

传感器网络中基于次优距离的多跳路由算法^{*})

窦金凤 郭忠文 张光旭 王小华 高新贺

(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

摘要 能量优化是无线传感器网络研究中最重要的问题之一。在研究多跳通信中,平衡传输能耗和接收能耗,从而在最小化通信总能耗的基础上,引入最优通信范围。然后,提出一种基于次优距离的多跳路由算法。该算法基于次优距离在局部圆中随机选取传感器结点作为中转结点,保证了在最优通信范围附近选取中转结点。仿真结果验证了该算法有效地节省了网络能量,提高了网络生存期。

关键词 无线传感器网络,最优通信范围,次优距离,多跳分析,数据传输

Sub-optimal Distance Based Multi-hop Routing Algorithm and Analysis for Sensor Networks

DOU Jin-feng GUO Zhong-wen ZHANG Guang-xu WANG Xiao-hua GAO Xin-he

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract In the wireless sensor networks, saving energy is an important aim. It introduces an optimum radio range, considering the balance between the transmission energy consumption and the receiving energy consumption to minimize the energy consumption in multi-hop communication. Then a sub-optimal distance based multi-hop routing algorithm is proposed, in which the relay is selected randomly in a local circle. Thus, the sensor nodes near the optimum radio range are selected as the relays. Simulations show that the algorithm can save more energy and prolong the network lifetime.

Keywords Wireless sensor networks, Optimum radio range, Sub-optimal distance, Multi-hop analysis, Data transmission

1 引言

由多个具有计算和感应功能的低功率多功能传感器结点组成的无线传感器网络(WSNs),在军事入侵检测、环境信息采集以及其他很多领域具有广阔的前景^[1,2]。但这种微型传感器的使用寿命受电池能量的限制。在初次布置以后,传感器网络很长一段时期放置在人不能到达的地方。因此,传感器网络研究中最重要问题之一就是能量优化,最大化网络生命周期^[3,4]。

由于过多的传输能量消耗,传统的单跳通信只局限在小型网络的应用中。而多跳通信减少了传输能耗,可以适用于大型网络。其中,地理路由协议通过传感器结点的物理位置信息建立多跳通信路由,将数据传送到需求区域而不是整个网络^[3]。通过这种方式,数据每跳被传送到距离基站较近的位置。例如,在低传送功耗算法(MTE)^[5]中,每个传感器结点总是将数据包沿着基站(BS)的方向传送到它的相邻结点,直到数据包到达BS为止。然而,这些多跳通信方式并没有详细考虑到通信范围RR(the radio range),这可能会增加接收能量消耗。近来,有些路由算法涉及到了通信范围,例如实时路由算法^[6],GAF^[7],GeRaF^[8,9]等等。然而,这些通信范围只是由传感器物理特征决定的物理通信范围,并没有考虑优化网络能耗。文献^[10]研究过一种调整通信范围的方案,但只能适用于线性网络中。文献^[11]提出过一种最佳最局部化跳数的路由方案,但它只局限于Ad hoc无线通信网络中。因而,从研究通信范围出发,平衡传输能耗和接收能耗,

可以最小化传感器网络通信总能耗,提高网络生存期。由此本文引入一个最优通信范围、最小化通信总能耗,并且以此为基础提出了一种基于次优距离的多跳路由算法,用来优化传感器网络中的能耗。最后,通过仿真对其性能进行了评估。

当然,传感器结点本质节能的唯一方法就是关闭无线电通讯,这一点已得到公认。相关的算法有水下传感器网络节能方法^[12],SPAN^[13],STEM^[14],GAF和GeRaF等等。因此,网络中的结点可能处于活动状态,也可能处于休眠状态。但是,从源结点开始到目的地的一次成功通信都需要消耗能量,包括传输能耗和接收能耗。因此,不管网络是不是使用休眠模式,本文通过平衡传输能耗和接收能耗对传输距离进行讨论来优化网络总能耗,这一点具有很大的价值。

2 能量模型与最优通信范围 R_{opt}

众所周知,感知和计算所需要的能量消耗比通信能量消耗低得多,所以本文仅考虑通信能耗^[15],它包括传输能耗和接收能耗。使用了文献^[16]提出的能量模型。因此, l 位数数据传输 r 距离的传输能耗为:

$$E_{Tx}(l, r) = E_{Tx-dec}(l) + E_{Tx-amp}(l, r) = E_{dec}l + \epsilon_{amp}lr^{\alpha} \quad (1)$$

接收 l 位数据的能量消耗为:

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-dec}(l) = E_{dec}l \quad (2)$$

其中,运行发送和接收电路所需的无线通信能耗 $E_{dec} = 50\text{nJ/bit}$,路径损耗指数 $\alpha = 2$ ($r < r_0$)或者 $\alpha = 4$ ($r \geq r_0$),门限距离 $r_0 = 100\text{m}$, ϵ_{amp} 是发送/接收电路参数,表示如下:

$$\epsilon_{amp} = 100\text{pJ/bit/m}^2 (\alpha = 2) \text{ 或者}$$

^{*})基金项目:国家863计划(2006AA09Z113);908专项“数字海洋”(908-03-01-07)。窦金凤 讲师,研究方向为无线传感器网络等;郭忠文教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络、海洋信息分布式处理技术等。

$$\epsilon_{amp} = 0.013 \text{ pJ/bit/m}^4 (\alpha=4) \quad (3)$$

在无线传感器网络中,每个源结点向 BS 发送数据的通信能耗与传输跳数、传输距离相关。跳距过短将导致接收能量的增加,跳距过长则容易导致过度的传输能耗。因此寻求一个平衡传输能耗和接收能耗的方案是必不可少的。如果能够找到最优跳数和最优通信范围,那么通信能耗将降到最低限度。

假设从源结点到 BS 要经过 k 跳传输 D 的距离,那么总能耗为:

$$E = \sum_{i=1}^k (E_{Tx}(l, h_i) + E_{Rx}(l)) \\ = \sum_{i=1}^k (\epsilon_{amp} h_i^\alpha + 2E_{dec}) l, \sum_{i=1}^k h_i = D \quad (4)$$

为了最小化 E , 当所有的跳距等于 D/k 时, 将 E 的表达式对 k 求得:

$$E' = dE/dk = 2E_{dec} l - D^\alpha \epsilon_{amp} l (\alpha-1) / k^\alpha \quad (5)$$

令 $E' = 0$, 可以求得最优跳数

$$k_{opt} = \sqrt[\alpha]{\epsilon_{amp} (\alpha-1) / (2E_{dec})} D \quad (6)$$

定义最优通信范围为 R_{opt} , 它不依赖于 D 。公式如下:

$$R_{opt} = \sqrt[\alpha]{2E_{dec} / ((\alpha-1)\epsilon_{amp})} \quad (7)$$

因此,如果每一跳的传输距离正好是最优通信范围 R_{opt} , 那么能量消耗将降到最低。然而在实际应用中,传输距离往往不是最优通信范围,因此本文针对高密度无线传感网络提出一种路由算法,使得传输距离尽可能接近最优通信范围,称之为次优距离。注意本文中的通信范围 R_{opt} 与 GAF, GeRaF 和文献[13]等的通信范围(由传感器结点的物理特征决定的最大通信范围)是不同的。

3 基于次优距离的多跳路由算法(SDMR)

3.1 算法假设

- 1) 每个结点的地理位置是可知的。
- 2) 所有结点是同构的,而且初始能量相同。
- 3) 结点的分布是均匀的,结点密度足够高。一个典型的传感网络可能由成千上万个微型传感器组成,其密度可达到 20 nodes/m^3 [17]。
- 4) 结点能够根据与接收者的距离远近来自动调整它们的通信范围。

5) MAC 协议不在本文的研究范围内,使用已经成熟的 MAC 协议。

3.2 算法基本思想

对于一个网络而言,如果每一个局部圆含有一个结点的可能性很高,那么就称此网络为高密度网络。SDMR 算法在一个半径为 r 的局部圆中,随机选择结点来中转数据。即,当结点 S (源结点或者中转结点)需要传送数据包时,它以 R_{opt} 来广播数据包。基于 S 和基站 BS 的地理位置,画一条线 LN , 在 LN 上距离 S 为 R_{opt} 处为圆心 O , 以 O 为圆心画一半径为 r 的圆 C 。因此每一个传送数据包的结点都有自己的 LN , O 和 C 。除非 BS 本身在通信范围($R_{opt} + r$)内,否则所有与圆心 O 距离小于等于 r (即在局部圆内,如图 1 所示)的结点将接收这个数据包,并且随机选择充当中转结点。那么,当 r 越小时,传输距离越接近最优通信范围,所以称之为次优距离。因而,次优距离与半径 r 有关。很明显, r 不能太大。当 r 足够小的时候,次优距离与最佳通信范围更加接近,从而能量也被更好地优化。

3.3 算法实现过程

当结点 S (源结点或者中转结点)需要传送数据包时,它以 R_{opt} 来广播数据包。数据包包含下列字段: $source_address$, $BS_address$, $R_j_address$, LN_j , O_j , C_j , $data$ 。其中, $source_address$, $BS_address$ 和 $R_j_address$ 分别代表源结点、目的结点和第 j 跳中转结点 R_j 的地址。 j 为当前跳。如果 S 要传输数据包,那么

(1) 初始化。如果 S 是源结点,那么 $R_j_address = source_address$, $j = 0$ 。

(2) 基于 $R_j_address$ 和 $D_address$, 可以获得 LN_j 的直线方程。距离 S 的 R_{opt} 处得到圆心 O_j 位置, 以 O_j 为圆心画半径为 r 的局部圆 C_j 。将得到的 LN_j , O_j , C_j 的信息记入数据包并且发送。

(3) 所有收到包的结点执行如下过程: 如果 $d(I, O_j) \leq r$, 那么 $CS_j = I \cup CS_j$ 。其中, $d(I, O_j)$ 是结点 I 和 O_j 之间的距离, CS_j 是局部圆 C_j 里结点的集合。

(4) 在局部圆 C_j 里随机选择一个结点作为中转结点, 将其位置信息记入数据包且 $j = j + 1$ 。如果 $d_{SD} \leq R_{opt} + r$ (d_{SD} 是 S 和 BS 间的距离), 那么将包直接传给基站 BS 。

(5) 重复执行 2-4, 直到 $d_{SD} \leq R_{opt} + r$ 时, 将包直接传给基站 BS 。

3.4 r 和 ρ 的关系

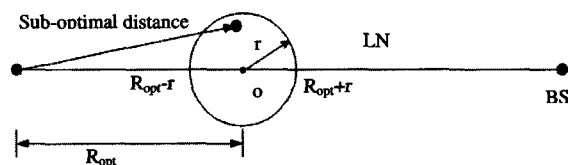


图 1 局部圆及次优距离

在这部分,给出了局部圆半径 r 和传感器结点密度 ρ 之间的关系。通过这种关系可以确保成功的路由,即保证一个局部圆中至少有一个结点可以作为中转结点。

如果每个结点都成功地将数据包发送到下一跳,那么这个圆中应至少有一个活动结点。网络的传感器密度是足够高的,这是可行的。假设结点被均匀分布在密度为 ρ 的区域,每一跳的局部圆半径都相等。如果每个结点能够作为中转结点的概率为 β , 那么可作为中转结点的密度为 $M = \beta\rho$ 。把 $n = \beta\rho\pi r^2$ 作为局部圆中能够作为中转结点的平均数目。因此, r 和 ρ 的关系为

$$\rho = n / \beta\pi r^2 \quad (8)$$

或者

$$r = \sqrt{n / \beta\pi\rho} \quad (9)$$

如果在网络中没有休眠结点,那么概率 β 的值为 1。很明显,必然有 $\lim_{r \rightarrow \infty} r = 0$, 而且每一跳的距离近似为 R_{opt} (除非消息目的地本身在传输范围之内), 这样能耗最小化。

为了确保路由的正确性, n 的值应至少为 1, 这一点在高密度网络中是可以得到满足的。 r 或者 ρ 的关系可以由公式(8) 或者(9)来确定。

4 性能评估

性能评估通过 MatLab 仿真工具完成。仿真环境模拟了一个传感器网络, 结点均匀分布在 $300\text{m} \times 300\text{m}$ 的区域, BS 位于区域中心。每个结点的初始能量为 2J, 每个传感器结点

每轮发出 2000 位的数据包,直到最后传输到基站。

图 2 显示了使用 SDMR 算法时不同的结点密度对单结点每轮耗能的影响,假设单结点坐标为(0,0)。当密度非常小时,能耗有些大。这是因为密度太小,以至于在局域圆中找不到传感器结点中转数据。然而,文中给出了密度 ρ 和局部圆半径 r 之间的关系,以确保成功的传输,因此,避免了上述情况。随着密度增加,结点能耗减少,并在最优能耗周围轻微地波动。因此对于高密度网络,SDMR 表现出良好的性能。

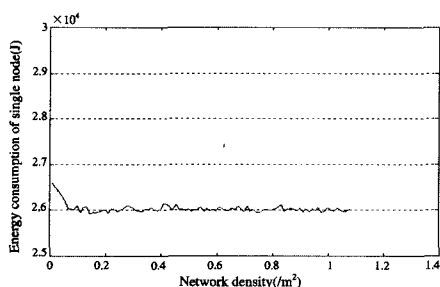


图 2 单结点耗能随不同结点密度的变化曲线

图 3 描绘了网络中每轮网络总能耗随传输距离变化的曲线。实验结果表明,当传输距离为最优传输范围 R_{opt} 时,网络总能耗最小。这里,网络中均匀分布着 10000 个传感器节点,半径 r 设为 5m。

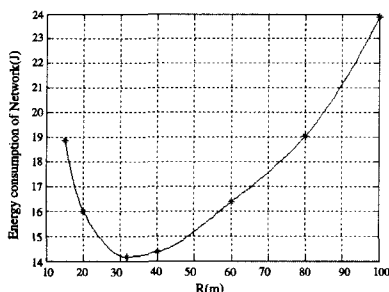


图 3 网络总耗能随不同传输距离 R 的变化曲线

在图 4 中,可以看到不同局部圆半径 r 下的网络总能耗。当传感器结点的密度足够高时,即在局部圆中必然有中转结点时,随着局部圆半径减小,总的能量消耗趋向于最优。而且,不同轮数中总的能量消耗差别很小。

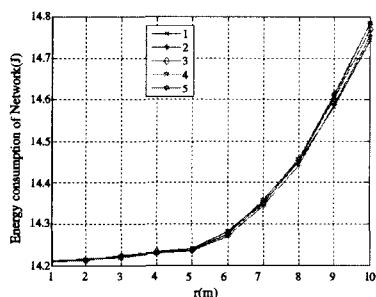


图 4 不同轮数中网络能耗随不同局部圆半径 r 的变化曲线

在实验中,也对网络单结点耗能随不同的传输距离 R 和局部圆半径 r 的变化进行了仿真,实验结果与本文中的讨论一致,在这里不详加解释。

图 5 和图 6 对比了不同算法总耗能的变化曲线。图 5 的实验结果表明,随着传感器结点数目的增加,SDMR 算法因为引入了最优传输距离,表现出最好的性能。直接传输的算

法表现最差,因为传输距离太长导致太多传输能耗。通过曲线可以明显地看出,MTE 算法和使用物理特征决定的传输范围的算法比 SDMR 算法要差,但是比直接传输要好。使用物理通信范围的算法比 MTE 能量消耗少,因为它们使用物理通信范围,当然不是最优的。图 6 的实验结果给出了几乎相同的曲线走势。只是当网络规模足够小时,直接传输算法能耗比其他算法少。原因是网络规模如此小时传输距离也变短,以至于能耗变少。

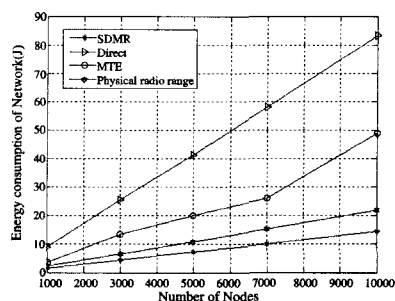


图 5 网络能耗随不同结点数目的变化曲线

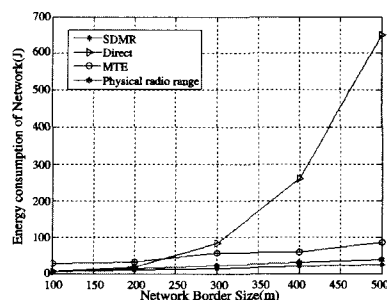


图 6 网络能耗随网络尺寸不同的变化曲线

结束语 本文首先分析最小化能耗,得到一个最优通信范围,并且描述了一个基于次优距离的多跳路由算法。仿真结果给出了很好的支持。但是,靠近基站的结点因过度耗能而过早死亡的问题仍然存在。因此,今后仍然要潜心于这个问题的进一步研究。

参考文献

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications, 2002(8):102-114
- [2] Moussaoui O, Naimi M. A Distributed Energy Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks//PE-WASUN'05: Proceedings of the Second ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks. 2005;34-40
- [3] Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3):325-349
- [4] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291
- [5] Ettus M. System Capacity, Latency, and Power Consumption in Multihop-routed SS-CDMA Wireless Networks // Proc. Radio and Wireless Conf. Aug. 1998;55-58
- [6] Mahapatra A, Anand K, Agrawal D P. QoS and Energy Aware Routing for Real-time Traffic Wireless Sensor Networks. Computer Communications, 2006, 29:437-445
- [7] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing // Proc. Seventh Ann. Int'l Conf. Mobile Computing and Networking. July 2001

(下转第 64 页)

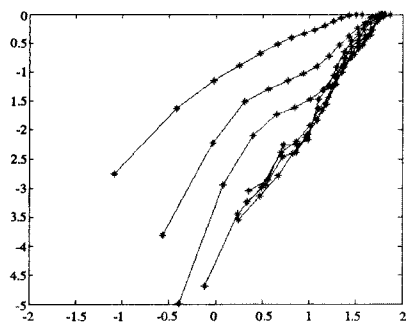


图5 关联维数计算结果

图5表明,当 $m=11,13,15,16$ 时,即图5中从左至右第3条曲线开始,各曲线直线部分平行性很好,几乎已经重叠,可以判定收敛,故判断目标系统存在吸引子,为混沌系统。测量其中直线部分斜率,得到Internet访问直径关联维数:

$$D_2(m_c=16, \tau=3)=2.2444 \quad (13)$$

3.3 模型变换

对关联维数为 D_2 的混沌系统,必须至少使用 $\lceil D_2 \rceil$ 维拟合模型,表征影响目标系统中 $\lceil D_2 \rceil$ 个重要物理过程,才能实现较准确的预测^[12]。因此据式(13),Internet网络访问直径长期预测的拟合模型至少为 $\lceil D_2 \rceil=3$ 维,其形式为

$$\begin{cases} x=f_1(x,y,z,x^{(n)},y^{(n)},z^{(n)}) \\ y=f_2(x,y,z,x^{(n)},y^{(n)},z^{(n)}) \\ z=f_3(x,y,z,x^{(n)},y^{(n)},z^{(n)}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $x \sim z$ 为表征目标系统重要物理过程的变量, $x^{(n)} \sim z^{(n)}$ 为该变量的 n 阶导数。

式(14)是表征奇异吸引子在限定时间空间内混沌轨道运动形式的数学模型形式。由于混沌轨道运动形式复杂,而Internet访问直径时间序列跨度较小(5年),因此尚不足以确定式中具体参数,这将是下一步工作。

结束语 本文首先形式化定义Internet访问直径参量,然后以CAIDA rising, k-peer和apan-jp三个结点5年(99.07~04.06)7500万条样本为基础,对Internet访问直径的短期及长期预测行为进行了初步分析。

在短期预测方面,提出了基于Logistic模型的改进模型。在长期预测方面,计算了Internet访问直径的关联维数,提出

了三维微分方程组的长期预测模型形式。但限于时间跨度小,尚不能确定参数,这是下一步要开展的工作。

参考文献

- [1] Floy S, Paxson V. Difficulties in simulating the Internet. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001, 9(4): 392-403
- [2] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [3] Aiello W, Chung F, Lu L Y. A random graph model for massive graphs // Proc. of the ACM STOC 2000. Portland: ACM Press, 2000: 171-180
- [4] 张宇, 张宏莉, 方滨兴. Internet 拓扑建模综述. 软件学报, 2004, 15(8): 1221-1226
- [5] 张家才, 周登勇. 从开放的复杂巨系统来看 Internet 中的大范围模式. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1450-1455
- [6] 尹朝庆, 尹皓. 人工智能与专家系统. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 286-295
- [7] 杨志杰, 徐中儒. 用动态逻辑斯蒂预测法研究黑龙江省乡村人口增长. 黑龙江八一农垦大学学报, 1997, 6(9): 23-28
- [8] 吴淑玲. 利用 Logistic 模型预测我国数字图书馆的发展趋势. 情报方法, 2004(4)
- [9] 汪剑鸣, 许镇琳. 浮点遗传算法中一种新的杂交算子. 控制理论与应用, 2002, 19(6)
- [10] Rudolph G. Convergence properties of canonical genetic algorithms[J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101
- [11] 张荷观. 二个新的种群增长方程. 生物数学学报, 1995, 10(4): 78-82
- [12] 黄润生. 混沌及其应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2000: 191-239
- [13] 张琪昌, 王洪礼, 竺致文. 分岔与混沌. 天津: 天津大学出版社, 2005: 256-281
- [14] Falconer K J. Fractal Geometry- Mathematical Foundations and Applications. Northeastern University Press, 1991: 41-75
- [15] 徐平. 大坝观测数据的吸引子分析. 大坝观测与土工测试, 1992(10)
- [16] 康卓, 黄竞伟, 李艳, 等. 复杂系统数据挖掘的多尺度混合算法. 软件学报, 2003, 14(7): 1229-1237
- [17] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. J. Atmos Sci, 1963, 20

(上接第44页)

- [8] Zorzi M, Rao R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Multihop Performance. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, (2): 337-348
- [9] Zorzi M, Rao R R. Energy and Latency Performance of Geographic Random Forwarding for Ad Hoc and Sensor Networks. IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC 2003), New Orleans, Louisiana, USA, Mar. 2003
- [10] Gao Q, Blow K J, Holding D J, et al. Radio Range Adjustment for Energy Efficient Wireless Sensor Networks. Ad Hoc Networks, 2006(4): 75-82
- [11] Kuruvila J, Nayak A, Stojmenovic I. Hop Count Optimal Position-based Packet Routing Algorithms for Ad hoc Wireless Networks with a Realistic Physical Layer. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(6): 1267-1275
- [12] Guo Z W, LI Z W, YU L. Lifetime prolonging algorithms for underwater sensor networks. China Ocean Engineering, 2006, 20(2): 325-334
- [13] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks // Proc. Seventh Ann. Int'l Conf. Mobile Computing and Networking. July 2001
- [14] Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, et al. Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space. IEEE Trans. Mobile Computing, 2002, 1(1): 70-80
- [15] Riedy E J, Szewczyk R. Power and Control in Networked Sensors. http://today.cs.berkeley.edu/tos/
- [16] Heinzelman W. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks (D). Ph. D. thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [17] Deng J, Han Y S, Heinzelman W B, et al. Balanced-energy Sleep Scheduling Scheme for High Density Cluster-based Sensor Networks. Computer Communications, 2005, 28: 1631-1642