

文章编号: 1001-0920(2006)02-0180-04

一种节能的无线传感器网络报文优化算法

曾 鹏^{1,2}, 于海斌², 梁 巍²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 针对传感器数据传输过程中报文的有效数据比例较低所造成的能量浪费问题, 提出一种基于无线信道误码率的报文优化算法(BGPP). 该算法根据接收者反馈的无线信道的误码率动态调整发送报文的长度, 采用无损的数据聚集方法来提高报文中的有效数据比例. 实验结果表明, BGPP 算法可以适应无线信道状态的动态变化, 在无线信道误码率较低的情况下具有较好的节能效果.

关键词: 无线传感器网络; 无线数据传输; 报文优化; 数据聚合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Energy Efficiency Packet Optimization Algorithm for Wireless Sensor Network

ZENG Peng^{1,2}, YU Hai-bin², LIANG Wei²

(1. School of Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China. Correspondent: ZENG Peng, E-mail: zp@sia.ac.cn)

Abstract: A bit error rate guided packet length optimization algorithm (BGPP) is proposed to solve the energy waste problem caused by lower useful data rate. According to the receiver's feedback bit error rate of the wireless link, BGPP uses a lossless data aggregation method, which adjusts the packet length dynamically, to improve the useful data rate of packets. Experiments indicate that BGPP adapts the packet length to the wireless link quality dynamics and saves more energy when bit error rate of the wireless link is lower.

Key words: Wireless sensor network; Wireless data transmission; Packet optimization; Data aggregation

1 引 言

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的发展和成熟, 出现了具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器. 由这些微型传感器构成的传感器网络(WSN)引起了人们的关注. 这种规模很大且可长期在无人值守状态下工作的传感器网络系统, 在军事、环境、医疗、商务、家庭等领域具有广阔的应用前景^[1].

WSN 一般以事件驱动的方式工作. 网络中包含一个或多个监测点, 用户可通过监测点发布兴趣、查询信息、订阅特定的数据. 网络中的传感器节点作为数据源, 负责监测环境事件, 将采集的信息传递给

相应的监测点. 数据以多跳方式传输, WSN 中的每个节点都具有路由功能, 将数据向着监测点的方向转发^[1, 2].

由于长期在无人值守的状态下工作, 传感器只能依靠自身携带的有限电源供电. 如何在有严格能量限制的条件下, 延长网络的存在时间是 WSN 面临的挑战之一. 在每个传感器节点中, 无线电通信模块是最主要的耗能部件^[3]. 目前有关 WSN 的节能方法研究中, 大部分都是针对传感器节点间的无线通信而展开的^[4, 5].

收稿日期: 2004-11-24; 修回日期: 2005-09-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374072, 60434030).

作者简介: 曾鹏(1976—), 男, 沈阳人, 博士生, 从事协议工程、无线传感器网络等研究; 于海斌(1964—), 男, 黑龙江密山人, 研究员, 博士生导师, 从事智能控制系统、网络化技术等研究.

在传感器节点间的无线电通信过程中, 数据报的长度是影响数据传输质量的重要因素, 报文优化问题一直是无线通信领域研究的热点问题. Spragins 等^[6]和 Lettieri 等^[7]在传统的无线网络环境下, 提出了以提高网路吞吐率为主要目标的报文优化算法. He 等^[8]针对 WSN 数据传输过程中数据报有效数据比例较低所造成的能量浪费问题, 提出了适合在 WSN 中使用的报文优化算法——与应用无关的数据聚合算法(AIDA). 该算法提高了报文中有效数据比例, 降低了通信开销; 缺点是传感器节点必须使用基于竞争的 MAC 协议, 并且未考虑无线信道质量对报文长度的影响.

本文在 AIDA 算法的基础上, 提出一种基于反馈的报文长度优化算法. 该算法对底层的 MAC 协议没有特殊要求, 根据无线信道的质量动态调整传输报文的长度. 实验结果表明该算法具有较好的节能效果.

2 问题分析

在 WSN 中, 传感器节点采集的信号以数据报的形式传回监测点. 数据报的内容分为两部分: 报文头和数据. 报文头中是一些与通信相关的控制信息, 而真正对用户有用的是报文中的数据部分. 传感器每次采集的信息量较小, 一般只有几个字节, 因此数据报中的有效数据比例较低, 造成通信过程中的能量浪费.

在数据传输过程中, 每个传感器节点都可作为路由器转发来自多个数据源的数据. 利用 WSN 的这种工作模式, 可通过在中间节点将多个短报文聚合成一个长报文, 以提高数据报中的有效数据比例. 需要注意的是, 对于无线通信, 数据报越长, 误报率越高^[3]. 传输错误导致的数据重传同样会造成能量浪费, 因此报文优化算法需要在报文中的有效数据比例与误报率之间取得折中.

为便于分析报文长度对数据传输能耗的影响, 现作以下定义:

L : 网络负载, 即节点需要发送数据的总量, 单位为 bit;

D_1 : 优化前短格式报文中的数据长度, 单位为 bit;

D_2 : 优化后长格式报文中的数据长度, 单位为 bit;

k : 数据聚集系数, 即优化后报文中的数据长度是优化前的 k 倍, $D_2 = kD_1$;

O : 报文中报文头的长度, 单位为 bit;

BER: 无线信道的误码率.

节点传输 L bit 数据, 报文优化前, 需要发送的

报文数量为 L/D_1 . 根据信道的误码率 BER, 可推算出接收方的误报率

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^{D_1}. \quad (1)$$

节点要成功传输 L bit 数据, 需要发送的实际报文数量为

$$N_{D_1} = \frac{L}{D_1} \frac{1}{1 - \text{PER}}. \quad (2)$$

发送方的能耗为

$$E_{\text{send-}D_1} = N_{D_1}(O + D_1) E_{\text{bit}}. \quad (3)$$

其中: $O + D_1$ 表示实际传输的短格式报文的长度, E_{bit} 表示发送 1 bit 数据消耗的能量. 式(1)和(2)代入(3), 可得

$$E_{\text{send-}D_1} = \frac{L(O + D_1)}{D_1(1 - \text{BER})^{D_1}} E_{\text{bit}}. \quad (4)$$

通过式(4)可以看出, 在节点传输数据量 L 和报文头长度 O 固定的条件下, 节点的能耗与报文中的数据长度 D_1 和无线信道误码率 BER 相关. 可推算出报文长度优化后节点的能耗

$$E_{\text{send-}D_2} = \frac{L(O + D_2)}{D_2(1 - \text{BER})^{D_2}} E_{\text{bit}}. \quad (5)$$

报文长度优化以节能为目标, 必须满足 $E_{\text{send-}D_2} < E_{\text{send-}D_1}$. 根据式(4)和(5), 可得出

$$\frac{L(O + D_2)}{D_2(1 - \text{BER})^{D_2}} E_{\text{bit}} < \frac{L(O + D_1)}{D_1(1 - \text{BER})^{D_1}} E_{\text{bit}}. \quad (6)$$

对式(6)进行化简, 可得

$$(O + D_1)k(1 - \text{BER})^{(k-1)D_1} - kD_1 - O > 0. \quad (7)$$

根据式(7), 在已知 D_1 和 O 的条件下, 通过测量无线信道误码率 BER, 便可计算数据聚集系数 k 的取值范围, 从而确定新的优化报文的长度.

3 基于无线信道误码率的报文优化算法

根据以上分析, 本文提出一种基于无线信道误码率的报文优化算法(BGPP). 运行 BGPP 算法的数据发送者, 根据接收者反馈的无线信道误码率信息, 动态调整发送报文的长度, 其原理如图 1 所示.

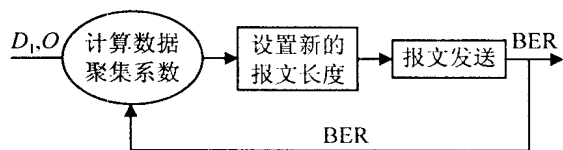


图 1 BGPP 工作原理

接收者将其统计的无线信道误码率 BER 周期性反馈给数据发送者. 数据发送者根据当前报文中的数据长度 D_1 、报文头的长度 O 以及无线信道误码率 BER, 通过式(7) 计算数据聚集系数 k , 并在下一次通信时使用新的报文长度.

对于接收者而言, BER 的统计很简单. 每个报文中都带有 CRC 校验码, 接收者可统计未通过 CRC 校验的报文在全部报文中的比例来计算误报率. 将式(1) 变形为

$$\text{BER} = 1 - (1 - \text{PER})^{1/D_1}. \quad (8)$$

通过式(8), 接收者可根据误报率来计算 BER.

对于每个数据发送者, 其数据来源于两个方面: 一是自身传感器采集的数据, 二是需要转发的相邻节点的数据. 称未经加工的数据为元数据. BGPP 算法根据式(7) 计算出新的报文长度后, 采用一种无损的数据聚集方式, 将多个元数据组成复合数据, 封装在一个报文中发送. BGPP 只关注报文长度, 而与具体应用和报文内容无关, 它只需对发往特定目标节点的数据进行聚合, 不涉及信道竞争和路由选择, 因此应位于网络层与 MAC 层之间, 如图 2 所示.

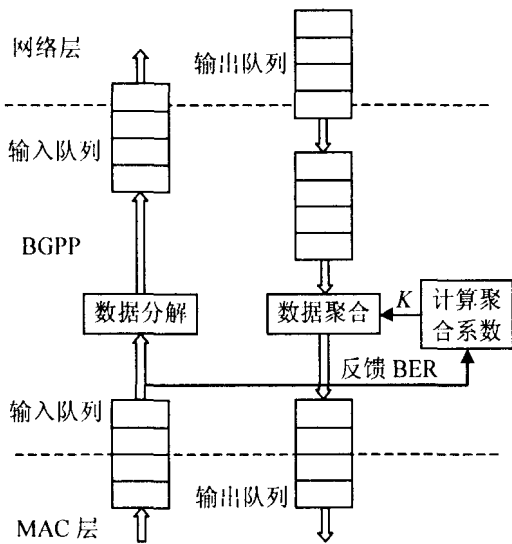


图 2 BGPP 的数据聚集机制

在图 2 中, BGPP 与 MAC 层和网络层各有两个接口队列. 当收到相邻节点发送的数据报后, MAC 层协议将数据插入接口的输入队列. 由于相邻节点也使用 BGPP, 收到的数据为复合数据. BGPP 将复合数据分解成元数据后, 插入与网络层接口的输入队列. 网络层协议将本地产生的元数据和需要转发的元数据插入接口的输出队列. BGPP 根据新的报文长度将这些元数据组合成复合数据后, 插入与 MAC 层接口的输出队列进行发送.

可计算出 BGPP 算法的节能效果

$$\text{Saving Percentage} = \frac{E_{\text{send-}D_1} - E_{\text{send-}D_2}}{E_{\text{send-}D_1}}. \quad (9)$$

式(4) 和(5) 代入(9), 可得

$$\begin{aligned} \text{Saving Percentage} = & 1 - \frac{O}{O + D_1} \frac{1}{k(1 - \text{BER})^{(k-1)D_1}} - \\ & \frac{D_1}{O + D_1} \frac{1}{(1 - \text{BER})^{(k-1)D_1}}. \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10), BGPP 算法的节能效果与无线信道的误码率 BER 密切相关, 而 BER 是由无线信道的信噪比决定的, 随着环境的变化而变化.

4 物理实验

下面通过物理实验, 进一步验证 BGPP 算法的有效性.

由 UC Berkeley 大学开发的具有计算、存储、通信和感知能力的 Mote 系列微传感器节点, 是目前 WSN 研究中普遍使用的硬件平台. UC Berkeley 大学进一步开发了低开销的 TinyOS^[9] 操作系统, 它能提供 CSMA/CA MAC 接入协议, 使用的报文格式如表 1 所示. 报文长度固定为 56 个字节, 其中包括 18 个字节的前导码、2 个字节的同步码、2 个字节的组地址、1 个字节的组地址、1 个字节的报文类型、1 个字节的报文长度、29 个字节的用户数据、2 个字节的 CRC 校验码.

本文使用 Mote 平台来验证 BGPP 算法的节能效果. 利用 Mote 的无线收发器可以使用变长报文的特点, 通过改变 TinyOS 报文格式中用户数据的长度, 生成不同长度的报文, 并在不同无线信道误码率 BER 的条件下, 验证不同报文长度对发送者能耗的影响.

无线信道误码率 BER 是由信噪比决定的. 在发送者的传输功率和环境不变的条件下, 接收者与发送者之间距离越远, 接收者收到信号的能量越低, 信噪比也越低. 为获得不同的无线信道误码率 BER, 在不借助噪音发生器的条件下, 通过改变发送者与接收者之间的距离来生成不同的 BER.

在网络中任选两个相邻节点 A 和 B, 实际测量的 BGPP 算法的节能效果如图 3 所示. 实验中通过不断调整 A 与 B 之间的距离, 可获得 4 种不同的无线信道误码率. TinyOS 的 MAC 协议使用了丢报重传机制. 按顺序对每个传输的报文进行编号, 节点 B

表 1 TinyOS 报文格式

18	2	2	1	1	1	29	2
Preamble	Sync	Dst addr	Group ID	Type	Length	User data	CRC

以响应的形式要求节点 A 重发没有成功接收的报文,直到成功接收全部报文为止.根据式(7),在 BER 大于 10^{-3} 的条件下, k 值应小于等于 1.由于不对发送者的原始报文进行拆分, k 值等于 1.在 BER 小于等于 10^{-4} 的条件下, k 值应大于等于 2.由于 Mote 平台的缓存空间有限, k 值应小于等于 4.

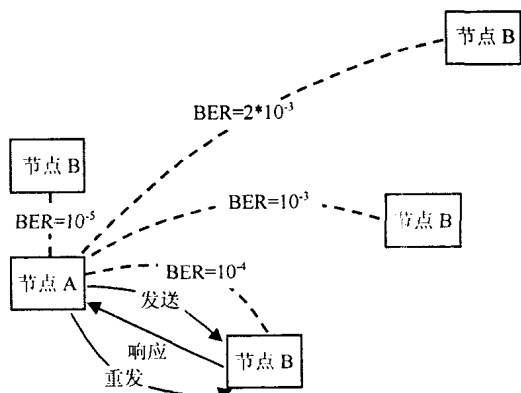
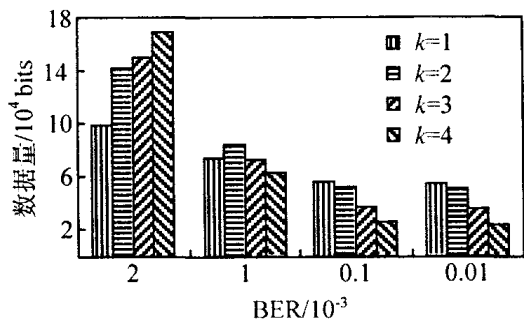


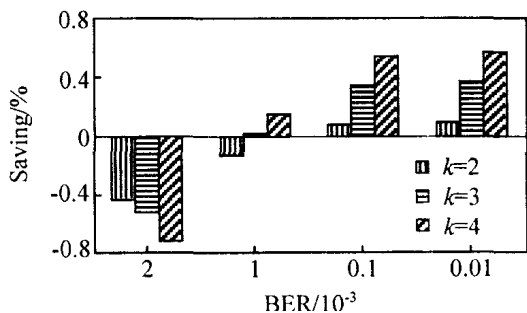
图 3 物理实验设置

图 4(a) 显示了用户发送 221 184 bit 数据(27 Kbytes, 460 bytes/s), 在不同误码率的条件下数据聚集系数 k 取不同值时,节点 A 实际发送的数据量.从图中可以看出,随着无线信道误码率 BER 的降低,采用较高的数据聚集系数 k ,节点 A 实际发送的数据量较小.

图 4(b) 显示了数据聚集系数 k 取不同值时 BGPP 算法的节能情况.从图中可以看出,随着无线



(a) 实际发送的数据量



(b) BGPP 算法的节能情况

图 4 物理实验结果

信道误码率 BER 的降低, BGPP 算法的节能程度提高.当 BER 大于 10^{-3} 时, BGPP 算法不对数据进行聚合,即恶劣的环境更适合使用短格式报文.

5 结 语

本文针对传感器数据传输过程中报文的有效数据比例较低所造成的能量浪费问题,提出一种 BGPP 算法.该算法根据接收者反馈的无线信道的误码率动态调整发送报文的长度,采用无损的数据聚集方法来提高报文中的有效数据比例.实验结果表明,在无线信道误码率较低的情况下, BGPP 算法具有较好的节能效果.

BGPP 算法的另一个优点是与传输数据的内容无关,这样可与其他一些面向应用的 WSN 信息融合机制^[10]结合使用.关于 BGPP 算法需要进一步研究的是:当用户的数据负载较低时,需要在节能与数据传输时延之间取得折中.

参考文献 (References)

- [1] 于海斌, 曾鹏, 王忠锋, 等. 分布式无线传感器网络通信协议研究[J]. 通信学报, 2004, 25(10): 102-110. (Yu H B, Zeng P, Wang Z F, et al. Research on Communication Protocols of Distributed Wireless Sensor Network[J]. *J of China Institute of Communications*, 2004, 25(10): 102-110.)
- [2] Ganesan D, Cerpa A, Wei Y, et al. Networking Issues in Wireless Sensor Networks [J]. *J of Parallel and Distributed Computing*, 2004, 64(7): 799-814.
- [3] Raghunathan V, Schurgers C, Park S, et al. Energy Aware Wireless Microsensor Networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(2): 40-50.
- [4] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [5] Stankovic J A, Abdelzaher F, Lu C Y, et al. Real-time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks [J]. *Proc of the IEEE*, 2003, 91(7): 1002-1022.
- [6] Spragins J D, Hammond J L, Pawlikowski K. *Telecommunications: Protocols and Design* [M]. Boston: Addison Wesley Publishing Company, 1991.
- [7] Lettieri P, Srivastava M B. Adaptive Frame Length Control for Improving Wireless Link Throughput, Range and Energy Efficiency [A]. *Proc of IEEE INFOCOM '98* [C]. San Francisco, 1998: 564-571.
- [8] He T, Blum B M, Stankovic J A, et al. AIDA: Adaptive Application Independent Aggregation in Sensor Networks [J]. *ACM Trans on Embedded Computing System*, 2003, 3(2): 426-457.

6 结 论

模糊 AHP 的权重向量求解是决策领域中的一个热点研究问题. 本文提出的基于遗传算法的极大化满意水平模糊 AHP 的权重向量求解方法, 为解决实际多准则决策问题提供了一条新途径. 该算法结构简洁、运算速度快、运算结果明了、便于决策者参考, 具有较大的实用价值.

参考文献(References)

- [1] Saaty T L. Decision Making with the AHP: Why is the Principal Eignvector Necessary[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 145(1): 85-91.
- [2] Loargoven Van, Pedrycz W. A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1983, 11(1): 229-241.
- [3] Sugihara Kazutomi, Hideo Tanaka. Interval Evaluation in the Analytic Hierarchy Process by Possibility Analysis[J]. *Computational Intelligence*, 2001, 17(3): 567-579.
- [4] Xu R N, Zhai X Y. Fuzzy Logarithmic Least Squares Ranking Method in Analytic Hierarchy Process[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 77: 175-190.
- [5] 樊治平, 胡国奋. 区间数多属性决策的一种目标规划方法[J]. 管理工程学报, 2000, 14(4): 50-53.
(Fan Z P, Hu G F. A Goal Programming Method for Multiple Attribute Decision Making with Intervals[J].

J of Industrial Engineering/Engineering Management, 2000, 14(4): 50-53.)

- [6] 朱建军, 刘士新, 王梦光. 基于遗传算法求解区间数 AHP 判断矩阵的权重[J]. 系统工程学报, 2004, 19(4): 344-393.
(Zhu J J, Liu S X, Wang M G. Estimation of Weight Vectors of Interval Numbers Judgement Matrix in AHP Using Genetic Algorithm[J]. *J of Systems Engineering*, 2004, 19(4): 344-393.)
- [7] 沈源, 陈幼平, 丘智明, 等. 一种基于满意度的模糊层次分析评估方法[J]. 中国机械工程, 1999, 10(7): 769-772.
(Shen Y, Chen Y P, Qiu Z M, et al. A Evaluation Method of Satisfactory-degree-based Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. *China Mechanical Engineering*, 1999, 10(7): 769-772.)
- [8] 谭跃进, 陈英武, 易进先. 系统工程原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
(Tan Y J, Chen Y W, Yi J X. *Theory of System Engineering* [M]. Changsha: University Press of the National Defence Science and Technology, 2001.)
- [9] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 汪定伟, 等译. 北京: 科学出版社, 2000.
(Xuan G G, Cheng R W. *Genetic Algorithm and Its Design of Engineering*[M]. Translated by Wang D W, et al. Beijing: Science Press, 2000.)

(上接第 179 页)

- [11] Enrique Alba, Jos M Troya. Analyzing Synchronous and Asynchronous Parallel Distributed Genetic Algorithms [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2001, 17(4): 451-465.
- [12] 王大明, 毛宗源. 并行遗传算法综述[J]. 暨南大学学报, 1998, 19(1): 20-25.
(Wang D M, Mao Z Y. Survey for Parallel Genetic Algorithm[J]. *J of Jínan University*, 1998, 19(1): 20-25.)

- [13] Ioan Cristian Trelea. The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection[J]. *Information Processing Letters*, 2003, 85(6): 317-325.
- [14] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 66-68.
(Pan Z J, Kang L S, Chen Y P. *Evolutionary Computation* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 66-68.)

(上接第 183 页)

- [9] Hill J. *A Software Architecture Supporting Networked Sensors* [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2000.
- [10] Boulis A, Ganeriwal S, Srivastava M B. Aggregation in Sensor Networks: An Energy-accuracy Trade-off

Sensor Network Protocols and Applications [A]. *Proc of the First IEEE Int Workshop on Sensor Network Protocols and Applications* [C]. Anchorage, 2003: 128-138.