

节点状态感知的延迟容忍网络拥塞控制策略

吴大鹏,傅象玖,张洪沛,王汝言

(重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘要: 为了有效提高延迟容忍网络中的数据传送效率,节点普遍采用多副本方式转发数据,然而此种方式会造成网络中冗余数据增多,导致网络拥塞.本文提出了一种带有节点状态感知的拥塞控制策略,根据运动过程中所获知的相关历史信息,节点以直接获取及间接推荐的方式准确地感知网络中各个节点的拥塞状态,进而以分布式的方式动态地为数据选择中继节点,达到更加合理地利用有限的网络资源的目的.结果表明所提出的拥塞控制能有效地改善数据成功投递概率和网络负载率.

关键词: 延迟容忍网络;网络拥塞;节点状态;数据转发

中图分类号: TP393.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)01-0186-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.01.027

Congestion Control Strategy with Node Status Evaluation for Delay Tolerant Networks

WU Da-peng, FU Xiang-jiu, ZHANG Hong-pei, WANG Ru-yan

(Key Laboratory of Optical Fiber Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To improve the data transmission efficiency of delay tolerant network (DTN), multiple copies of packets are injected into the network. However, the network will be congested due to large number of redundant copies. To solve the congestion, a congestion control strategy with node status evaluation is introduced in this paper. According to the historical information obtained during the node movement process, the congestion status is determined by combining the direct and indirect estimation results. Furthermore, the relay node can be selected reasonably, and the limited network resources can be utilized effectively. Results show that the packet delivery ratio and network overhead ratio can be improved dramatically by our proposed strategy.

Key words: delay tolerant network; network congestion; node status; packet forwarding

1 引言

延迟容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)^[1,2]中节点之间的连接频繁中断,为了提高网络整体性能,常采用多副本方式转发数据,但数据副本在网络中的不断扩散将导致中继节点缓存空间逐渐饱和,使其无法为其他数据提供转发服务,进而造成网络拥塞.

显然,对于网络资源有限的延迟容忍网络来说,网络拥塞控制尤为重要.虽然,传统的传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)^[3-5]能够较好地解决有线网络的拥塞问题,但是,其需要于限定时间内在源节点和目的节点快速反馈网络状态信息,从而实现

拥塞控制.可见,对于节点间连接频繁中断的延迟容忍网络来说,网络状态信息传输延迟较大,TCP中的拥塞控制策略无法适用.

根据拥塞产生的原因,DTN的拥塞可分为节点级拥塞和区域级拥塞.其中,若单个节点需要转发的数据量大于实际链路容量,则节点的缓存将逐渐饱和,进而导致数据溢出,此种情况称为节点级拥塞;更进一步地,当给定区域内多个节点发生拥塞的时候,整个区域内部的数据由于流量过载而无法转发,称此种情况为区域级拥塞^[6].

针对上述问题,国内外研究人员在DTN拥塞控制方面进行了相关研究.文献[7]综合考虑多个属性特征,进

而合理地选取下一跳转发节点,以达到拥塞控制的目的,但是其并未考虑节点下一时刻的拥塞状态,数据将因节点状态变化而被丢弃,从而导致网络性能降低.在网络中存在自私节点的假设下,文献[8]设计了多路径并行数据转发方式,以达到减轻链路负载并激励自私节点数据转发的目的,然而,其忽略了节点所在区域中各节点的拥塞状态.文献[9,10]利用邻居节点剩余缓存转移本地节点缓存中的部分数据,以达到有效地控制拥塞的目的,然而,大量数据的转移将使得有限的网络资源无法为亟待转发的数据提供服务.文献[11]中节点以本地的拥塞状态作为其所在区域的网络状态,根据本地缓存中数据的扩散程度确定其转发优先级,且通过主动应答机制来删除冗余副本.然而,单个节点状态不能准确有效地表明其所在区域的网络状态.文献[12]中根据节点本地缓存占用情况确定当前网络的拥塞状态,从而根据其不同的拥塞等级调整数据的转发,然而其拥塞等级划分过程过于主观,难以客观地反应当前网络状态,对于动态性较强的DTN适应性较差.

针对上述问题,本文提出了节点状态感知的拥塞控制策略(Status-aware Congestion Control Strategy, SCCS).综合考虑自身感知的状态信息及其相遇节点的间接感知信息,以信息融合的方式更加准确地估计下一时刻与其相遇节点的拥塞状态,从而自适应地调整数据转发,以达到降低网络拥塞,改善网络性能的目的.

2 拥塞预测机制

节点缓存占用程度与拥塞状态直接相关.然而,对于分布式运行的DTN来说,单个节点的拥塞并不能表明其所在区域内其他节点也出现拥塞,各个节点可通过合理的数据转发有效地缓解网络拥塞^[13,14],以达到降低网络资源消耗,合理利用网络资源的目的.

2.1 节点状态感知

根据缓存占用情况,DTN中的节点可分为非饱和节点与饱和节点两种.当节点剩余缓存无法容纳单个数据时,则称节点处于饱和状态;反之为非饱和状态.通过获取通信范围内各节点的状态,节点能够及时地感知给定区域内的拥塞状态.

在理想状态下,在给定时间段内的相遇节点中,非饱和节点转变为饱和节点的数量上限为其在 $[t, t + \Delta t]$ 内相遇的非饱和节点数量,如式(1)所示:

$$N_{\max}(t) = N_v(t) \quad (1)$$

其中 $N_v(t)$ 表示在 t 时刻,相遇节点为非饱和状态的数量,且 $N_v(t) = N_i(t) - N_s(t)$. $N_i(t)$ 表示在 t 时刻的相遇节点数量,若 $N_i(t) = 0$,则表示节点未与其他节点建

立连接.在最大连接持续时间为 Δt 的情况下,本次连接发送数据的最大流量为 $B \times \Delta t$, B 为信道传输速率.若节点剩余缓存大于 $B \times \Delta t$,则节点状态转移的概率为0;反之,若节点发生状态转移,则需要接收数据数量的上限 M_{\max} 如式(2)所示,其中 m_{size} 为数据大小.

$$M_{\max} = \frac{B \times \Delta t}{m_{\text{size}}} \quad (2)$$

可见,根据DTN数据转发原理可知,任意节点 n_k 与 n_q 相遇之后,当节点 n_q 中至少有 M_{\max} 个节点 n_k 未保存的数据时,节点 n_k 状态才会发生改变.因此,节点 n_k 发生状态转移的概率如式(3)所示,其中 q 表示节点 n_q 携带数据数量.

$$P_r(n, q) = \begin{cases} \frac{n}{q} \times \frac{(M_{\max}^n)}{(M_{\max}^q)}; & M_{\max} \leq n \leq q \\ 0; & 0 \leq n < M_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

因此,非饱和节点出现状态转移的实际数量如式(4)所示:

$$N_{\text{act}}(t) = P_r(n, q) \cdot N_{\max}(t) \quad (4)$$

按照上述理想情况,由于饱和节点缓存无法容纳额外的数据副本,因此,其状态并不会改变.然而,在给定时间 Δt 内,由于节点主动丢弃本地缓存中生存时间(Time To Live, TTL)截止的数据,部分饱和节点将转变成非饱和节点.因此,下一时刻处于饱和状态的节点数量主要由两个方面的因素决定:(1)非饱和节点接收数据之后转变成饱和节点;(2)删除TTL到期的数据后,饱和节点变成非饱和节点.可见,下一时间段节点相遇的饱和节点数量如式(5)所示:

$$N_s(t + \Delta t) = N_{\text{act}}(t) + (N_s(t) - N_s(t) \cdot P(t_{\min} < \Delta t)) \quad (5)$$

其中 $N_s(t)$ 表示 t 时刻相遇节点中饱和节点的数量, $N_s(0) = 0$; $P(t_{\min} < \Delta t) = 1 - (1 - \Delta t/\text{TTL})^k$ 表示在时间段内饱和节点丢弃数据的概率; k 为饱和节点携带数据数量.

文献[15,16]表明在较短的时间段内,与给定节点相遇的节点数量服从泊松分布,因此,可知其相遇节点的数量服从广义平稳随机过程.从而,可利用历史信息对下一时刻相遇节点的数量进行估计,本部分采用适用于广义平稳随机过程的时间序列指数平滑方法预测相遇节点数量.本文以 α ($0 < \alpha < 1$)为权重估计下一时刻的相遇节点数量,如式(6)所示.

$$S_{t+1}^{\alpha} = |\alpha \times N_t(t) + (1 - \alpha) \times S_{t-1}| \quad (6)$$

其中 α 为节点相遇概率,且节点相遇时间间隔服从指数分布^[17],因此节点在给定时间 Δt 内的相遇概率为 $\alpha = 1 - e^{-\Delta t}$; S_{t-1} 表示前一时刻预测的相遇节点数量,初始值

为 $S(0) = 0$; S_{t+1}^{di} 表示下一时刻相遇节点数量的估计值.

显然,在给定时间 Δt 内,节点运动范围有限,因此,可认为节点所在区域的网络拓扑相对稳定.由此可知,下一时刻非饱和状态节点数量如式(7)所示:

$$N_v(t + \Delta t) = S_{t+1}^{di} - N_s(t + \Delta t) \quad (7)$$

2.2 节点状态信息聚合

DTN 中的节点状态信息具有较强动态性, $N_v(t + \Delta t)$ 、 $N_s(t + \Delta t)$ 并不能十分准确的描述下一时刻处于各状态的相遇节点数量.为了更加准确、全面地获知当前网络状况,本文利用 D-S 证据理论^[18]对相遇节点状态的不确定性进行量化,从而提高预测的准确性.首先,将节点 i 在 $[t, t + \Delta t]$ 内相遇非饱和及饱和节点数量 $N_v^i(t + \Delta t)$ 与 $N_s^i(t + \Delta t)$ 映射成一个数组 $(b_{i,di}^{di}, d_{i,di}^{di}$ 和 $u_{i,di}^{di})$ ^[19],其中 $b_{i,di}^{di}$ 表示本地感知结果中,非饱和节点对下一时刻拥塞状态预测影响的权重值; $d_{i,di}^{di}$ 表示饱和节点对下一时刻拥塞状态预测影响的权重值;而 $u_{i,di}^{di}$ 则表示相遇节点中,未能与本地节点建立连接并未能确定其状态的节点影响本次预测拥塞状态的权重值,且 $b_{i,di}^{di}$ 、 $d_{i,di}^{di}$ 、 $u_{i,di}^{di}$ 满足式(8)所示关系:

$$b_{i,di}^{di} + d_{i,di}^{di} + u_{i,di}^{di} = 1 \quad (8)$$

同时,为了缩小预测误差,更加有效地掌握网络状态,本文对 $u_{i,di}^{di}$ 进行归一化处理,其处理方式如式(9)所示:

$$u_{i,di}^{di} = \frac{12 \times N_v^i(t + \Delta t) \cdot N_s^i(t + \Delta t)}{(N_v^i(t + \Delta t) + N_s^i(t + \Delta t))^2} \cdot \frac{1}{(1 + N_v^i(t + \Delta t) + N_s^i(t + \Delta t))} \quad (9)$$

另外,根据节点所预测的下一时刻饱和节点和非饱和节点数量,可知各状态节点数量影响拥塞状态的预测权重值.下一时刻非饱和节点与饱和节点影响拥塞状态预测的权重值分别如式(10)与(11)所示:

$$b_{i,di}^{di} = \frac{N_v^i(t + \Delta t)}{N_v^i(t + \Delta t) + N_s^i(t + \Delta t)} \times (1 - u_{i,di}^{di}) \quad (10)$$

$$d_{i,di}^{di} = \frac{N_s^i(t + \Delta t)}{N_v^i(t + \Delta t) + N_s^i(t + \Delta t)} \times (1 - u_{i,di}^{di}) \quad (11)$$

可知,给定节点可根据式(9)~(11)获知其运动通信范围内的相遇节点状态,即节点自身感知的直接网络状态信息.

为了避免感知的信息因不能准确描述节点所在区域的拥塞情况而导致本地节点判断结果与实际拥塞状态出现较大的偏差,本文采用均值法分别聚合来自相遇节点的间接感知结果,从而更加准确地获知网络拥塞状态.节点获取其相遇节点的间接信息之后,分别就 $b_{i,nx}^{in}$ 、 $d_{i,nx}^{in}$ 、 $u_{i,nx}^{in}$ 采用均值法进行聚合,其聚合过程如式(12)~(14)所示.

$$b_{i,nx}^{in} = \frac{\sum_{j=1}^n b_{j,di}^{di}}{n} \quad (12)$$

$$d_{i,nx}^{in} = \frac{\sum_{j=1}^n d_{j,di}^{di}}{n} \quad (13)$$

$$u_{i,nx}^{in} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{j,di}^{di}}{n} \quad (14)$$

其中, $b_{j,di}^{di}$ 、 $d_{j,di}^{di}$ 、 $u_{j,di}^{di}$ 分别表示 i 的相遇节点 j 所感知结果中非饱和、饱和和未能确定其状态的节点对下一时刻拥塞状态预测影响的权重值,与节点 j 状态不存在联系.

然而每个感知结果对节点状态判定的影响程度并不相同,进而影响拥塞状态的准确性.因此,本文采用加权平均方法进一步聚合直接与间接的感知结果,其过程如式(15)~(17)所示:

$$u_i^{com} = \phi_1 \times u_{i,di}^{di} + \phi_2 \times u_{i,nx}^{in} \quad (15)$$

$$b_i^{com} = \frac{b_{i,di}^{di} + b_{i,nx}^{in}}{(b_{i,di}^{di} + b_{i,nx}^{in}) + (d_{i,di}^{di} + d_{i,nx}^{in})} (1 - u_i^{com}) \quad (16)$$

$$d_i^{com} = \frac{d_{i,di}^{di} + d_{i,nx}^{in}}{(b_{i,di}^{di} + b_{i,nx}^{in}) + (d_{i,di}^{di} + d_{i,nx}^{in})} (1 - u_i^{com}) \quad (17)$$

其中 ϕ_1 、 ϕ_2 为聚合加权因子,节点根据其获取的感知结果自适应地调整上述三个因素的影响因子,其加权因子计算方式如式(18)、(19)所示:

$$\phi_1 = \frac{\gamma \times u_{i,nx}^{in}}{(1 - \gamma) \times u_{i,di}^{di} + \gamma \times u_{i,nx}^{in} - 0.5 \times u_{i,di}^{di} \times u_{i,nx}^{in}} \quad (18)$$

$$\phi_2 = \frac{(1 - \gamma) \times u_{i,di}^{di}}{(1 - \gamma) \times u_{i,di}^{di} + \gamma \times u_{i,nx}^{in} - 0.5 \times u_{i,di}^{di} \times u_{i,nx}^{in}} \quad (19)$$

其中 γ 表示预测倾向因子.若 $\gamma > 0.5$,则节点最终预测出的结果更倾向于本地感知的结果,而间接感知结果对其影响相对较小;若 $\gamma < 0.5$,节点最终预测出的结果更倾向于间接感知的结果,而本地感知的结果对其影响相对较小^[18].

3 拥塞控制

为了更有效地实现拥塞控制,节点根据其最终的预测结果动态调整数据转发数量,即确定本次连接发送数据数量的上限,其计算方法如式(20)所示:

$$R_{i,se} = \lceil \frac{b_i^{com}}{b_i^{com} + d_i^{com}} \times R_{i,al} \rceil \quad (20)$$

其中 $R_{i,al}$ 表示本地缓存中的数据总量; $R_{i,se}$ 表示本次连接发送数据的上限.相遇节点若接收数据数量少于 $R_{i,se}$

时达到饱和状态,则中断本次连接.同时,为了均衡网络中各数据的副本数量,提高每个数据成功投递的概率,节点优先转发扩散速度相对缓慢的数据副本,以避免扩散迅速的数据因多次转发导致其他数据在本地缓存中滞留时间过长而被丢弃.然而,分布式运行的 DTN 节点无法获知其缓存中每个副本在全网中的扩散程度.本文中节点根据在一段时间 T_u 内,本地缓存和与其相遇节点中拥有给定数据副本的数量 C_d 衡量其扩散速率 V_{msg} ,如式(21)所示:

$$V_{msg} = \frac{C_d}{T_u} \quad (21)$$

可见,数据扩散率在一定程度上反映了数据副本在当前区域中的扩散程度.因此,节点依据数据扩散率的升序转发数据可有效均衡网络中各数据副本数量.

显然,数据的冗余副本数量随着其存在时间的延续而不断增加,进而其成功投递的概率也随之增大.相关文献研究表明,数据在网络中的存在时间达到自身 TTL 的 75% 时,网络中其数据副本数量较多^[20].此种状态下,此类数据以较大概率完成转发,若任其继续转发,将导致其他数据因副本数量较少,而无法成功投递,同时网络负载率也随之增加.因此,节点不再转发本地缓存中数据存在时间高于 75% TTL 的数据.此外,当节点所在范围的节点均为饱和状态时,新产生的数据被成功投递的概率较低.因此为了增加这类数据被投递成功的概率,降低网络拥塞,节点建立连接之后,仅转发本地缓存中最新产生的数据.而处于饱和状态的相遇节点需从本地缓存中以扩散率的降序进行数据丢弃,以接收此类最新产生的数据,以达到控制网络拥塞的同时,均衡网络中各数据的冗余副本数量的目的.

综上所述,在资源(缓存、能量、带宽)受限的延迟容忍网络中,本文通过准确地感知当前节点拥塞状态及其所在范围内的拥塞状态,节点根据数据在网络中扩散速率以及数据在网络中已生存的时间控制数据转发,通过合理地选择下一跳中继节点实现数据转发及网络资源开销的控制.本文所提出的 SCCS 机制实现的伪代码如下算法 1.

算法 1 感知节点状态的拥塞控制伪代码

```

1 : Public void SCCS
2 : {
3 :   If(Node's Remaining Buffer = 0) {
4 :     Saturation Node ++; //统计饱和节点数量
5 :     Node Amount ++; //统计相遇节点数量
6 :   }
7 :   Next Non-saturation Node; //预测下一刻非饱和节点数
8 :   the Predict Node //预测下一刻相遇节点数

```

```

9 :   Weight factor; //计算各直接感知状态影响权重
10:   Fusion process; //融合直接与间接感知结果
11:   The upper limit of message; //确定本次数据转发上限
12:   If(the upper limit of message = 0) {
13:     Transmit the youngest local data; //转发最新产生数据
14:   }
15:   else {
16:     If(the time of message > 75 % TTL) { //数据在网络中
//存在时间大于 75% TTL
17:       Data is not forwarded; //不转发数据
18:     }
19:     else {
20:       If(Non-saturation Node && the recived quantity
//非饱和节点接收数据数量不大于数据转发上限;
< = the upper limit of message) {
21:         Transmit message; //转发数据
22:       }
23:     }
24:     Data is not forwarded; //不转发数据
25:   }
26: }
27: }
28: }

```

4 数值分析

本文采用延迟容忍网络仿真平台 (Opportunistic Network Environment, ONE) 分析和验证所提出拥塞控制策略的性能,所采用的测试环境为基于赫尔辛基市的地图模型及基于 INFOCOM06 中实测数据的实测模型.其中该实测数据来自于 CRAWDDAD (a Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth) 公开发表的实验数据,INFOCOM06 实测数据收集于巴塞罗那 INFOCOM'06 会议期间 98 个(78 个由与会人员携带,20 个静态部署)节点间通过 Bluetooth 通信的记录.在测试环境中假设节点运用手机或其他移动设备,采用 Bluetooth2.1 + EDR 接口,因此具有 250KBps 的传输带宽及 10m 的传输距离^[21,22].同时其数据存储空间相对受限,本文中节点数据存储空间随机设置为 10 ~ 20MB.由于延迟容忍网络中网络的负载状况由节点缓存及数据产生时间间隔直接决定,在存储空间受限时,网络拥塞程度与数据产生时间间隔呈反比.因此,本文选择数据产生时间间隔验证所提出的机制的有效性.

网络性能指标分别为数据投递成功概率、网络平均传输延迟和网络负载率,进而将所提出的 SCCS 性能与文献[14]中的 UCCTDN 策略,文献[23]中的 CCICN 策略以及没有拥塞控制的路由策略 (Unable Congestion Control Routing, UCCR) 进行比较.文献[13]中根据本地丢弃数据数量 dr 和发送数据数量 du 的比例 CV 检测网

络中的拥塞,进而更新网络拥塞检测值,并将其与设定阈值比较的结果作为给定区域的拥塞状态,进而动态调整本次连接发送数据数量.文献[23]中通过 CV 检测网络中的拥塞,并根据 $CV' = \alpha \cdot (d/r) + (1 - \alpha) \cdot CV$ 更新拥塞检测值,若 $CV' > CV$,则节点发送数据数量 limit 以步长 $ai (ai > 1)$ 增加,反之则以 $limit = limit \cdot md$ 衰减,其中 $(0 < md < 1)$,并以此作为节点所在区域的拥塞状态,同时计算数据被转发的概率,从而确定数据转发顺序.具体参数设置如表 1 所示.

表 1 仿真参数设置

| 仿真参数 | 默认值 |
|------------|-------------|
| 仿真区域/m × m | 4500 × 3400 |
| 数据生存时间/min | 240 |
| 节点通信方式 | Bluetooth |
| 节点缓存空间/MB | 10 ~ 20 |
| 节点带宽/kBps | 250 |
| 节点数量 | 78 |
| 传输范围/m | 10 |
| 仿真模型 | 实测模型/基于地图模型 |

不同的数据产生时间间隔的性能分析如图 1 ~ 3 所示.

图 1(a) 和 (b) 分别为实测模型与基于地图环境下数据投递率的仿真结果.且随着数据产生时间间隔的增大,三种拥塞控制策略及 UCCR 的投递率均随之增加.随着数据产生时间间隔的增大,网络中产生数据的数量减少,而网络中各数据的冗余副本数量增多,数据被投递成功的概率增加.因此,随着数据产生时间间隔的增加,三种拥塞控制策略及 UCCR 的数据成功投递概率也随之增加.UCCDTN 和 CCICN 根据本地节点检测结果作为其所在区域的拥塞状态,从而进行拥塞控制,然而,本地节点的拥塞状态不能完全表明其所在区域的拥塞状态,因此,节点所在区域的其他节点以此检测结果进行拥塞控制,导致网络中其他节点未能有效处理其所在区域的拥塞状态,进而网络中数据投递成功的概率相对较低.SCCS 分布式地感知网络中节点的状态,通过聚合本地感知结果和间接感知结果,从而更准确地预测下一时刻网络中的拥塞状态,进而做出当前区域最合理的数据转发决策,从而有效的提高了数据投递成功的概率.UCCR 由于未采取拥塞控制策略而导致网络出现较严重的拥塞状况,当网络中产生的数据量减少时拥塞状况有所缓解,从而数据投递成功的概率不断增加.实测模型中,SCCS 的数据投递成功概率相对于 UCCDTN 来说平均提高了 48%;相对于 CCICN 来说,SCCS 的投递率平均提高了 38%;而远高于 UCCR.基于地图环境下,SCCS 的数据投递成功概率相对于 UCCDTN 来说平均提高了 60%;相对于 CCICN

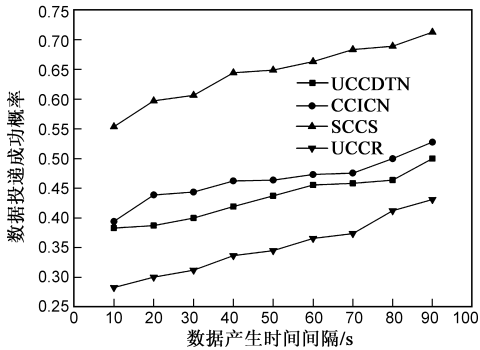
来说,SCCS 的投递率平均提高了 55%;同时也远高于 UCCR 策略.

图 2(a) 和 (b) 分别为实测模型与基于地图环境下网络负载率的仿真结果.且两图中三种拥塞控制策略及 UCCR 的网络负载率均随着数据产生时间间隔的增加而增加.随着数据产生时间间隔的增加,网络中产生的数据数量减少.因此,网络中同一数据的冗余副本数量增多,数据被转发的次数也相应增加.因此,成功投递数据所需的代价也相对增加.SCCS 中,网络拥塞较严重时,节点仅扩散本地产生的最新数据,且通过均衡网络中各数据的副本数量,有效地达到了降低网络拥塞的目的.而 UCCDTN 与 CCICN 通过本地节点检测结果作为其所在区域的拥塞状态,节点检测出拥塞较轻时,节点及其所在区域的节点的数据转发窗口不断增大,导致数据在网络中迅速扩散,网络拥塞随之愈加严重;在网络拥塞严重时,相对于 SCCS 来说,UCCDTN、CCICN 及 UCCR 转发数据的数量相对较多.因此,其负载率相对较高.实测模型中,相对于 UCCDTN 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 38%;相对于 CCICN 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 51%;相对于 UCCR 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 58.3%.基于地图环境下,相对于 UCCDTN 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 42%;相对于 CCICN 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 49%;相对于 UCCR 来说,SCCS 的网络负载率平均降低了 53.1%.

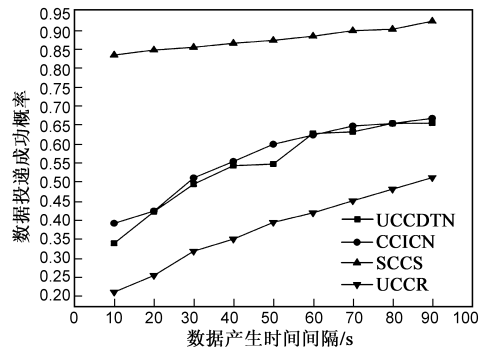
图 3(a) 和 (b) 分别为实测模型与基于地图环境下数据在缓存中停留时间的仿真结果.且两图中三种拥塞控制策略及 UCCR 的数据在缓存中停留时间随着数据产生时间的增加而降低.随着数据产生时间间隔的增加,节点产生数据数量也随之减少,因此,数据在缓存中等待转发的时间随之缩短.同时,网络中各数据冗余副本数量增多,因此,数据投递成功所需的时间也相对减少,从而缓存中数据停留时间也相对减小.而 SCCS 中,节点到达饱和状态后,本地节点只转发本地产生的最新数据,而其他数据则处于等待状态.因此,数据在节点缓存中停留的时间较长.而 UCCDTN 和 CCICN 中,每次建立连接之后,节点转发数据较多,从而进一步减少了本地缓存中数据等待转发时间.相对于 SCCS 来说,UCCDTN 和 CCICN 中数据等待发送所需的时间相对较少,而 UCCR 由于发生拥塞导致数据需要等待较长时间发送.实测模型中,相对于 UCCDTN 来说,SCCS 中数据在缓存中的停留时间平均延长了 3%;而相对于 CCICN 来说,SCCS 中数据在缓存中的停留时间平均延长了 6%;相对于 UCCR 来说,SCCS 中数据在缓存中的

停留时间平均减小了 13%。基于地图环境下,相对于 UCCDTN 来说,SCCS 中数据在缓存中的停留时间平均延长了 15%;而相对于 CCICN 来说,SCCS 中数据在缓

存中的停留时间平均延长了 38%;相对于 UCCR 来说,SCCS 中数据在缓存中的停留时间平均减小了 18.3%。

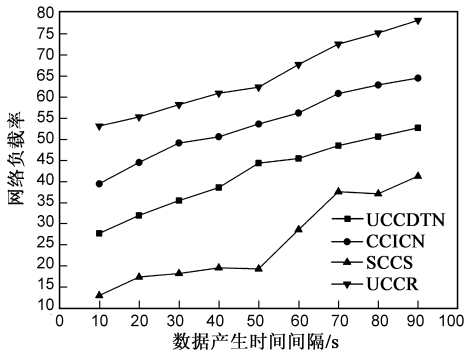


(a) 实测环境中数据投递成功概率

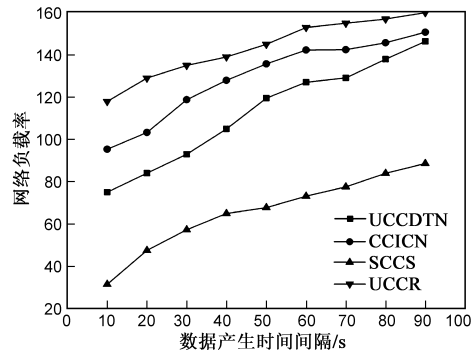


(b) 基于地图环境下的数据投递成功概率

图1 数据不同的产生时间间隔下的数据投递成功概率

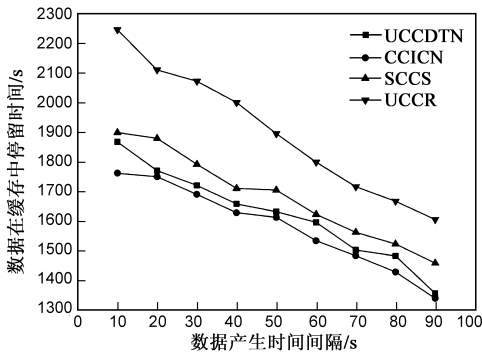


(a) 实测模型中的网络负载率

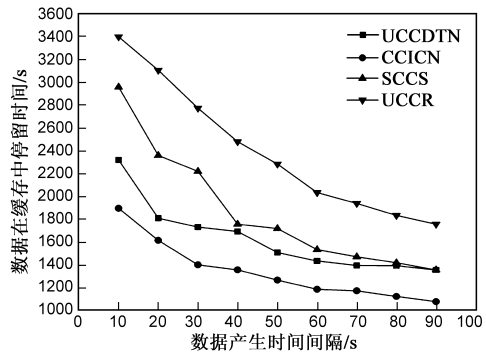


(b) 基于地图环境下的网络负载率

图2 数据不同的产生时间间隔下的网络负载率



(a) 实测模型中的数据在缓存中的停留时间



(b) 基于地图环境下的数据在缓存中的停留时间

图3 数据不同的产生时间间隔下在缓存中停留的时间

5 结束语

本文提出了节点状态感知的延迟容忍网络拥塞控制策略,通过聚合其本地拥塞状态感知结果和所获取的间接拥塞状态感知结果,节点预测下一时刻的网络状态,并根据此预测结果动态调整数据转发过程,进而通过本地获知的扩散率均衡网络中各数据冗余副本数量,以提高数据投递成功概率,降低网络拥塞.仿真结果表明,与其他网络拥塞机制相比,所提 SCCS 策略在

数据投递成功概率和网络负载率均得到很大的改善.

参考文献

[1] McMahan A, Farrell S. Delay-and-disruption-tolerant networking[J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(6): 82-87.

[2] Yin L, Lu H M, Cao Y D. Similarity degree-based mobile pattern aware routing in DTNs[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(1): 23-28.

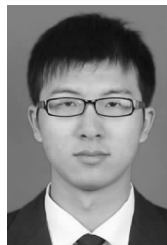
[3] Lestas M, Pitsillides A, Ioannou P, et al. A new estimation

- scheme for the effective number of users in internet congestion control [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2011, 19(5): 1499 – 1512.
- [4] Jiang M, Yang Q, Wu C M, et al. End-to-end congestion control for TCP-friendly flows with variable data rates [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2012, 21(3): 541 – 546.
- [5] 姜文刚, 孙金生, 王执铨. 随机回退的 TCP 拥塞控制算法 [J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1689 – 1692.
Jiang W G, Sun J S, Wang Z Q. A random back-off TCP congestion control algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1689 – 1692. (in Chinese)
- [6] 陶勇. 容迟容断网络拥塞控制关键技术研究 [D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Tao Yong. Research on the Key Techniques of Congestion Control for DTN [D]. Changsha, Hunan; National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] Tao Y, Gong Z, Lin Y, et al. Congestion aware routing algorithm for delay-disruption tolerance networks [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(1): 133 – 139.
- [8] Lu H, Yin L, Li C, et al. Congestion control in delay tolerant networks with selfish nodes [J]. *Sensor Letters*, 2012, 10(8): 1621 – 1631.
- [9] Seligman M, Fall K, Mundur P. Storage routing for DTN congestion control [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2007, 7(10): 1183 – 1196.
- [10] Radenkovic M, Grundy A. Efficient and adaptive congestion control for heterogeneous delay-tolerant networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(7): 1322 – 1345.
- [11] Jin Z, Zhao X, Luo Y, et al. Adaptive priority routing with ACK mechanism for DTN networks [A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing [C]*. USA: IEEE, 2009. 1 – 5.
- [12] Lo S C, Lu C L. A dynamic congestion control based routing for delay-tolerant networks [A]. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) [C]*. USA: IEEE, 2012. 2047 – 2051.
- [13] Thompson N, Kravets R. Understanding and controlling congestion in delay tolerant networks [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2010, 13(3): 42 – 45.
- [14] Nelson S C, Bakht M, Kravets R. Encounter-based routing in DTNs [A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM [C]*. USA: IEEE, 2009. 846 – 854.
- [15] Li Q, Gao W, Zhu S C, et al. To lie or to comply: Defending against flood attacks in disruption tolerant networks [J]. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2013, 10(3): 168 – 182.
- [16] Gao W, Li Q, Zhao B, et al. Social-aware multicast in disruption-tolerant networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2012, 20(5): 1553 – 1566.
- [17] Han B, Hui P, Kumar V S A, et al. Mobile data offloading through opportunistic communications and social participation [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(5): 821 – 834.
- [18] Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence [M]*. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [19] Li F, Wu J. Mobility reduces uncertainty in MANETs [A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM [C]*. USA: IEEE, 2007. 1946 – 1954.
- [20] 吴大鹏, 周建二, 王汝言, 等. 机会网络中消息冗余度动态估计的缓存管理策略 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 101 – 107.
Wu D P, Zhou J E, Wang R Y, et al. Message-redundancy estimating adaptive buffer management mechanism for opportunistic network [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 101 – 107. (in Chinese)
- [21] You L, Li J, Wei C, et al. A general and specific utility-based adaptive routing for delay tolerant networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, doi:10.1155/2014/742047, 1 – 15.
- [22] Albin F, Munaretto A, Fonseca M, et al. A blind mechanism to improve content distribution in delay/disruption tolerant networks [J]. *Wireless Networks*, 2013, 20(5): 935 – 943.
- [23] Thompson N, Nelson S C, Bakht M, et al. Retiring replicas: congestion control for intermittently-connected networks [A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM [C]*. USA: IEEE, 2010. 1 – 9.

作者简介



吴大鹏 男, 1979 年 8 月出生, 黑龙江大庆人, 博士、重庆邮电大学教授, 2006 年毕业于重庆邮电大学获硕士学位, 2009 年毕业于北京邮电大学获博士学位。主要研究方向为泛在无线网络、无线网络服务质量管理等。
E-mail: wudp@cqupt.edu.cn



傅象珍 男, 1988 年 2 月出生, 重庆梁平人, 2011 年毕业于沈阳理工大学获学士学位, 2014 年毕业于重庆邮电大学获硕士学位, 从事延迟容忍网络数据转发的相关研究。
E-mail: queyuecanghai@163.com