

能耗自选演进机制的延迟容忍网络路由算法^①

赵 晨

(陕西交通职业技术学院, 西安 710018)

摘 要: 为了提高延迟容忍网络中数据投递过程节点能耗管理效率、改善数据在网络中的转发效率等, 本文引入节点间能耗博弈模型, 进而提出了一种基于能耗自选演进机制的延迟容忍网络路由算法(Efficient Routing Mechanism for Delay Tolerant Network based on Energy Consumption Strategy), 根据泛洪路由策略设计数据投递机制, 数据在网络中转发时, 节点依据自身能量剩余状态制定相应的投递操作, 对首先将数据投递至目的节点的中间节点予以一个单位的奖励, 利用节点策略博弈模型选取合理的数据投递操作, 以此改善节点转发数据能量消耗, 从而提高数据投递能量管理效率, 并提高数据转发效率. 仿真验证表明: 所提算法与对照算法相比在数据投递率、传输时延、网络开销等性能指标上表现出较好效果.

关键词: 延迟容忍网络; 节点间能耗博弈; 泛洪路由策略; 数据投递; 期望收益

Delay Tolerant Network Routing Algorithm Based on Energy Consumption Game Strategy

ZHAO Chen

(Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of node energy consumption management and enhance the forwarding efficiency of data during the data delivery process in the delay tolerant network, a delay tolerant network routing algorithm based on energy consumption demand evolution mechanism is proposed after introducing the node energy consumption game model. The data delivery mechanism is designed according to flood routing strategy, and the node can develop the corresponding delivery operation according to its own energy surplus when the data is sent to the network, giving a unit of the reward to the middle node for firstly delivering the data to the destination node. Then a reasonable data delivery operation is selected by node strategy game model to improve the energy consumption of nodes, promoting both of the data delivery energy management efficiency and data transmission efficiency. Simulation results show that this algorithm has higher data delivery ratio and lower transmission delay than the contrast algorithm.

Key words: delay tolerant network; energy consumption among nodes; flood routing strategy; data delivery; expected return

引言

在延迟容忍网络(Delay Tolerant Networks)中, 因为网络节点能量存储有限, 以及具有移动性等, 网络拓扑随时会发生变化, 且节点通信距离受限, 很难建立起稳定的数据投递路径^[1,2]. 为此, 研究人员提出了一种“存储-携带-转发”的路由模式^[3], 节点收到数据后进行缓存, 携带数据在网络中移动, 转发给遇到的其它没有缓存该数据的节点, 实现数据投递. 目前, 人们

对延迟容忍网络已有了一定深度的研究, 在网络通信^[4]、野外生物监控^[5]等场景中得到了应用.

为了改善 DTN 节点投递数据过程中能量消耗较高以及投递效率一般等问题, 学者们提出一些解决方案, 当前主流技术主要有: 基于能量强度控制、基于功率自适应控制及基于节点合作分布控制技术的 DNT 路由算法. 如 Gong ZH^[6]等人提出了一种基于密集节点能量强度控制的 DTN 路由算法, 采取节点剩余能量

① 收稿时间:2016-05-23;收到修改稿时间:2016-07-07 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005607]

阈值调控机制,降低了节点密集状态下能量消耗. Xu YB^[7]提出了一种节点能量强度共线度精度控制算法,改善了节点判定路由数据报文的精确度,降低了时延.然而基于能量强度控制的 DNT 路由算法对节点移动速度要求高,当节点处于高速移动时,此类算法将处于失效状态.

对此, Qiao F^[8]等提出了一种基于网络功率自适应控制的 DTN 路由改善算法,通过判断当前网络节点能量的功率消耗情况,弹性控制节点数据收发,降低了网络整体数据报文开销. Choon Sik^[9]等提出了一种基于欧里几何参数控制的网络功率自适应 DTN 路由链路稳定算法,降低了 DTN 节点运动时的路由抖动.但是,基于功率自适应控制的 DNT 路由算法对拓扑结构的流动性要求较高,一旦拓扑结构呈现剧烈变化,则极易导致网络路由出现抖动,降低该算法的适应性.

随后, Zhu L^[10]等提出了一种基于节点合作分布控制的 DTN 路由调整算法,通过判断各个节点间行为的一致性,减少相似数据分组报文发送,从而降低网络数据缓存水平,提高网络的传输能力. Tao Y^[11]等提出了一种基于路由节点定位行为控制的 DTN 路由稳定算法,通过定位机制降低路由的抖动,提高算法对恶劣环境的适应.然而,此类由于需要对节点进行实时行为判断,导致网络控制效率较低.

针对延迟容忍网络中数据投递能耗管理效率偏低、数据转发效率不高的问题,本文提出了一种基于能耗自选演进机制的延迟容忍网络路由机制.该算法创新之处在于:引入节点策略博弈模型,数据投递过程不仅考虑当前中间节点的剩余能量值,还要通过转发数据至目的节点予以一个单位的奖励有关;通过建立 DTN 网络节点能耗博弈模型,使中间节点在数据投递环节获得最佳期望收益,激励节点参与数据转发;最后,利用演化自选演进(Evolutionary Games Strategy, EGS)说明节点采取的自选演进,使网络节点采取最优投递操作,在一定程度上提高数据投递效率.

1 本文网络模型及定义

首先,本文给出以下网络模型和基本定义,描述如下:

(1) DTN 网络中的节点具有自由运动且与通信范围重叠内节点可以建立邻居关系,进而可以交互彼此没有缓存过的数据,如图1所示,节点S与B即可通信.

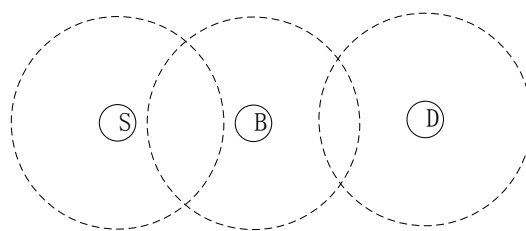


图1 节点通信示例

(2) 在数据投递环节, DTN 节点需要从算法定义的有限自选演进集中选取相应策略,策略集如下:

$$N = \{1, 2, 3 \wedge k\} \quad (1)$$

(3) 网络中节点,与其他节点相互干扰的情况服从以下分布数集:

$$Y = \{0, 1, 2 \wedge i\} \quad (2)$$

依据上述数集,当前节点确定网络中有几个节点与其进行数据交互,进而转发数据至其他节点.

(4) 定义 DTN 网络节点选取某一投递策略概率集合如下:

$$M = \{(x_1, \wedge x_k) | x_j \geq 0, \sum_{j=1}^k x_j = 1\} \quad (3)$$

式中, j 为节点选取的转发策略, K 为算法定义的混合策略集数, x_j 即是当前节点要转发数据时选取的策略 j 的概率.

(5) 定义本算法当前网络节点采取策略 j 的收益函数如下:

$$U_m(j, x) = \bigoplus U(j, i, x) \quad (4)$$

式中, x 为网络中节点数, $U(j, i, x)$ 是网络节点数为 y 且干扰节点数为 i 时,当前节点可以获得的收益. 可以知道,当前节点获取的收益取决于自身转发数据所得,以及其他节点参与数据投递情况.

获知当前节点可以获得的收益后,可得出其期望收益为:

$$F(x, x) = \bigoplus U_m(j, x) \quad (5)$$

可知,当前节点期望收益是其投递数据时采取的策略 j 的概率 x_i 与其当前获得的收益 $U_m(j, x)$ 做积的和值.

(6) 网络节点需要多次交互,进行博弈才会达到平衡稳定状态.下面对演化自选演进(Evolutionary Games Strategy, EGS)进行定义描述:在网络初始阶段,节点总数描述为 $x \in N$,之后节点集合可能会加入依据不同群体描述的其他变异节点,定义为 $mut \in N$,此时

令参数 $\varepsilon \in (0,1)$ 为新加入的归一化变异节点占比, 可得出网络变异后节点总数表示为:

$$x \in \varepsilon \text{mut} + (1-\varepsilon)x \quad (6)$$

网络少数节点变异后, 未突变节点的期望收益表示成 $\varepsilon \text{mut}_F(\int x, \sum (1-\varepsilon)x)$, 可知部分节点变异后, 网络节点的期望收益函数具有二元性, 则节点期望收益由节点总数以及变异后群体描述来决定。

2 本文DNT路由算法

2.1 算法描述

本文假定 DTN 网络中节点分布稀疏, 彼此进去相互通信距离内即可有数据交互机会, 具体视图如图 1 所示。根据现有文献可知, 节点间接触时间服从参数为 $\lambda > 0$ 的指数分布^[12]。

在数据投递过程中, 通过判定数据包结构中时间戳字段可以知道数据生成时间, 数据在网络中存活时间超过生存期时, 删除过期数据以便有效利用节点缓存空间。

下面我们通过节点能耗博弈机制, 分析节点如何在投递数据时, 依据节点剩余能量进行博弈进而判断是否转发数据给其他节点。

Src	Dst	Timestamp	PreviousHop	NextHop	Data
-----	-----	-----------	-------------	---------	------

图2 数据包结构

本文算法假定网络节点在数据投递过程中, 存在两种不同的能量活动状态^[13], 即充分激活状态 T 和部分激活状态 T' , $T' < T$ 。在每个数据生存时间 T 内, 中间节点依据当前自身剩余的能量状态, 确定采取哪种激活状态。节点剩余能量状态有三种情况: 满能量(F)、部分能量(A)和无能量(E)。在满能量状态时, 节点被充分激活; 无能量时, 节点因为能量限制无法投递其他数据。

在数据投递过程中, 局部区域存在数据交互的源节点、转发节点对, 源节点在时间段 $T=t_{i+1}-t_i$ 内生成数据, 其中 $i=0, 1, 2, \dots$ 等。下面具体描述本文设计的节点能耗博弈模型:

1) 节点依据不同能量状态采取相应转发策略时的概率为 $P_i(a)$, 即节点剩余能量为 i 采取状态 a 时的几率。当节点能量为充分激活状态 F 时, 则表示为 $P_F(T)$;

2) 网络节点依据不同活动状态 T 或 T' 时, 节点采取相应策略集为 $H=\{x, 1-x\}$, H 为节点混合转发策略集, x 为节点选取策略 T 的概率; $(1-x)$ 为其他节点选取转发策略 T' 的概率。

数据在存活时间 T 内, 被投递至目的节点的概率为 $P=1-R_T$, 其中 R_T 通过式(7)得出:

$$R_T = \sum_{\lambda=1}^{\infty} (1-\lambda T) e^{-\lambda T} \quad (7)$$

可知, R_T 呈现指数分布态势, 式中 λ 表示指数分布的参数, e 表示自然底数, 显然 R_T 为有限收敛函数。

当中间节点首次成功投递数据至目的节点时, 会得到一个单位的奖励, 采取状态 T 得到一个收益奖励的概率为 $P_{Fir}(T, N, x)$, 相应地, 采取状态 T' 得到一个收益奖励的概率为 $P_{Fir}(T', N, x)$, 则:

$$P_{Fir} = (T', N, x) = (1-R_{T'}) \sum_{K=1}^N C_{K-1}^{N-1} \frac{(1-(1-R_{T'}))^N}{K} \quad (8)$$

式中, $R_{T'}$ 值由式(7)决定, N 表示混合转发策略集合, 可知转发节点的期望收益概率受到当前投递数据采取的策略以及能量状态 T' 影响。

当转发节点依据当前能量状态采取 T' 时收益为:

$$U(T', x) = \sum_{N=1}^{\infty} P(K=N) P_{Fir}(T', N, x) \quad (9)$$

2.2 本文算法复杂度分析

由式(1)~式(7)可知, 本文算法计算过程中的主要代价为两个方面: 激励过程中付出的时间成本及中间节点数据传输时对下一跳节点的空间搜寻代价。从激励过程可知, 激励过程中仅对若干性能不佳的节点进行数据激励, 时间复杂度为 $O(t)$, 而常用的文献[6]算法及文献[8]算法均采用冒泡算法进行分组, 时间复杂度为 $O(t^2)$, 显然要大大高于本文算法。本文算法在节点搜寻的过程中, 采用简单排列的方式, 仅需要将下一跳节点放置于本节点前, 然后按照顺序进行传输优化, 因而空间复杂度为 $O(o)$, 且随着节点数量的不断增加, 空间复杂度均按线性方式进行增加。因此本文算法的时空复杂度较低。

3 仿真和结果分析

3.1 仿真环境设置

为了验证本文算法的有效性, 采用 OPNET14.5 仿真工具^[14], 对所提本文算法以及文献[15]的 MD 算法、文献[16]的 BLSA 路由算法进行仿真, 仿真场景大小

为 5000m×3000m, 仿真运行时间为 1h, 节点移动模型采用 Shortest Path Map Based Movement, 节点数设置为 1000 个, 本文算法采用的主要参数值设置如表 1.

表 1 本文参数

参数	λ	θ	θ'	$P_0(\theta)$	$P_0(\theta')$
参数设定值	0.01	100	40	0.3	0.8

3.2 仿真结果分析

(1) 数据投递率

数据投递率是指成功投递至目的节点的数据占网络生成总数据的比值. 仿真结果如图 3 所示, 三种算法随着节点缓存变大, 数据投递率均在增加, 但本文算法的数据投递率要高于文献[15]、文献[16]两种算法, 在缓存大小为 60Mbit 时, 本文算法的投递率达到了 89.965%, 而文献[15]、文献[16]分别为 78.648%、59.994%, 主要是因为本文引入节点博弈状态模型, 对成功投递数据的节点予以一个单位的奖励, 激励节点参与到数据转发中, 同时对节点能量进行管理, 降低冗余数据转发, 提高了节点能量利用效率, 促使节点有更多能量用于数据投递. 而 MD 算法、BLSA 算法均没有采取有效方法限制不必要消息转发, 存在一定的冗余数据, 导致数据投递率要差于本文算法.

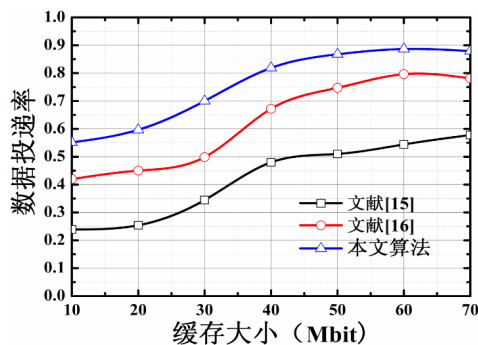


图 3 数据投递率测试结果

(2) 数据传输时延

数据传输时延表示网络中产生的所有数据被成功投递至目的节点的时间与网络运行时间的比值, 该指标较低则说明算法传输数据效率高, 节省网络资源. 仿真结果如图 4, 由图可以知道, 三种算法的数据传输时延均随着节点缓存增加而变大, 其中 MD 算法的数据传输时延最大, 当缓存为 70Mbit 时, 其时延约为 3203.16s, 而本文算法传输时延要低于其他两种算法, 约为 2189.71s, 主要是因为本文提出算法优化了数据转发策略, 避免不必要数据投递, 在一定程度上加快

了数据传输, 进而降低数据传输时延. 对比算法数据转发产生较多副本, 网络转发性能不高, 导致数据传输时延高于本文提出算法.

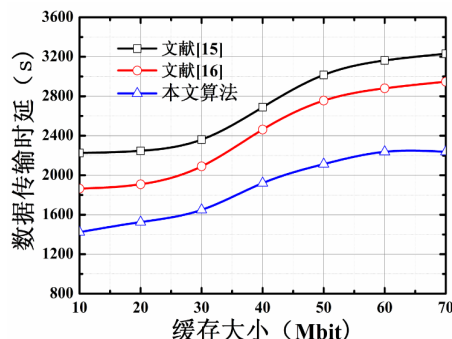


图 4 三种算法的数据传输时延测试

(3) 网络路由开销

网络路由开销表示产生的总数据个数与被成功投递的数据个数的差值, 同被成功投递的数据个数的比值. 仿真结果如图 5 所示, 在缓存大小为 70Mbit 时, 本文算法的网络路由开销最低, 约为 2.67, 显著低于文献[15]、文献[16]算法, 分别为 5.94、4.12, 与对照组相比, 本文算法的网络开销分别节约了 51.68%、32.77%, 主要是因为本文根据节点所剩余的能量值选择相应的投递策略, 且控制不必要网络数据转发, 提高了数据投递效率, 相应也提高网络节点能耗利用率. 但对 MD 算法、BLSA 算法在数据投递时生成较多数据副本, 造成节点不必要的能量消耗, 导致网络路由开销较高.

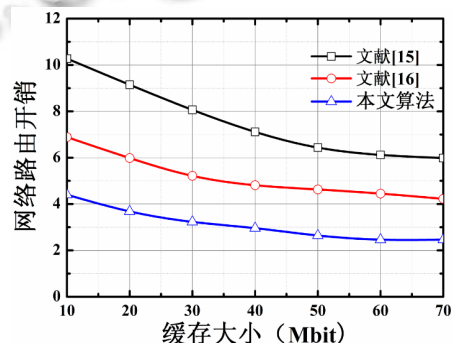


图 5 不同缓存条件下的三种算法的网络路由开销

(4) 数据存储时间

数据存储时间表示数据在网络中转发过程中, 在数据有效存活时间内被各个节点平均缓存的时间, 表征算法数据传输效率的性能指标. 该指标值越小, 即

数据传输效率越高。

图6为数据存储时间仿真结果,可知各算法随着节点缓存增加,数据存储时间也相应变大,但本文性能要优于其他对比算法,在缓存大小为70Mbit时,本文算法的数据存储时间为1458s,文献[15]、文献[16]两种算法的时耗分别为2387s、1994s,较对照组算法分别提高了38.92%、26.88%,这是因为本文优化了数据转发机制,对首次成功转发数据至目的节点的中间节点予以一个单位的奖励,激励网络节点参与到转发操作中,提高数据传输效率,进而降低了数据存储时间。而MD算法、BLSA算法在数据传输过程中存在冗余转发操作,造成网络中出现较多数据副本,加重了节点数据存储时间,使其存储时耗要高于本文提出算法,在缓存大小为70Mbit时,高出本文算法大约38.92%、26.88%左右。

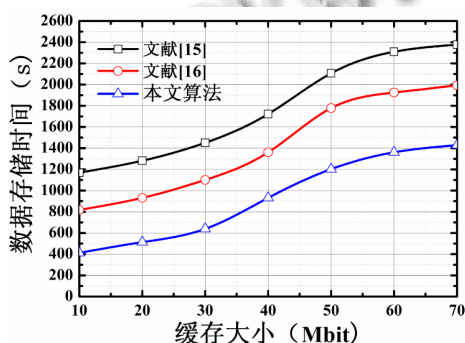


图6 三种算法的数据存储时间测试

4 结论

本文针对延迟容忍网络中数据投递过程节点能耗管理效率偏低、数据转发效率不高等问题,提出了一种高效能耗管理的延迟容忍网络路由机制,引入节点间能耗博弈模型,优化数据转发操作,从节点策略博弈集中选取最佳转发策略,提高了消息转发效率,可降低28%左右的节点数据转发能耗。

由于本文算法通过节点能耗博弈机制来优化转发操作,实践中需要针对节点进行能耗的判断与递归;此外由于在节点策略博弈时,需要通过多次取样方可实现集合的普适性,因而需要经过一定的运转时间后才能进行稳定裁决。因此,今后将针对本文算法实现过程中的这些问题,继续研究如何利用节点自选演进提高节点数据转发参与度,提高网络数据吞吐,进而优化网络性能。

参考文献

- 1 周欢,任东,徐守志.延迟容忍网络中能量有效的接触探测研究.电子与信息学报,2015,13(6):1285-1290.
- 2 杨鹏,刘豆,王汝言.节点剩余能量均衡的机会网络路由机制.系统工程与电子技术,2015,6(8):1894-1901.
- 3 Panda M, Ali A, Chahed T. Tracking message spread in mobile delay tolerant networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2016, 17(8): 256-261.
- 4 Djamaludin CI, Foo E, Camtepe S. Revocation and update of trust in autonomous delay tolerant networks. Computers & Security, 2016, 9(2): 161-169.
- 5 Menesidou SA, Vardalis D, Katos V. Automated key exchange protocol evaluation in delay tolerant networks. Computers & Security, 2016, 26(2): 691-697.
- 6 Gong ZH, Wang JJ. CRS: A congestion control routing algorithm for security defense based on social psychology and game theory in DTN. Journal of Central South University, 2013, 2(7): 440-450.
- 7 Xu YB. An optimization model for fragmentation-based routing in delay tolerant networks. Science China (Information Sciences), 2016, 2(139): 185-200.
- 8 Qiao F, Krishnamachari B, Zhang L. DAWN: A density adaptive routing for deadline-based data collection in vehicular delay tolerant networks. Tsinghua Science and Technology, 2013, 3(21): 230-241.
- 9 Shin CS, Kim HD, Setoguchi T, Matsuo S. A computational study of thrust vectoring control using dual throat nozzle. Journal of Thermal Science, 2010, 6(1): 486-490.
- 10 Zhu LT, Li Y. Application of contact graph routing in satellite delay tolerant networks. Journal of Space Science, 2015, 1(9): 116-125.
- 11 Tao Y. Adaptive clustering hierarchy routing for delay tolerant network. Journal of Central South University, 2012, 6(2):1577-1582.
- 12 El-Azouzi R, Pellegrini FD, Kamble V. Evolutionary forwarding games in delay tolerant networks. Proc. of WiOPT, 2013, 29(5): 16-24.
- 13 Lin J, Xiong N, Vasilakos AV. Evolutionary game-based data aggregation model for wireless sensor networks. Proc. of Communications, 2013, 5(12): 1691-1697.
- 14 陈敏.OPNET网络仿真.北京:清华大学出版社,2004:1-90.
- 15 Keranen A, Karkkainen T, Ott J. Simulating mobility and DTNs with the ONE. Journal of Communications, 2013, 5(2): 92-103.
- 16 Paul PS, Ghosh BC, De K. On design and implementation of a scalable and reliable Sync system for delay tolerant challenged networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2016, 36(4): 376-382.