

46%~60%的延迟.

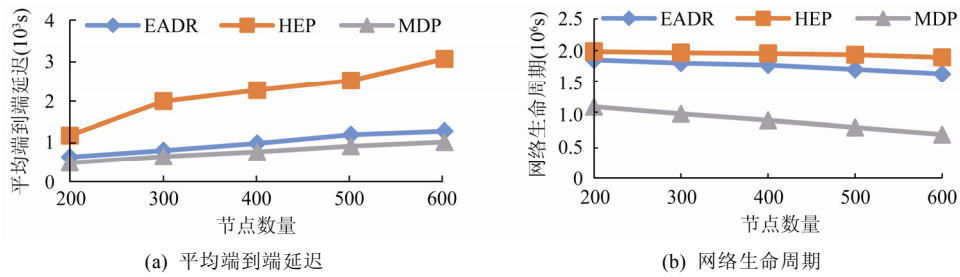


Fig.2 Performance comparison under different number of nodes

图 2 不同节点数量下的性能比较

在图 2(b)中,随着网络中节点数目的增多,节点需要转发的数据增多.MDP 因为总是选择最先苏醒的节点作为下一跳,导致其能量消耗过快而过早死亡,因此网络生命周期最短.HEP 则选择转发集中能量水平最高的节点作为数据传输的下一跳,因此获得了最长的网络生命周期,但是其延迟最大.EADR 的网络生命周期接近 HEP,并且提高了 MDP 接近 100%的生命周期.

总的来说,在不同节点数量的情况下,相对于 HEP 和 MDP,EADR 综合考虑了节点的能量水平和延迟,通过均衡节点之间的能量消耗,获得了较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

4.2 节点占空比的影响

考虑网络中的节点的占空比分别为 1%,2%,3%,4%,5%的场景,分别对比不同算法在不同规模网络中的平均端到端延迟和网络生命周期.实验的结果如图 3 所示.

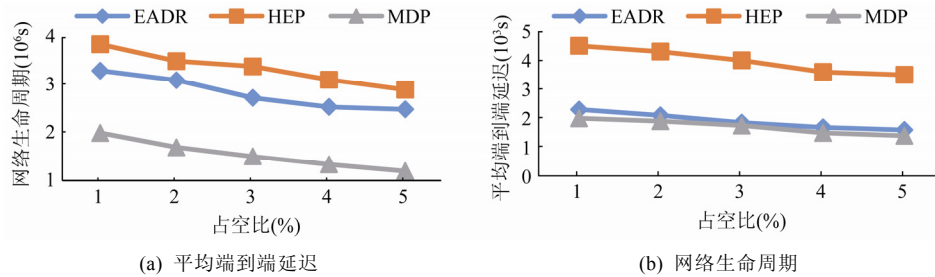


Fig.3 Performance comparison under different duty cycles

图 3 不同占空比下的性能比较

从图 3(a)中可以看出,随着节点占空比的提高,EADR,HEP 和 MDP 的平均端到端延迟均减少.这是由于占空比的提高,节点苏醒次数增加,节点间的睡眠延迟减少.EADR 的平均端到端延迟接近 MDP,相对于 HEP,能够减少接近 100%的延迟.

如图 3(b)所示,占空比提高,节点的睡眠时间变短,相对应的工作时间变长,节点消耗的能量变多,减少了网络生命周期.EADR 比 MDP 算法延长了大约 50%的生命周期.HEP 算法比 EADR 算法大约延长了 11%~19%的生命周期.

总的来说,在不同占空比的情况下,EADR 均能获得较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

4.3 β 对算法的影响

在该实验中,将研究参数 β 对网络平均端到端延迟和网络生命周期的影响.设置节点数量为 200,节点的占空比为 1%.

如图 4(a)所示, β 的取值影响着节点的转发决策.随着 β 的增大,节点的平均端到端延迟逐渐增大.当 $\beta=0$ 时,决策过程由最小延迟决定;当 $\beta=1$ 时,决策过程由最高能量决定.因此,随着 β 的增大,转发决策过程逐渐受节点能量水平的影响,所以平均端到端延迟变大.但是,与之相对应,随着 β 的增大,网络生命周期逐步上升,如图 4(b)所示.

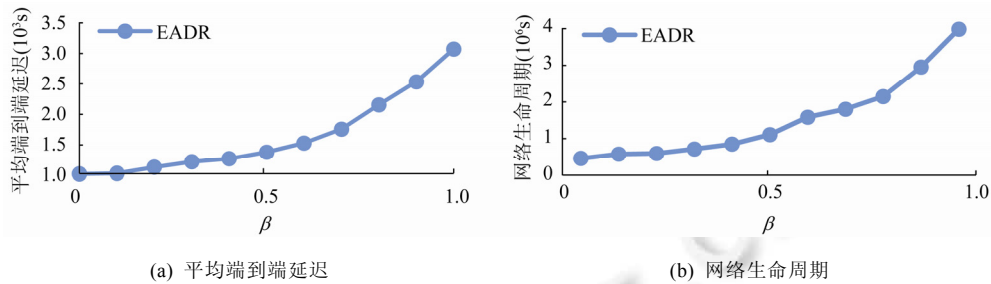


Fig.4 Performance comparison with different β

图 4 不同 β 下的性能比较

所以,当 β 较大时,节点在选择转发节点时会优先考虑节点能量水平,算法趋于节点间能耗均衡,延长网络生命周期;当 β 较小时,优先考虑端到端延迟较小的节点,算法趋于时效性.

5 总结

本文提出了一种基于能量感知的动态路由算法 EADR. EADR 根据链路质量为每个节点选取了转发集,保证了数据传输成功率.节点在选取转发节点时,利用决策因子根据与邻居节点之间端到端延迟和能量水平进行数据转发.实验结果显示, EADR 获得了较长的网络生命周期,同时具有较低的端到端延迟.

在未来的研究中我们将考虑把工作扩展到网络中通信链路不对称且节点可移动的场景.(1) 对于通信链路的不对称性,我们将考虑链路的动态性,研究能够反映实际环境中动态链路的通信模型,并研究在此模型下具有低延迟、低能耗的数据路由协议.(2) 对节点可移动的网络,我们将研究节点的移动模式及网络拓扑变化规律,研究如何规划移动 sink 的路线以实现近距离地收集节点的数据,使得节点转发的数据量能极大地减少,降低能量消耗以延长网络生命周期.

References:

- [1] Liang JB, Zou SJ, Chen NJ, Li T. Delay-Constrained data collection without aggregation in wireless sensor network with mobile collector. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(7):1822–1840 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4926.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004926]
- [2] Pantazis N, Nikolidakis SA, Vergados DD. Energy-Efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013,15(2):551–591.
- [3] Gu Y, He T. Dynamic switching-based data forwarding for low-duty-cycle wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011,10(12):1741–1754.
- [4] Xiao M, Wu J, Huang L. Time-Sensitive utility-based single-copy routing in low-duty-cycle wireless sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2015,26(5):1452–1465.
- [5] Ghadimi E, Landsiedel O, Soldati P, *et al.* Opportunistic routing in low duty-cycle wireless sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2014,10(4):67–105.
- [6] Gu Y, He T. Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2007. 321–334.
- [7] Guo S, Kim S M, Zhu T, *et al.* Correlated flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: Proc. of the 19th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Vancouver: IEEE, 2011.383–392.

- [8] Su JS, Hu QL, Zhao BK, Peng W. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010,21(1):119–132 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]
- [9] Guo S, He L, Gu Y, *et al.* Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. *IEEE Trans. on Computers*, 2014,63(11):2787–2802.
- [10] Gu Y, He T, Lin M, *et al.* Spatiotemporal delay control for low-duty-cycle sensor networks. In: *Proc. of the 30th IEEE Real-Time Systems Symp.* Washington: IEEE, 2009.127–137.
- [11] Cao Y, Guo S, He T. Robust multi-pipeline scheduling in low-duty-cycle wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM.* Orlando: IEEE, 2012. 361–369.
- [12] Chen LY, Wang JL, Zhang JY, Wang Q, Liu Y, Yin F, Luo Q. Scheduling scheme algorithm in low-duty-cycle WSN. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(3):631–641 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4401.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004401]
- [13] Zuniga M, Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: *Proc. of the 1st IEEE Communications Society Conf. on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks.* Santa Clara: IEEE, 2004. 380–382.
- [14] Duan Y, Wu XB, Chen GH. Dynamic data forwarding in low-duty-cycle sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2011(S2):145–151 (in Chinese with English abstract).
- [15] Chen Q, Gao H. Dynamic switching based real-time routing in low-duty-cycle wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2015,36(10):224–234 (in Chinese with English abstract).
- [16] Fan Z. Delay-Driven routing for low-duty-cycle sensor networks. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013,9(9):1–11.
- [17] Maróti M, Kusy B, Simon G, *et al.* The flooding time synchronization protocol. In: *Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems.* New York: ACM, 2004. 39–49.

附中文参考文献:

- [1] 梁俊斌,邹绍军,陈宁江,李韬. 传感网中延迟限定的非汇聚数据移动式收集. *软件学报*, 2016,27(7):1822–1840. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4926.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004926]
- [8] 苏金树,胡乔林,赵宝康,彭伟. 容延容断网络路由技术. *软件学报*, 2010,21(1):119–132. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3689.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03689]
- [12] 陈良银,王金磊,张靖宇,王强,刘燕,殷锋,罗谦. 低占空比 WSN 中一种节点休眠调度算法. *软件学报*, 2014,25(3):631–641. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4401.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004401]
- [14] 段轶,吴小兵,陈贵海. 低占空比无线传感器网络中的动态数据传输协议. *计算机研究与发展*, 2011(S2):145–151.
- [15] 陈权,高宏. 低占空比无线传感器网络中基于动态切换的实时路由协议. *通信学报*, 2015,36(10):224–234.



蒋婵(1980—),女,广西合浦人,讲师,主要研究领域为无线传感器网络.



王田(1982—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网,移动计算.



梁俊斌(1979—),男,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络.



刘睿(1989—),男,硕士,主要研究领域为分布式数据管理,数据库系统,移动计算,普适计算.



刘晓东(1990—),男,硕士,主要研究领域为无线传感器网络.