

一种基于多参数模型的无线传感器网络能耗评估方法^①

房卫东^{②*} 石志东^{**} 单联海^{③***} 李凤荣^{*} 熊 勇^{*}

(* 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室 上海 200051)

(** 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 201899)

(*** 上海物联网有限公司 上海 201899)

(**** 上海无线通信研究中心 上海 200335)

摘 要 为了更好地评估无线传感器网络 (WSNs) 的能量有效性, 将传统的能耗模型和基于动态调制调节 (DMS) 的能耗模型相结合, 提出了一种新的 WSNs 能耗评估方法。该方法采用基于多参数的能耗模型和联合评估, 既考虑了传输距离对能耗的影响, 又考虑了调制级别对能耗的影响, 因而对节点能耗的计算更加精确, 且使用范围更广。仿真分析验证了该方法的有效性。该方法采用的基于多参数的能耗模型和联合评估指标, 是设计和优化 WSNs, 路由协议的关键。

关键词 无线传感器网络 (WSNs), 能量有效性, 传输距离, 调制级别, 评估指标

0 引 言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 包含了大量低功耗、可进行数据感知和处理的无线传感节点, 传感节点通过自组织多跳的方式形成网络^[1]。和传统的无线网络不同, 无线传感器网络节点分布广泛且数量庞大, 其节点能量严重受限。如何有效利用有限的能量和延长传感器节点和网络的生命周期, 是该领域中的研究人员关注的研究热点^[2,3]。本文对一些较新的和著名的无线传感器网络能量有效性评估指标和能耗模型进行了研究和分析, 在此基础上提出了考虑传输距离和调制级别对能耗的共同影响的多参数能耗模型和联合评估指标, 以便更好地进行对 WSNs 能耗的评估。

1 相关研究

在无线传感器网络系统能耗研究中, 能耗模型

和评估指标的改进也成为最为重要研究点之一。文献[4]提出了用于无线传感器网的低能量自适应分簇层次 (low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH) 协议, 根据传输距离和发射功率之间的关系建立能耗模型。文献[5]对 LEACH 协议消耗模型进行了优化, 考虑了簇成员节点和簇首节点每轮通信的能耗, 将节点密度分布和能耗模型相结合, 得出了节点密度和簇首数量对能耗的影响。文献[6]提出了一种基于动态调制调节 (dynamic modulation scaling, DMS) 的能耗方法, 根据调制级别和天线发射功率的关系, 得到了节点传输每比特数据所需的能量模型, 从而得到调制级别影响能耗和延迟的结果。文献[7]研究了动态调制调节 (DMS) 技术中调制级别的上下边界, 完善了节点能耗模型, 分析了调制级别对能耗的影响, 指出调制级别不仅会影响能耗, 还会影响信号延迟和数据丢失, 因此要根据应用需求和网络特点进行调制级别选择。文献[8]根据

① 国家自然科学基金 (61302113), 上海市自然科学基金 (13ZR1440800), 上海市青年科技英才扬帆计划 (15YF1414500), 上海市科技创新行动计划 (14511101303) 和上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题 (SKLSFO2014-03) 资助项目。

② 男, 1971 年生, 博士, 高级工程师; 研究方向: 无线传感器网络可信传输, 能耗均衡和接入控制; E-mail: weidong.fang@mail.sim.ac.cn

③ 通讯作者, E-mail: shanlianhai@mail.sim.ac.cn
(收稿日期: 2015-02-11)

干扰噪声等因素对信道的影响,考虑了发射功率、传输距离和误码率的关系,提出优化传输功率和传输距离的方案。文献[9]提出了单位传输距离能量消耗 (energy consumption per unit transmit distance, EPTD) 评估指标,考虑了传输能耗与电路能耗和传输距离的关系。文献[10]利用有限状态机 (finite state machine, FSM) 建立了用于低功耗无线传感器网络设计的收发器能耗模型。文献[11]通过研究不同节点状态和状态转换时的能耗,基于事件触发机制,提出了包括处理器、射频 (RF) 模块和传感器的传感器节点核心部分的能量模型。文献[12]模拟并分析了基于 ZigBee 的无线传感器网络的能耗,研究了传输能耗和通信半径的关系,建立了网络的能耗模型。文献[13]基于 LEACH 的能耗模型提出了最优能耗模型 (optimal energy consumption model, OEMC), 包括分簇、工作和维护三个阶段的能耗模型。文献[14]对无线传感器网络的物理层和媒体访问控制 (MAC) 层进行了能耗建模。在物理层,根据每帧数据的传输功率和时间建立能耗模型。文献[15]提出了基于期望最大化 (EM) 的参数估计算法,最后在准则函数的基础上给出了表征模型优劣的权重系数,建立了一种进行路径损耗模型筛选的量化方法。文献[16]针对无线传感器网络的 MAC 层协议,提出了一套能耗评估模型。将 MAC 层协议的能耗分为发送、接收、监听、转换和休眠 5 个部分,并利用这个模型评估了 IEEE 802. 15. 4、DMAC 和 RFID 脉冲 3 种协议。

从上面的研究可以看出,由于无线传感器网络节点部署环境多变,应用需求广泛,因此很难形成一种通用的标准能耗模型和评估指标。当前关于无线传感器网络能量有效性指标和能耗模型的研究多从影响能耗的单参数改进进行研究,如传输距离、调制级别和状态转换等,但把几个方面综合考虑进行多参数联合研究的工作还很少。本研究考虑了传输距离和调制级别对能耗的共同影响问题,提出了基于传输距离和调制级别的多参数能耗模型和联合评估指标,从而进一步优化了无线传感器网络的能量有效性。

2 系统能耗模型

无线传感器网络的节点在无线通信阶段时,可将节点能耗分为电路能耗和天线发射能耗,通信阶段能耗分为发送、接收和监听三种情况。

在传统的无线传感器网络中,当传输距离不是非常远 (根据 LEACH 能耗模型^[5],即传输距离 d 小于阈值 $d_o \approx 77\text{m}$) 时,可以看作信息是在自由空间中传输。此时,数据帧发送的能耗模型和接收的能耗模型分别为^[2]

$$E_{tx}(k, d) = e_{elec}k + k e_{fs}d^2 \tag{1}$$

$$E_{rx} = e_{elec}k \tag{2}$$

其中 k 是一个包的比特数,包括净载荷 k_d 和帧头 k_h ; d 是传输距离; e_{elec} 是电路能耗系数,取决于数字编码、调制、滤波和信号的传播; e_{fs} 是自由空间传输系数。

在使用动态调制调节技术的无线传感器网络中,把若干个比特结合为一个“符号 (S)”,将每个符号包含比特数的数量定义为调制级别 b (根据正交振幅调制技术 (quadrature amplitude modulation, QAM), 调制级别已经可以达到 10,但基于对复杂度和误码率的考虑,最常用的调制级别为 [2, 8]。设 R_s 为传输符号速率,则有

$$R_s = \frac{1}{b \cdot t_{bit}} \tag{3}$$

其中 t_{bit} 是传输一比特所需的时间。

数据帧发送的能耗分为电路能耗和天线发射能耗,其中电路能耗为

$$E_{elec} = k C_e R_s t_{bit} = k \frac{C_e}{b} \tag{4}$$

其中 C_e 是常系数,与发射机/接收机的电路结构等有关。

天线发射能耗为^[1]

$$E_{AMP} = k C_s R_s (2^b - 1) t_{bit} = k C_s \frac{(2^b - 1)}{b} \tag{5}$$

$$C_s = \frac{N_o \cdot \beta}{A} \cdot \Gamma \tag{6}$$

其中 C_s 表示传输损耗的常系数, N_o 表示噪声功率谱密度, A 表示所有传输损耗因素, Γ 表示信噪比,

β 表示全部其他损耗因素。所以,无线传感器网络的数据帧发送的能耗模型和接收的能耗模型分别为

$$E_{tx} = E_{elec} + E_{amp} = k \frac{C_E}{b} + kC_s \frac{(2^b - 1)}{b} \quad (7)$$

和

$$E_{rx} = k \frac{C_E}{b} \quad (8)$$

3 性能分析

动态调制调节(DMS)是一种提高无线传感器网络能量有效性的有效方法,在传输时间足够宽裕的情况下,可以选择合适的调制级别来达到降低能耗的目的。但是在DMS技术中,计算传输能耗时没有具体考虑传输距离的影响。而传输距离对天线功耗的影响是非常大的,功耗分别与传输距离 d 的平方和四次方成正比。因此,将传输距离的影响考虑在内是非常必要的。我们通过将传统能耗模型和DMS能耗模型这两种能耗模型相结合,提出了基于多参数的能耗模型和联合评估机制,这种方法既考虑了传输距离对能耗的影响又考虑了调制级别的影响,因而使用范围更广,且节点能耗的计算更加精确。

在无线传感器网络传输距离和调制级别对能耗的共同影响模式下,根据等式(1)和(6)得

$$E_{tx} = k \frac{C_E}{b} + kC_s \frac{(2^b - 1)}{b} = e_{elec}k + ke_{fs}d^2 \quad (9)$$

从上式中可以看出,系数 $e_{elec} = \frac{C_E}{b}$, $e_{fs}d^2 = C_s \frac{(2^b - 1)}{b}$, 即 e_{elec} 和 e_{fs} 与 b 相关, C_s 与 d 相关。

因此,将影响能耗的参数即传输距离 d 和调制级别 b 提取出来,再线性变换处理,从而将这两组能耗模型结合,得到无线传感器网络的多参数能耗模型和联合评估指标如下:

(1) 发送能耗

发送数据时包含电路能耗和天线发射能耗:

$$E_{tx} = \frac{E_{elec}k}{b} + kE_{amp} \left(\frac{2^b - 1}{b} \right) d^2 \quad (10)$$

其中, d^2 是从等式(1)中提取的参数, $\frac{1}{b}$ 和 $\left(\frac{2^b - 1}{b}\right)$ 是从等式(6)中提取的参数, E_{elec} 和 E_{amp} 是固定常数,分别与电路结构和信号传播等因素有关。

(2) 接收能耗

接收能耗即发送能耗电路部分:

$$E_{rx} = \frac{E_{elec}k}{b} \quad (11)$$

综上,节点传输一个数据帧所消耗的总能量为

$$E = E_{tx} + E_{rx} \quad (12)$$

由等式(11)可以看出,当调制级别 $b = 1$ 时,能耗模型和LEACH模型相同,因此可以根据LEACH能耗模型^[4]为常数 E_{elec} 和 E_{amp} 赋值,即 $E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$, $E_{amp} = 100\text{pJ/bit} \cdot \text{m}^2$ 。

为了评估通信协议的能量有效性,本研究提出了反映能耗效率的联合评估单位能量所能传输的数据量(bits per unit of energy, BPUE)指标:

$$BPUE = \frac{\text{传输的有效比特数量}}{\text{总能量消耗}} \quad (13)$$

当忽略信道干扰和串扰且没有恶意节点时,可以看作误码率为0,发送的数据帧能够全部接收。因此,在进行一次数据传输时,即数据帧经过发送和接收一次时,有

$$BPUE = \frac{k - k_h}{E} = \frac{k_d}{E_{tx} + E_{rx}} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,本文提出的评估指标同时考虑了传输距离、调制级别和帧头的影响。因此,用本文提出的多参数联合评估指标比较不同协议得到的结果也更加精准。

4 仿真分析

假设节点是均匀的随机分布在一片矩形区域内,且是固定的,并假设数据传输速率固定且忽略信道干扰和串扰。本节采用数值方法分析下列问题:通过使用Matlab仿真了传输距离和调制级别对信号的影响,参数设置如表1所示。(选择典型TCP包:数据帧长 $256\text{B} = 2048\text{bit}$,帧头为 $20\text{B} = 160\text{bit}$)

表 1 仿真参数设置表

参数类型	数值
传输放大器 E_{amp}	100pJ/bit · m ²
传输参数 E_{elec}	50nJ/bit
帧头大小	20B = 160bit
数据帧大小	256B = 2048bit
最大传输距离 d	70m
最大调制级别 b	8

4.1 传输距离对能耗的影响

将调制级别 b 固定,忽略监听消耗 ($T = 0$)。图 1 显示了节点间传输每比特所需的能量随着传输距离 d 的增加而增加。并且当节点间的传输距离较小时, b 越小,能耗越大;当节点间的传输距离较大时, b 越小,能耗越小。由图 2 可以看出,BPUE 随着传输距离的增加而减小,当传输距离 $d > 40$ 后,采用调制参数为 8 的节点所消耗的能量远远大于另外两个采用较低调制参数的节点能耗。

4.2 调制级别对能耗的影响

将传输距离 d 固定,忽略监听消耗 ($T = 0$)。由图 3 可以看出,节点间传输每比特所需的能量随着调制级别 b 的增加先减少后增加。这是由于电路能耗与调制级别成负相关,天线发射能耗与调制级别成正相关。当调制级别较小时电路能耗较大,而当调制级别较大时,天线发射能耗较大,只有调制级别取中间值时总能耗才最小。由图 4 可以看出,BPUE

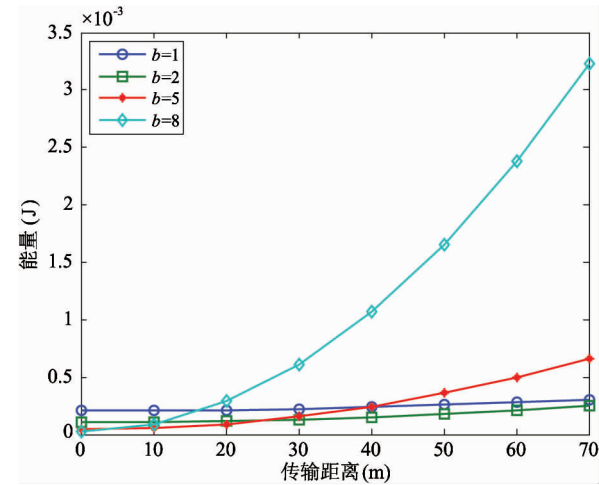


图 1 调制级别 b 分别为 1、2、5 和 8 时,传输每比特数据所需的能量与传输距离 d 的关系

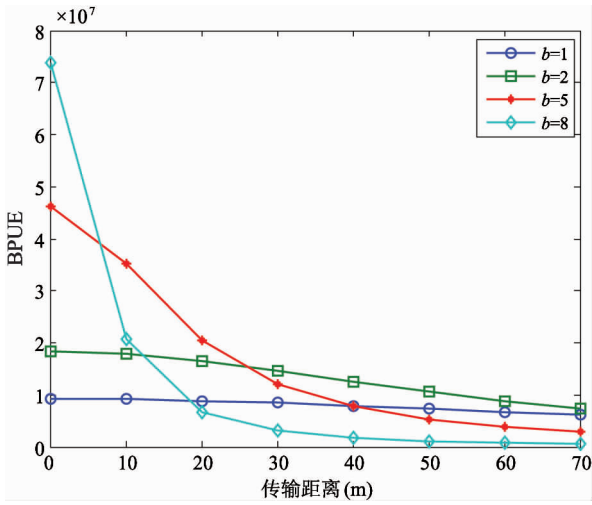


图 2 调制级别 b 分别为 1、2、5 和 8 时,BPUE 与传输距离 d 的关系

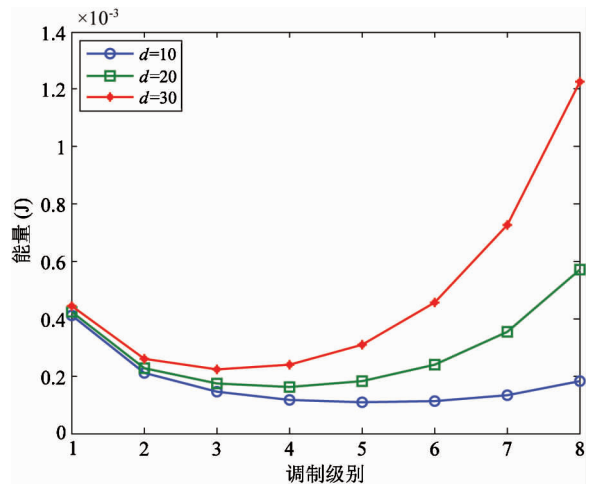


图 3 传输距离 d 分别为 10、20 和 30 时,传输每比特数据所需的能量与调制级别 b 的关系

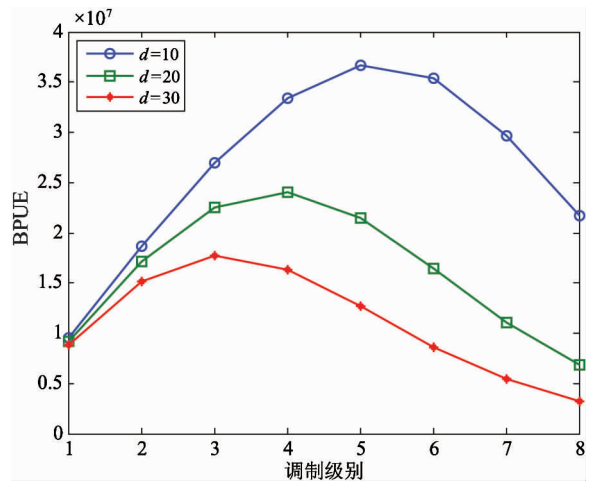


图 4 传输距离 d 分别为 10、20 和 30 时,BPUE 与调制级别 b 的关系

随着调制级别 b 的增加先增加后减少。本文定义最优调制级别为使传输每比特所需能量最小的调制级别。节点间的传输距离越小,最优调制级别越大。

通过计算不同传输距离和调制级别的能耗情

况,得到了能耗最低时,传输距离和调制级别之间的关系,表 2 为不同传输距离和调制级别下的 BPUE 指标。从表中可看出,随着距离增加,最优调制级别逐渐降低。

表 2 不同传输距离和调制级别下的 BPUE (单位: 10^6bit/J)

调制级别 \ 传输距离(m)							
	10	20	30	40	50	60	70
1	9.4	9.2	8.7	8.2	7.6	7	6.4
2	18.5	17	15	12.9	10.9	9.2	7.7
3	26.7	22.3	17.5	13.5	10.4	8.1	6.4
4	33.1	23.8	16.2	11.2	8	6	4.6
5	36.4	21.3	12.6	8	5.4	3.9	2.9
6	35.1	16.2	8.6	5.2	3.4	2.4	1.8
7	29.4	11	5.4	3.1	2	1.4	1.1
8	21.5	6.8	3.2	1.8	1.2	0.8	0.6

当传输距离 $d = 70\text{m}$,调制级别为 2 时的 BPUE 比调制级别为 8 时的 BPUE 高 8.25 倍;随着调制级别增加,传输距离对 BPUE 的影响也越明显,当调制级别为 8,传输距离 $d = 10\text{m}$ 时的 BPUE 比传输距离 $d = 70\text{m}$ 时的 BPUE 高 34.5 倍。图 5 给出了不同传输距离 d 与调制级别 b 下 BPUE 的变化趋势。

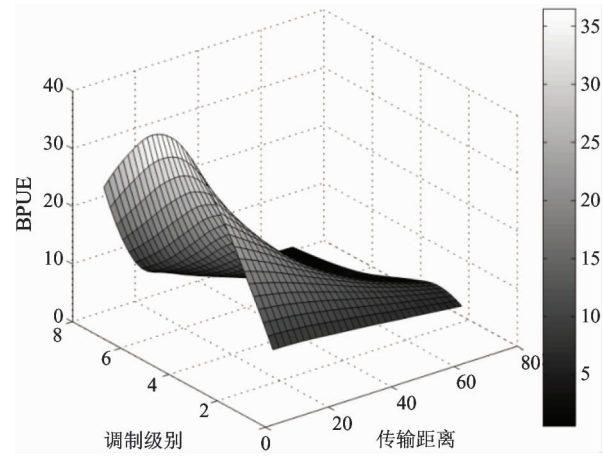


图 5 传输距离 d 、BPUE 与调制级别 b 的关系

4.3 帧头对能耗的影响

忽略监听消耗 ($T = 0$), 将调制级别固定 b 为 2 时,不同帧头 (frame head, FH) 大小下 BPUE 与传输距离 d 的关系如图 6 所示。将传输距离 d 固定为

20m 时,不同帧头大小下 BPUE 与调制级别 b 的关系如图 7 所示。由图 6 和图 7 可以看出,帧头越大, BPUE 越小,原因是帧头越大,则数据帧内的有效数据量越小。

通过上述分析可以看出,考虑了传输距离和调制级别的多参数联合指标对能量有效性的影响非常大。此外,调制级别会直接影响传输速率。调制级别越高,传输速率越大,时延越小。如果调制级别太小,会导致延时增加,可能发生缓存溢出,并且不适

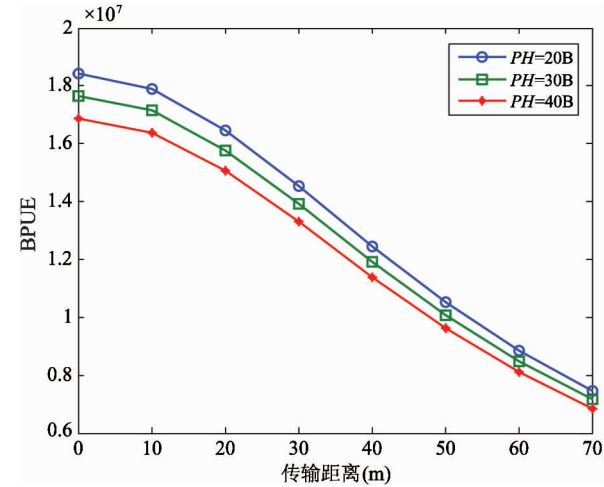


图 6 帧头分别为 20B、30B 和 40B 时,BPUE 与传输距离 d 的关系

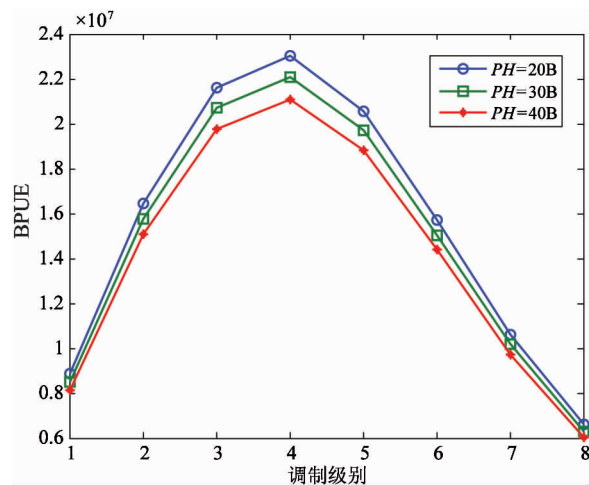


图 7 帧头分别为 20B、30B 和 40B 时, BPUE 与调制级别 b 的关系

用于有突发流量的应用。因此利用本研究的能耗模型和评估指标,结合传输距离,合理的选择数据的调制级别,从而提高 WSNs 的能量有效性,增加网络性能,延长网络寿命。

5 总结

在 WSN 能量有效性的研究中,能耗模型和评估指标是设计和优化 WSNs 路由协议的关键。目前对 WSN 能耗的评估大多数只考虑了传输距离的影响,而没有考虑调制级别。针对这种情况。本文提出了基于多参数的能耗模型和联合评估指标,以更好地对网络的能量有效性进行评估。通过使用本文提出的多参数能耗模型,对传输距离和调制级别联合评估,可以更好地对 WSN 路由协议的能量有效性进行评估,极大地提高对 WSN 能耗分析的有效性。本研究对于未来无线传感器网络能耗均衡研究具有重要的应用意义。

参考文献

[1] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227

[2] Yi X S, Jiang P J, Wang X W, et al. Survey of energy-saving protocols in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, Kaohsiung, China, 2011.

208-211

[3] Prathap U, Shenoy D P, Venugopal K R, et al. Wireless sensor networks applications and routing protocols: survey and research challenges. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Cloud and Services Computing, Mangalore, India, 2012. 49-56

[4] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670

[5] Wang H, Qiu C, Hu L, et al. An optimization model for the energy consumption of clustering protocol in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Natural Computation, Chongqing, China, 2013. 1547-1551

[6] Schurgers C, Aberthorne O, Srivastava M. Modulation scaling for energy aware communication systems. In: Proceedings of the ACM international symposium on low power electronics and design, Huntington Beach, USA, 2001. 96-99

[7] Joshi G, Jardosh S, Ranjan P. Bounds on dynamic modulation scaling for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, Allahabad, Indian, 2007. 13-16

[8] Shrotriya A, Nitawwre D. Optimizing energy consumption of wireless sensor network based on hop distance. *International Journal of Computer Science & Communication*, 2012, 3(1): 33-37

[9] Li B, Wang W, Yin Q, et al. A new cooperative transmission metric in wireless sensor networks to minimize energy consumption per unit transmit distance. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(5): 626-629

[10] Adinya O J, DaoLiang L. Transceiver energy consumption models for the design of low power wireless sensor networks. In: Proceedings of the IEEE Student Conference on Research and Development, Pulau Pinang, Malaysia, 2012. 193-197

[11] Zhou H Y, Luo D Y, Gao Y, et al. Modeling of node energy consumption for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 2011, 3(1): 18-23

[12] Fan O, DongDong X, Xingnan Z, et al. Modeling and analysis of energy consumption for ZigBee-based wireless

- sensor networks. In: Proceedings of the 31st IEEE Chinese Control Conference, Hefei, China, 2012. 6638-6643
- [13] Yang K, Wu Y M, Zhou H B. Research of optimal energy consumption model in wireless sensor network. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer Engineering and Technology, Chengdu, China, 2010. 421- 424
- [14] Darif A, Saadane R, Aboutajdine D. Energy consumption of IR-UWB based WSN in a start topology. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Marrakesh, Morocco, 2014. 663-667
- [15] 姜向远, 张焕水, 王伟. 一种基于非完全数据的路径损耗模型选择算法. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1438-1444
- [16] Ram M, Kumar S. Analytical energy consumption model for MAC protocols in wireless sensor networks. In: Proceedings of International Conference on the Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, Delhi NCR, India, 2014. 444-447

An energy consumption evaluation scheme for wireless sensor networks based on a multi-parameter model

Fang Weidong^{* **}, Shi Zhidong^{**}, Shan Lianhai^{*** ****}, Li Fengrong^{*}, Xiong Yong^{*}

(^{*} Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication,

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200051)

(^{**} Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 201899)

(^{***} Shanghai Internet of Things Co., Ltd, Shanghai 201899)

(^{****} Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200335)

Abstract

To evaluate the energy efficiency of wireless sensor networks (WSNs) more accurately, a new method for evaluation of the energy consumption of WSNs was proposed based on the combination of the conventional energy consumption model with the model using dynamic modulation scaling (DMS). The new method adopts the multi-parameter-based energy consumption model and joint evaluation metric, and concurrently considers the influence of the transmission distance on energy consumption and the influence of the modulation level on energy consumption, so the energy consumption of nodes can be calculated more accurately, and its application scope can be widened. The effectiveness of the proposed method was verified by the simulation analysis. The energy consumption model and the joint evaluation metric the proposed method uses are the key to design and optimization of WSNs routing protocols. It can better reflect the WSNs system energy efficiency.

Key words: wireless sensor networks (WSNs), energy efficiency, transmission distance, modulation level, evaluation metric