

基于连通时序效用的延迟容忍网络路由算法

刘科征, 黄春妮, 胡 敏, 徐 超

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对延迟容忍网络现有社区内路由算法在选择中继节点未考虑节点间有序连接而高估通信路径可达性问题, 提出一种基于连通时序效用的路由算法——RBCSU(Routing Based on Connected Sequence of Utility), 该算法采用社区内节点间连通时序估计节点间通信路径状态, 进而考虑节点可达率、时延度以及相似度计算节点效用值, 并通过比较其效用值来选择出最优的中继节点转发消息。仿真结果表明, 相比于 Epidemic、PRoPHET 和 SimBet 算法, 该算法能够有效提高消息投递率、降低消息传输时延和网络开销。

关键词: 延迟容忍网络; 连通时序; 可达率; 时延度; 相似度

中图分类号: TP393.01

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)05-0095-05

A Routing Algorithm for DTN Based on Connected Sequence of Utility

LIU Ke-zheng, HUANG Chun-ni, HU Min, XU Chao

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve overestimate the communication path accessibility in select relay node ignore order of connection, an Routing Based on Connected Sequence of Utility (RBCSU) is proposed. This algorithm estimate the connection status by using the community between nodes connected sequence. Furthermore, using node of reachable rate, time-delay degree and similarity to calculate the utility value, and then the preferable relay peers could be chosen by compare to the utility value. The result of simulation, which is compared to other well-known algorithms, indicated that this algorithm is improves the message delivery rate and reduce the overhead ratio.

Key words: delay tolerant network; connected sequence; reachable rate; time-delay degree; similarity degree

1 引言

延迟容忍网络^[1] (Delay Tolerant Network, DTN)作为一种新兴网络,具有节点稀疏,高移动性,链路上存在长延迟,低数据率,低信噪比和高误码率,不稳定的端到端连接,节点资源有限等特点。DTN 体系结构是在传统的网络结构基础上增加 Bundle 层^[2-3] (又称束层)形成的一种新的体系结构, Bundle 层位于网络的传输层和应用层之间,通过“存储-携带-转发”的方式实现节点间消息传输。DTN 网络节点具有移动性,其能够快速组建起一个

移动通信网络。节点间以移动方式进行通信,具有高度协作性;网络路由由协议通常采用分布式控制方式,比中心结构的网络具有更强的鲁棒性和抗毁性^[4]等。因此,研究 DTN 网络路由算法具有重大意义。

目前,许多国内外学者在研究延迟容忍网络路由算法方面取得了很大的突破。文献^[5]提出一种基于社区机会网络的消息传输算法,该算法社区内采用“多拷贝+控制”方式,社区间选取社会度较大的节点作为中继点进行消息转发。该算法降低资源消耗。文献^[6]提出一种节点连接态势感知的消息传输策略,以节点相遇时间顺序建立时序图模型,考虑时

延、投递率以及负载率三个因素计算节点转发消息的效用值,进而选取下一个中继节点.显然,该消息传输策略的前提是获取全网中节点的相遇信息.文献[7]提出一种基于效用转发的自适应机会路由算法 URD,在于过多的消耗割点资源,可能会导致负载不平衡.文献[8]利用节点的周期性间歇连通特性提出一种适用于 DTN 社区内数据传输的 PICD 算法,但未考虑消息传输可用路径感知问题. Milind R 等人^[9]提出车载 DTN 中基于效用路由算法 Max-Util,未考虑到节点间接触顺序以及网络动态变化引起节点间通信链路变化.

综合分析,在动态的网络环境下,节点之间链路随时间变化,仅依靠节点间通信时长来选择中继节点转发消息,使得节点间可用的通信路径被严重高估.基于社区划分算法^[10],本文提出一种基于连通时序效用的路由算法——Routing Based on Connected Sequence of Utility (RBCSU).该算法采用节点连通时序排序法衡量通信路径的可行性,并进一步考虑节点可达率、节点时延度和节点相似度计算节点效用值,选择出最佳中继节点.在保证通信路径用时最短的基础上,提高社区内传输消息成功率、减少网络开销和降低传输时延.

2 连通时序效用模型

2.1 连通时序

现有研究常采用静态或聚合的分析方法将节点间的链路以连接边表示节点连接强度.对于网络划分社区传输消息而言,这种方法简单直接,但未考虑到社区内节点间连接出现的时间顺序带来消息到达目的节点的延迟增大的影响.采用连通时序可以将节点间的相遇以时间顺序进行排序,以反映网络拓扑动态变化,进而,感知社区内节点间传输消息的通信路径连接情况,以保证消息能够快速到达目的节点.

假设网络中有节点集为 V ,节点之间建立的连接边为 E .节点保存与相遇节点的相遇信息,如表 1 所示,相遇信息包含相遇节点的 ID 及不同时段下的相遇持续时间.采用节点相遇起始时间和节点间连通持续时间对节点按时间顺序进行排序.假设节点 N_i, N_j 的第 k 次相遇的初始时间为 $t_{ij_start}^k$,节点间断开时间为 $t_{ij_end}^k$,则两节点的连通持续时间为 $\Delta t_{ij}^k = t_{ij_end}^k - t_{ij_start}^k$.节点 i 与节点 j 的连通时序为

$$\omega(e_{ij}) = \{(t_{ij_start}^1, t_{ij_end}^2), (t_{ij_start}^2, t_{ij_end}^3), \dots, (t_{ij_start}^k, t_{ij_end}^k)\} \quad (1)$$

对于社区消息传输机制而言,同一社区内节点之间在较短时间内可产生大量的相遇,而位于不同社区的节点间相遇则需较长时间,这表明社区的存在使得节点之间存在较大的空间相关性^[11].因此,由网络中节点对之间相遇时间顺序可推出网络中所有节点对按照时间轴的连通时序.

网络中所有节点对在时间段 $[0, T]$ 的连通时序排序的数学表达式如下:

$$X_T = \omega_{k+1}(e) - \omega_k(e) \quad (2)$$

式中, $\omega_k(e)$ 表示任意节点对在 t 时刻的相遇起始时间, k 为节点相遇次数.

由于节点连通时序保存了节点间相遇时间间隔、持续时间、链路先后建立的次序等信息,这些信息为评估通信路径的可靠性提供了较为准确的依据.如表 1 所示.

表 1 相遇信息

相遇节点	不同时段持续时间
N_1	$\Delta t_{11}, \Delta t_{12} \dots \Delta t_{1n}$
N_2	$\Delta t_{21}, \Delta t_{22} \dots \Delta t_{2n}$
...	...
N_m	$\Delta t_{m1}, \Delta t_{m2} \dots \Delta t_{mn}$

2.2 效用计算

随着网络内各个节点的移动,节点间相遇之后彼此交换本地相遇信息列表,在有限的时间尺度内,网络状态趋于稳定.利用节点的相遇先后顺序对网络中任意节点对进行连通排序,进而可以度量当前节点到其他任意节点通信路径的好坏.在此基础上,考虑同一社区内其他任意节点的相遇概率、平均时延及相似度计算节点的效用值,采用节点效用值比较法选出最优的下一跳中继节点.

节点可达率表示任意给定节点到达另一节点的相遇概率,消息的可达率由节点间的直接相遇概率和间接相遇概率两部分组成,当两个节点之间的可达率越大,消息的成功传输消息的可能性越大.

根据节点保存的本地相遇信息,可得节点间相遇总时长 T_{up} ,表达式如下:

$$T_{up_i,j} = \sum_{i=1}^n \Delta t_{up_i,j} \quad (3)$$

式中, $T_{up_i,j}$ 表示节点 i 和节点 j 在一个周期 T 内各个时段相遇时长的总和; n 表示相遇时段个数; $\Delta t_{up_i,j}$ 表示单个时段相遇总时长.

由式(3)可得节点间分离总时长,其公式表达式如下:

$$T_{\text{down},i,j} = T - T_{\text{up}} = T - \sum_{i=1}^n \Delta t_{\text{up},i,j} \quad (4)$$

进而可得单时隙下两个节点的相遇概率,如式(5)所示。

$$P_{\Delta_{\text{up},i,j}} = \frac{\Delta t_{\text{up},i,j}}{T_{\text{down},i,j}} \quad (5)$$

式中, $P_{\Delta_{\text{up},i,j}}$ 表示某个时隙下节点间的相遇概率,根据式(5)可得节点 i 和节点 j 在一个周期内各个时隙下的相遇概率,则节点间的总相遇概率可由式(6)所得。

$$P_{\text{enc}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\Delta_{\text{up},i,j}}) \quad (6)$$

依据概率路由算法的分析,节点间可经由中间节点进行消息传递,即节点间具有传递特性。该特性可由传递概率来表示,如式(7)所示。

$$P_{\text{tra}} = \prod_{h,k \in u(l)} P_{\text{enc}}(h,k) \quad (7)$$

式中, $u(l)$ 表示经由中间节点连接节点 i 和 j 的一条链路; h 和 k 依次表示这条链路上的相邻两个节点。

综上,节点间的可达率如下式表示。

$$Q_p = 1 - (1 - P_{\text{enc}}) \prod_{u(l) \in U(l)} (1 - P_{\text{tra},u(l)}) \quad (8)$$

节点时延度指的是节点总时延与当前节点的平均时延比例。时延度越大,表明转发消息的时延越长。

根据节点连通时序可以知道节点间通信路径的状态,进而在计算出消息在该路径上的最短时延,即节点间直接传输时延,如式(9)所示。

$$T_{\text{avg},i,j} = \frac{T_{\text{down},i,j}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta t_{\text{down},i,j}}{m} \quad (9)$$

式中, m 为周期 T 内节点断开连接的次数(为计算准确,未使用时隙进行计算); Δt_{down} 为节点断开时间。

进而可以近似得到节点间的中继时延,如式(10)所示。

$$T_r = \sum_{h,k \in u(l)} T_{\text{avg},h,k} \quad (10)$$

为了能够计算时延度,还需知道当前社区的平均时延,利用式(9),节点可以近似估算出社区的平均时延,如式(11)所示。

$$T_s = \frac{\sum_{h,k \in G_s} T_{\text{avg},h,k}}{n_s} \quad (11)$$

同时,节点为尽快传输消息,应以最小时延为优化目标,因此节点总体时延如式(12)所示。

$$T_{d,i,j} = \min(T_{\text{avg}}, T_s) \quad (12)$$

综上,得到节点间的时延度如下:

$$Q_T = T_d / T_s \quad (13)$$

节点相似度是指节点间共同拥有的邻居数。相似度越高,则节点间可用通信路径越多。

为了便于分析,本文将节点与邻居节点构成的边分为内部边和外部边。内部边指两个节点与共同邻居节点构成的边,其他则为外部边。由此得到节点间的相似度计算公式,如式(14)所示。

$$Q_s = \frac{|D_{\text{in}}|}{|D_{\text{in}}| + |D_{\text{out}}|} = \frac{2 \times |N_i \cap N_j| + 1}{|N_i| + |N_j| - 1} \quad (14)$$

式中, $|D_{\text{in}}|$ 指内部边数量, $|D_{\text{out}}|$ 指外部边数量。

通过以上系列的定义,可以得到网络中给定节点到其他节点的效用值 $U(i,j)$,具体计算方法如式(15)所示。

$$U(i,j) = \alpha Q_p + \beta \frac{1}{Q_T} + \gamma Q_s \quad (15)$$

式中, α, β, γ 为影响因子,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$,可用来调整可达率、时延度、相似度各自所占的比重。

3 RBCSU 算法

基于现有的 DTN 社区划分方法,提出了一种社区内路由算法。根据社区内采用节点间连通的先后时间顺序感知传输路径,综合考虑节点可达率、时延度和相似度三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知节点转发消息的能力,进而选择最优的携带消息者,使其成功将消息传输到目的节点。图 1 为消息投递流程图。

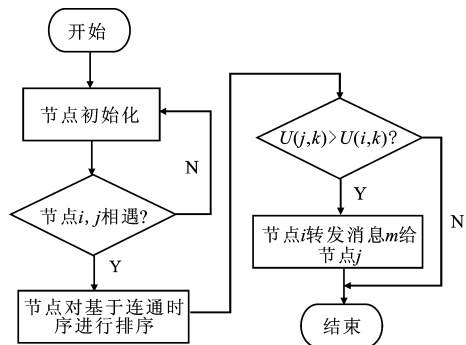


图1 消息投递流程图

首先,判断同一社区内两个节点是否相遇,若相遇,则节点间交换历史相遇信息;反之,节点继续判断是否有相遇。

其次,依据节点对的初始相遇时间和持续连通时间按照时间顺序上的连通排序;社区内节点的相遇频率高于与社区间,而在有限的时间尺度内,网络

状态趋于稳定. 因此, 由局部的节点连通状态推测出所有节点的连通顺序, 由此, 度量出当前节点到其他任意节点通信路径的好坏.

最后, 在节点通信路径预知的情况下, 利用基于效用值对节点的转发能力进行评估. 综合考虑节点的可达率、节点时延度和节点相似度计算节点的效用值, 并从邻居节点中选择效用值最大的节点作为下一跳消息的携带者. 针对效用值小的问题, 采用效用值大小对缓存中的所有消息进行排序(包括要接收的新消息), 然后删除效用值最小的消息, 存储更易传输到目的节点的消息. 若节点与新消息目的地的效用值最小, 则拒绝接收.

4 仿真验证及结果分析

本文采用机会网络(The Opportunistic Network Environment, ONE)^[12]对所提出的消息转发策略进行了仿真验证. 仿真环境设置如表 2 所示, 并且将 RBCSU 和 Epidemic、PRoPHET、SimBet 算法进行对比验证, 性能参数主要包括消息投递率、网络开销、平均投递时延三个方面. 实验结果如图 2~4 所示.

表 2 仿真参数设置	
参数	数值
网络大小	4 500 m×3 400 m
节点移动模型	随机移动模型
报文大小	[500 kB, 1 MB]
节点缓存/MB	[0, 50]
周期 T/h	24
时隙大小 Δt/h	1 h
系统参数 α、β、γ	α=0.6, β=0.3, γ=0.1
报文 TTL/h	5

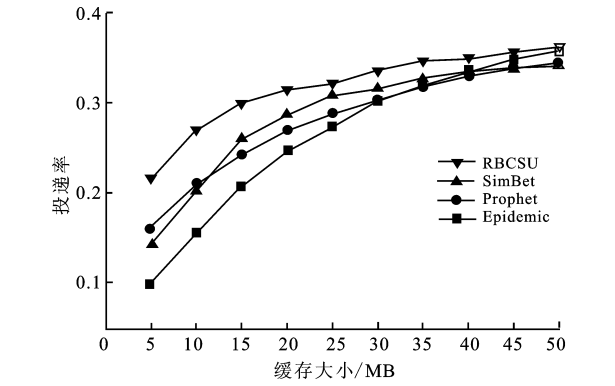


图 2 投递率随缓存大小的变化

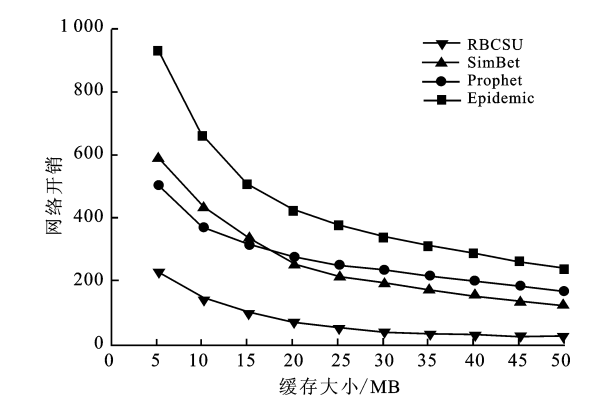


图 3 网络开销随缓存大小的变化

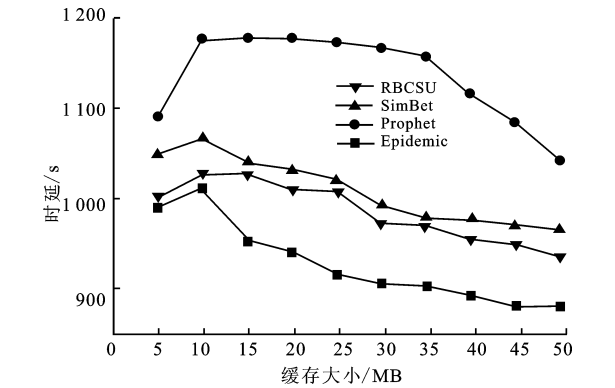


图 4 网络时延随缓存大小的变化

图 2 描述了四种路由策略的消息投递率与缓存变化之间关系. 可见, 随着节点缓存的增加, 投递概率也随之上升, 且提高速率逐渐减小. 图 3 所示的网络开销数据表明, 随着缓存大小增大网络开销逐渐减小, 其主要原因在于随着节点缓存增多, 网络转发消息的次数也就减少. RBCSU 相比于 PRoPHET、Epidemic 和 SimBet 算法, 网络开销分别降低了 72.2%, 82.5%, 70.9%. 其主要原因在于 RBCSU 利用效用值来选择中继节点, 降低了中继转发的盲目性, 并且调整了消息丢弃策略和删除节点效用值低的消息副本, 很好地控制了消息的副本数, 从而减少了不必要的网络开销. 图 4 中的消息投递平均时延随着节点缓存增大而降低, 最终趋向于定值, 节点缓存大于 45 以后时延趋向平稳. 数值结果表明 RBCSU 在投递平均时延上比 Prophet 路由降低了 13.2%, 比 SimBet 路由降低了 2.3%. 其主要原因在于 RBCSU 有针对性地选择效用值大的中继节点, 能够将消息副本快速地将消息转发出去, 避免了消息因生存时间 TTL 耗尽而被丢弃的情况发生, 从而降低了消息投递时延. 但是相比于 Epidemic 算法升高了 6.3%. 其主要原因在于 Epidemic 算法中节

点采用了概要向量(summary vector),比较节点之间的概要向量大小,高效地避免节点重复转发数据分组,同时也减少了数据传输消耗的网络时延。

5 结束语

为提高延迟容忍网络社区内消息传输性能,本文提出了一种基于连通时序效用路由算法。该算法首先采用节点初始相遇时间和连通持续时间对节点连通时序进行排序评估节点通信路径状态,进而综合考虑节点可达率、时延度和节点相似度3个因素计算节点效用值,最后根据节点效用值大小选择中继节点。仿真结果表明,本文提出的基于连通时序效用路由算法在消息投递率及平均时延方面均有所幅度提升,在网络开销方面性能最佳。

参考文献:

- [1] DTNRG, Delay tolerant networking research group[EB/OL]. [2016-02-18]. <http://www.dtnrg.org>. 2009.
- [2] Bhattacharjee S, Roy S, Bandyopadhyay S. Exploring an energy-efficient DTN framework supporting disaster management services in post disaster relief operation[J]. *Wireless Networks*, 2015, 21(3): 1033-1046.
- [3] Caini C, Firrincieli R, Livin M. DTN bundle layer over TCP:Retransmission algorithms in the presence of channel disruptions[J]. *Journal of Communications*, 2010,5(2):106-116.
- [4] Margalho M, Efrat A, Johnson T. Improving Robustness in DTN Networks that Carries Large Medical Files in Amazonia[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 14(1): 349-355.
- [5] 牛建伟,周兴,刘燕,等. 一种基于社区机会网络的消息传输算法[J]. *计算机研究与发展*, 2009,46(12): 2068-2075.
- [6] 吴大鹏,张普宁,王汝言. 节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(3):

44-52.

- [7] 王博,黄传河,杨文忠. 时延容忍网络中基于效用转发的自适应机会路由算法[J]. *通信学报*, 2010(10): 36-47.
- [8] 吴磊,武德安,刘明,等. 机会网络中面向周期性间歇连通的数据传输[J]. *软件学报*, 2013, 24(3): 507-525.
- [9] Penurkar M R, Deshpande U A. Max-Util: A utility-based routing algorithm for a vehicular delay tolerant network using historical information[C]//*Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics*. Springer India, 2016: 587-598.
- [10] Huang Hongcheng, Xu Chao. Community-based with the Connection Strength and Similarity for DTN Message Transmission Strategy[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2015, 11(6):2227-2235.
- [11] 蔡青松,牛建伟,刘燕. 机会网络中的消息传输路径特性研究[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(5): 793-801.
- [12] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. Brussels, Belgium: ICST, 2009:1-10.

作者简介:

刘科征 男,(1978-),博士,副教授.研究方向为无线自组网络、延迟容忍网络、应急通信网、融合通信。

黄春妮(通讯作者) 女,(1991-),硕士研究生.研究方向为延迟容忍网络、无线通信。

E-mail:chunnihuangcqupt@163.com.

胡敏 女,(1971-),博士,副教授.研究方向为通信网体系与协议、无线通信。

徐超 男,(1988-),硕士研究生.研究方向为延迟容忍网络。