而是利用所有节点间的相遇机会,节点以泛洪的方式将消息副本在网络中进行扩散,虽然能够获得相对较小的时延,但是极大地浪费了有限的网络资源。所提出的 CSAMT 传输策略中,节点根据保存的历史信息建立模型估计节点间连接出现的态势,从而更加准确地选择中继节点,有效地避免了消息在网络中盲目地传输,且该机制的扩展性较好。随着节点数量的增加,节点间相遇次数增多,CSAMT 机制即可由感知的网络状态演进趋势,更好地利用节点移动带来的通信机会投递消息,因而虽节点数量增多,但其负载率依然较低,能够更好地适应资源受限的机会网络。

5.2 缓存空间对传输策略影响分析

节点的缓存容量决定了节点可携带的消息数量,机会网络中的节点缓存容量通常是非常有限的,如何利用有限的节点缓存容量更有效地完成对消息的中继转发是机会网络消息传输策略的研究重点。本部分主要分析节点缓存容量的变化对 CSAMT 消息传输策略的影响。

不同缓存空间下 CSAMT、PROPHET 与 Epidemic 的网络负载率如图 6 所示,CSAMT、PROPHET、Epidemic 的负载率均呈现快速下降趋势,且 CSAMT 的负载率一直较 PROPHET 与 Epidemic 低 49.5% 以上,充分表明了 CSAMT 相比两者在降低网络负载方面的优势。

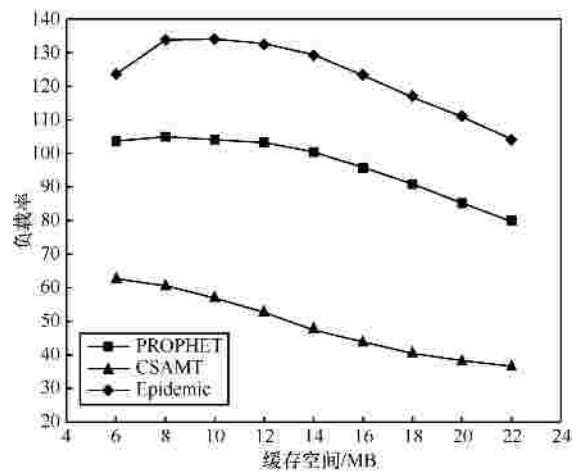


图 6 不同缓存空间下负载率的比较

节点缓存空间对 CSAMT、PROPHET 与 Epidemic 的消息成功投递率的影响如图 7 所示,随着节点缓存空间的逐渐增加,3 种算法的投递率均呈快速上升趋势。缓存空间较为有限时,CSAMT 的投递率优于 PROPHET 及 Epidemic,在缓存空间为 8MB 时 CSAMT 较两者提高 14.9% 以上,随着缓存空间进一步增加,CSAMT 策略的性能增益有所降低。

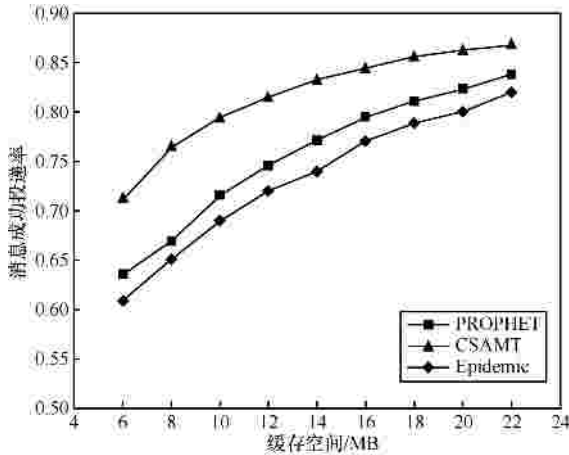


图 7 不同缓存空间下投递率的比较

图 8 描述了缓存空间变化对消息平均时延的影响,从结果中可知,增加节点缓存空间可以减少 PROPHET 与 Epidemic 的消息平均时延,而 CSAMT 算法的时延则趋于稳定,且一直较 PROPHET 小,其中,当缓存空间为 6MB 时,CSAMT 较 PROPHET 的平均时延减少了 13.4%。随着缓存空间的逐渐加大,PROPHET 的时延性能逐渐接近 CSAMT,但最终仍较 CSAMT 略差。

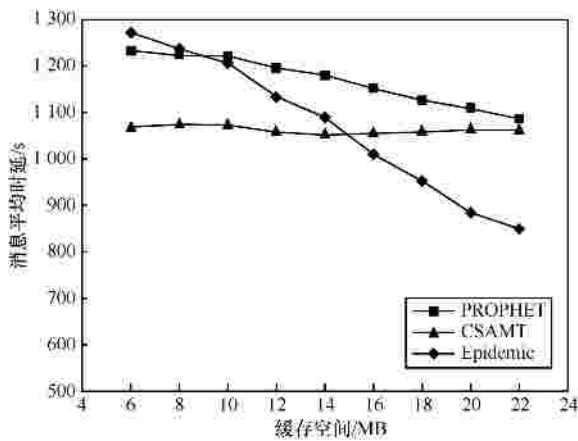


图 8 不同缓存空间下消息平均时延的比较

由上述结果可知,增大节点缓存空间可以增加节点携带的消息数量,使得相遇的节点间可传递的

消息数量增多,同等连接状况下,消息遇到目标节点的概率增大,从而有效提升了消息的投递率和平均时延性能。如前所述,PROPHET 机制虽然可由历史信息进行相遇概率预测,但 PROPHET 忽视了节点相遇的时间先后顺序,没有准确地把握连接的演进趋势,过高地估计了链路的可用性,造成消息不合理的转发次数过多,虽然消息被投递的概率增大,却因中继节点的选择不合理,造成较差的投递率与平均时延性能以及较高的网络负载。Epidemic 机制的洪泛策略将网络中消息副本的冗余度最大化,虽可获得较好的消息投递率与平均时延性能,但其未考虑节点链接的演进趋势,造成对网络资源的极大浪费。所提出的 CSAMT 消息转发机制通过建立时序图模型,能够由获知的节点移动规律及网络拓扑演进趋势,充分考虑节点之间的负载度、中继度和可达度 3 个方面因素,进而估算节点转发消息的效用值,实现中继节点选择过程的分布式决策,从而有效地降低了消息转发过程中参与协作缓存的节点数量,达到了降低网络负载的目的;同时,各个节点的缓存利用率也随之上升。中继节点选择过程中,节点充分地考虑了网络中的各个节点之间的连通情况,所选择的中继节点能够以较高的概率到达目的节点,实现了消息投递率和时延性能上的增益,有效地改善了网络性能。

6 结束语

为充分利用机会网络受限的网络资源,进一步改善网络性能,本文提出了一种节点连接态势感知的消息传输策略。首先根据建立的时序图模型对节点移动规律进行感知,进而分析节点转发消息的能力,并利用所提出的均衡方法进行均衡、量化,得到节点转发消息的效用值,最后,综合考虑负载度、中继度和可达度 3 个方面因素选择中继节点。仿真结果表明,本文提出的 CSAMT 消息传输策略能够有效地提高消息成功投递率,降低消息平均时延,并大幅降低网络负载,即可利用较少的网络资源达到较高的性能增益,完全满足机会网络资源受限情况下进行消息传输的要求。

参考文献：

[1] 董超, 钱睿, 陈贵海等. 无线自组织网络中流间网络编码机会发现方法的研究[J]. 通信学报, 2011, 32(10): 92-98.
DONG C, QIAN R, CHEN G H, et al. Method for discovering in-

- tra-session network coding opportunity in wireless ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(10):92-98.
- [2] MORGAN Y L. Notes on DSRC & WAVE standards suite: its architecture, design, and characteristics[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(4): 504-518.
- [3] JUANG P, OKI H, WANG Y, *et al.* Energy-efficient computing for wildlife tracking: design trade-offs and early experiences with Zebra-Net[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2002, 37(10): 96-107.
- [4] SMALL T, HAADS Z J. The shared wireless infostation model: a new ad hoc networking paradigm[A]. Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Annapolis[C]. Annapolis, MD, USA, 2003.233-244.
- [5] PENTLAND A, FLETCHER R, HASSON A. DakNet: rethinking connectivity in developing nations[J]. Computer, 2004, 37(1): 78-83 .
- [6] DORIA A, UDEN M, PANDEY D P. Providing connectivity to the saami nomadic community[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Open Collaborative Design for Sustainable Innovation[C]. Bangalore, India, 2002.
- [7] 聂志, 刘静, 甘小莺等. 移动 ad hoc 网络中机会路由转发策略的研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(4): 421-425.
NIE Z, LIU J, GAN X Y, *et al.* A relay node selection technique for opportunistic routing in mobile ad hoc networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 22(4): 421-425.
- [8] 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.
- [9] THRASYVOULOS S, KONSTANTINOS P, CAULIGI S R. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 77-90.
- [10] THRASYVOULOS S, KONSTANTINOS P, CAULIGI S R. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 63-76.
- [11] ANDERS L, AVRI D, OLOV S. Probabilistic routing in intermittently connected networks[A]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review[C]. New York, NY, USA, 2003, 7(3):19-20.
- [12] 卓莹, 龚春叶, 龚正虎. 网络传输态势感知的研究与实现[J]. 通信学报, 2010, 31(9): 54-63.
ZHUO Y, GONG C Y, GONG Z H. Research and implementation of network transmission situation awareness[J]. Journal on Communications, 2010, 31(9): 54-63.
- [13] VASSILIS K. Sequence diagrams graphs[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2009, 388(6):1007-1023.
- [14] 潘国荣, 赵鹏飞. 基于空间向量的三维基准转换模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(6): 79-82.
PAN G R, ZHAO P F. 3D datum transformation model based on space vector[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(6): 79-82.
- [15] WEI D, HOA V P, OLGICA M. Distortion-rate functions for quantized compressive sensing[A]. IEEE Workshop on Networking and Information Theory[C]. Greece, 2009.171-175.
- [16] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[A]. The 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques[C]. Rome, Italy, 2009. 1-10.
- [17] VASCON G J W, FARID FARAHMAND, JQEL JOSE P C R. Retiring replicants: congestion control for intermittently-connected networks[A]. IEEE Proceedings INFOCOM[C]. San Diego, USA, 2010. 1-9.
- [18] VASCON G J S, FARID FARAHMAND, JQEL JOSE P C R. Impact of vehicle movement models on VDTN routing strategies for rural connectivity[J]. International Journal of Mobile Network Design and Innovation, 2009, 3(2): 103-111.

作者简介:



吴大鹏(1979-),男,黑龙江大庆人,博士,重庆邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为泛在无线网络、无线网络服务质量管理等。



张普宁(1988-),男,河南濮阳人,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为宽带无线网络、分布式计算。



王汝言(1969-),男,湖北浠水人,博士,重庆邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为泛在网络、全光网络理论与技术、多媒体信息处理等。