

多场景分区间前端均衡比较 WSN 接收器唤醒策略

胡平芳, 黄苏雨

(武汉大学 计算机学院, 湖北 武汉 430212)

摘 要: 为降低无线传感器网络空闲信道监听能耗, 并满足特定延迟需求, 提出一种多场景分区间前端均衡比较 WSN 接收器唤醒策略. 首先, 构建单位能源消费量和模拟前端灵敏度关系图, 获得四个特征区间, 并进行特性分析, 然后将所有场景参数简化为单一场景常数, 进行网络唤醒接收器的平衡线计算; 其次, 沿着获取的平衡线, 从不同场景区间能源消费量和模拟前端灵敏度关系图左下角向右上角搜索, 并选取最佳模拟前端操作点, 即为最佳唤醒接收器; 最后, 通过在仿真实例对比实验, 验证了所提方法在能耗节约和延迟保证上的优势.

关键词: 多场景; 前端均衡; 无线传感器网络; 接收器; 唤醒

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)11-0037-06

The Front End Equalization in Multi Scene Partitions for the WSN Receiver Wakes up Strategy

HU Ping-fang, HUANG Su-yu

(Department of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430212, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of wireless sensor networks, and to meet the specific needs of delay, the front end equalization in multi scene partitions for the WSN receiver wakes up strategy is proposed. Firstly, we constructed the diagram of unit energy consumption and analog front-end sensitivity, got the four characteristic interval, and analysis the characteristic, then all the scene parameters is simplified as a single scene of constant to calculate the balance line for network wake receiver; Secondly, along the balance line, we took the search from the the lower left corner to the upper right corner of the relationship map between energy consumption and analog front end sensitivity in different scene area, and selected the best analog front end operating point, that is, the best to wake up the receiver; Finally, the advantages of the proposed method in energy saving and delay guaranteed are verified by comparing experiments in the simulation examples.

Key words: multi scene; front end equalization; wireless sensor networks; receiver; wake up

1 引言

唤醒接收器(Wake-up receiver, WRX)目的是降低无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)空闲信道监听能耗, 这对于资源有限的 WSN 网络非常重要^[1-2]. 利用超低功耗传感器进行无线信道监听时, 关闭高功率主接收机. 只有检测到唤醒信标(Wake-up beacon, WB)时, WRX 才开启主接收器. 信道 WRX 监控有两种方法^[3-4]: (1)保持在线,

这种方法具有较低响应延迟, 但整体系统功耗非常高. (2)占空比法, 因为 WRXs 大部分时间保持休眠状态, 因此其具有较高能耗节约率, 缺点是较高的响应延迟. 通过引入平均延迟需求指标, 可获得满足程序灵敏度需求的休眠时间间隔优化.

为节省能源, WRX 需在有限功耗下操作, 通常比主接收机小两个数量级. WB 传输常用方法可实现低功耗低复杂度模拟前端(Analog front-end, AFE)设计. 在传统操作点中, 通常利用敏感度和功

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-04-11

基金项目: 2015 年校级青年基金—无线传感器网络移动节点定位算法的研究

耗指标进行评价. 操作点^[5]中, 提出基于敏感度、功耗指标和数据速率的评价方法. 虽然这些指标对 AFE 设计很重要, 但不足以反映 WRX-AFEs 对网络唤醒能耗影响. 与主接收器相比, 极端低功耗 AFE 设计通常会导致较高噪声系数和敏感性降低, 需较高 WB 传输能耗对其进行功率补偿, 导致能耗增加量远大于采用低功耗 WRX 的能源节省量. 因此, 需综合分析传输能耗和接收能耗^[6].

在本文算法中, 充分考虑信道监听能耗和 WB 数据传输能耗, 进行 WRX-AFEs 设计, 采用评价指标有网路大小、覆盖率要求和平均唤醒延迟等, 该算法可作为多目标无线传感器唤醒节点集后续操作点选取算法, 可实现相对最佳操作点的选取.

2 唤醒机制能量分析

在传感器电池电量有限情况下, 可根据电池剩余使用寿命对 WRX 排序. 当在同一信道工作时, WB 数据长度(bits)应一致以确保获得相同 WB 检测性能. 可根据能量需求在 WB 中采取 1bit 数据激活, 从而实现计算的简化. 同时假设在休眠模式下节点功耗与其他模式相比微不足道^[7].

每个数据包总唤醒能量可利用平均分组到达间隔期间, 所有 N 个节点中, 源节点和信道监听占空比的 WB 传输周期进行计算. 单位 WB 接收能耗计算如下^[8]:

$$E_{\text{tot}} = WP^{\text{tx}}T_b + KNP^{\text{wrx}}T_b \quad (1)$$

式中, W 是 WB 传输唤醒所需的平均数, P^{tx} 是发射机功耗, T_b 是位时间, K 为每平均数据包到达间隔的 WRX 占空比平均值, P^{wrx} 是 WRX 的功率消耗. 可以利用一半数量的长度为 $(1/\lambda)/K$ 的 WRX 占空比进行 W 参数计算, 由于节点是异步传输的, 因此没有数据包到达的时间更普遍. 利用 WB 的 Z_{wb} 位长度, 则可的参数 W :

$$W = \frac{1/\lambda}{2KZ_{\text{wb}}T_b} \quad (2)$$

根据式(2)可知, W 和 K 是呈反比的. WRX 的占空比越频繁, 在进行数据传输前需要唤醒的 WB 数量越少. 通过调节参数 K 可实现平均唤醒延迟的调整, 对于设定的平均唤醒延迟为:

$$K = \frac{1/\lambda}{2D^{\text{req}}} \quad (3)$$

对于公式(1)中的功耗参数 P^{tx} , 可采用 WRX-AFEs 灵敏度 P_s^{wrx} 、最大期望传播损失 $L_{p,\text{max}}$ 和发射效率系数 η 进行计算:

$$P^{\text{tx}} = \frac{P_s^{\text{wrx}}L_{p,\text{max}}}{\eta} \quad (4)$$

式中, η 是实际发射功率和发射机功率消耗的比值. 定义 WRX 每比特的能耗为:

$$E^{\text{wrx}} = P^{\text{wrx}}T_b \quad (5)$$

则式(2~5)带入公式(1), 可得其计算形式为:

$$E_{\text{tot}} = \frac{D^{\text{req}}L_{p,\text{max}}P_s^{\text{wrx}}}{\eta Z_{\text{wb}}} + N \frac{1/\lambda}{2D^{\text{req}}} E^{\text{wrx}} \quad (6)$$

上式表明唤醒能耗还取决于 AFE 灵敏度和每比特能耗参数以外参数: 延迟需求, 最大传播损耗, 发射效率, WB 长度、网络规模和流量等. 公式(6)重要特征是不依赖于数据速率和带宽, 使其在相同场景下可根据不同的设计规范进行部署.

3 基于前端比较的接收器唤醒策略

3.1 分析场景设置

将利用公式(6)所示方法进行 WRX-AFEs 能耗评价. 首先来研究两个示例场景下公式(6)行为. 模拟前端跨越不同的频段是不好的, 因为不同频段下的传播损失存在差异. 对此, 将设计同一频段 AFE 策略. 示例场景如下:

场景 1: 2.4 GHz 无线本体区域网络, 对应于最坏路径损耗为 88 dB 的通信情况. 假定网络规模大小为 $N=64$, 数据包到达间隔为 $1/\lambda=1\,000\text{ s}$, 延迟需求均值为 $D^{\text{req}}=10\text{ ms}$.

场景 2: 900 MHz 的短距离无线通信应用, 对应于最坏路径损耗为 55 dB 的通信情况. 假定网络规模大小为 $N=512$, 数据包到达间隔为 $1/\lambda=100\,000\text{ s}$, 延迟需求均值为 $D^{\text{req}}=0.25\text{ s}$.

设定 WB 数据长度 Z_{wb} 在场景 1 和场景 2 情况下分别为 21 和 25 bits. 两种场景下假定发射机效率 $\eta=50\%$. 将上述设定值代入公式(6), 可计算每 WB 位长的能源消费总量. 结果如图 1 所示.

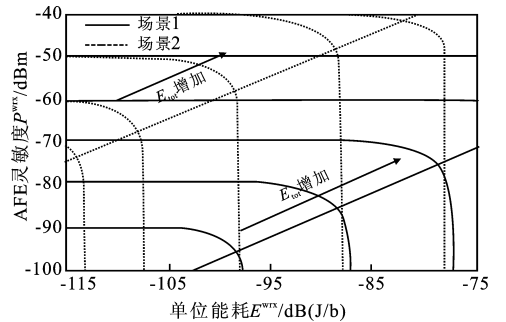


图 1 能源消费总量/唤醒水平曲线

图 1 中, 纵坐标为 AFE 灵敏度 $P_s^{\text{wrx}}/\text{dBm}$, 横坐标

标为单位能源消耗量 $E^{\text{wrx}}/\text{dB(J/b)}$. 对应于 P_s^{wrx} 或 E^{wrx} 几乎呈现直线形状表明其能消耗取决于 WB 数据传输或 AFE 信道监听. 为获得 P_s^{wrx} 和 E^{wrx} 上两种能耗均衡,通过以下等式进行平衡线计算:

$$P_s^{\text{wrx}} = E^{\text{wrx}} + \Gamma[\text{dB}]$$

(7)

所有场景参数被简化为单一场景常数 Γ :

$$\Gamma = N + \eta + Z_{\text{wb}} + (1/\lambda) - 2D^{\text{req}} - 3 - L_{p,\text{max}}[\text{dB}]$$

(8)

利用式(7~8)指定值替换场景参数,计算两个场景平衡线,如图1中对角线. 结合对应平衡线,研究 E_{tot} 等级曲线,可得到能耗基本特征:(1)所有的水平曲线都有相同的形状,对称于平衡线周围,并随着能量水平的变化而移动.(2)总体能耗随着 P_s^{wrx} 和 E^{wrx} 的增加而增大.(3)场景参数的变化将导致 Γ 的变化,并相应地改变平衡线和水平曲线.

这些特征可以作为评价指标,用于比较不同 WRX-AFES 设计优点,而无需进行完整能量计算.

3.2 特定场景下的最佳性能

图2为选取参考操作点示意图,表1为其 AFEs 数据. 利用前端每点能耗替换式(6)中 E^{wrx} ,假设 WRX 数字基带能耗相对于 AFE 可忽略不计. 本文目的是在解决方案中,查找 WRX-AFES 可获得最好唤醒能量性能. 用图形化方式,分两个步骤计算:

步骤1:利用式(8)计算场景参数 Γ ,在给定的参数和场景绘制相应的平衡线;

步骤2:沿着平衡线从左下角开始,直到遇到第一个 AFE,该 AFE 可为特定的场景唤醒提供最低能耗.

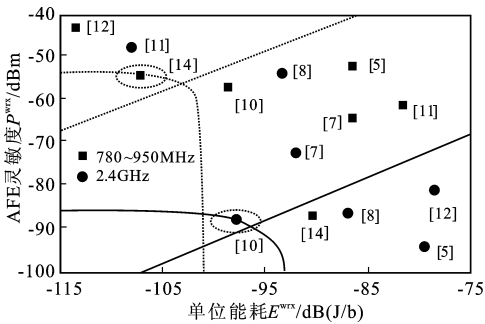


图2 最佳 WRX 选取示例

在上述两个示例场景下,举例说明如何在传感器中选择最佳 WRX-AFES,图2对应数据见表1. 首先,在图2中添加每个场景平衡线(实线和虚线).

表1 唤醒接收器场景设计

参考操作点	灵敏度 /dBm	功耗 / μ W	数据速率 /kbps	E^{wrx} /dB(J/b)
操作点[15]	-87	45.5	50	-55.4
操作点[7]	-50	65	40	-67.9
操作点[8]	-72	52	100	-32.7
操作点[10]	-56	7.4	100	-10.3
操作点[11]	-53	19	50	-42.8
操作点[12]	-65	10	100	-30.1
操作点[14]	-45	0.161	12.5	-15.3

对于场景1,从左下搜索 2.4 GHz 点(红点) WRX-AFES 操作(最近 2.4 GHz 点),可得操作点[10];而场景2,从左下搜索在 780~950 MHz 点(蓝点)WRX-AFES 操作(最近 780~950 MHz 点),可得操作点[14]. 图2中最低能耗操作线来自操作点[15].

3.3 最佳前端选取方案

图1~图2中最佳能耗操作线形状平滑,原因是其未考虑传感器具体位置等信息,导致操作线上可能不存在可唤醒节点,导致唤醒失败,或平移操作线进行唤醒时,选取的一组节点并非最佳.

对此,为简化最佳前端选择,通过变化 Γ 的范围 $(-\infty, \infty)$ 进行最佳 WRX-AFES 选择. 这里选取两种情形说明:(1)普通的单 AFE 操作点选取,如图3所示.(2)多 AFE 操作点选取,如图4所示.

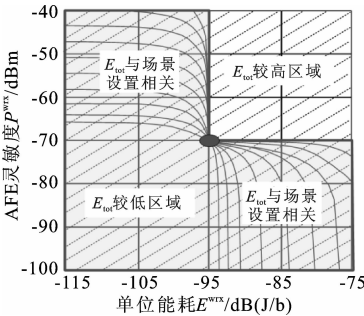


图3 单 AFE 操作点选取

在图3单 AFE 操作点选取中,一个操作点可对应于所有场景的最佳能耗. 插图的主要点位于水平曲线的集合(灰色)通过参考 AFE 的位置构建四个区域. 因为随着 P_s^{wrx} 和 E^{wrx} 的增加, E_{tot} 会相应增大,因此任何设计在左下象限的 AFE 相比于参考 AFE 都具有更低的 E_{tot} ,而设计在右上象限的 AFE 相比于参考 AFE 都具有更高的 E_{tot} ,另外两个象限中的 AFE 表现取决于场景不同设置.

在图4多 AFE 操作点选取中,在图4所示的最佳 AFE 操作点中, A 点对应于 $\Gamma > \Gamma_{A,B}$, B 点对应于

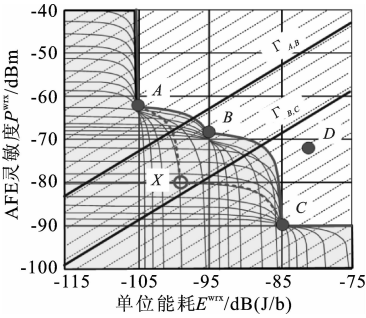


图 4 多 AFE 操作点选取

$\Gamma_{A,B} > \Gamma > \Gamma_{B,C}$, C 点对应于 $\Gamma < \Gamma_{B,C}$, 即 A 和 B 点分别对应于 $\Gamma > \Gamma_{A,B}$, $\Gamma_{A,B} > \Gamma > \Gamma_{B,C}$ 和 $\Gamma < \Gamma_{B,C}$ 三种场景区间的最佳 AFE 操作点. 在场景边界 $\Gamma = \Gamma_{A,B}$ 和 $\Gamma = \Gamma_{B,C}$, 对于第一个场景边界, A 和 B 点具有相同的能耗表现, 而第二个场景边界, C 和 B 点具有相同的能耗表现, D 点对于所有场景均不是最佳的.

在灰色区域中选取新 AFE 点 X , 如果点 X 操作性能优于 B 点, 则将其添加到最佳 AFE 集内, 并替代操作点 B , 这改变了 A 、 X 和 C 三个 AFE 点相应场景常数. 利用 AFEs 灵敏度和能耗可计算场景边界的 Γ s. 对于图 4 所示选取方式, 令 $P_{s,A}^{wtx}$ 、 $P_{s,B}^{wtx}$ 、 E_A^{wtx} 和 E_B^{wtx} 分别表示 A 和 B 点的单位灵敏度和能耗 (/bit), 结合式(6)可识别出场景边界常数:

$$\Gamma_{A,B} = -\frac{P_{s,A}^{wtx} - P_{s,B}^{wtx}}{E_A^{wtx} - E_B^{wtx}} \quad (9)$$

式(9)定义了 A 和 B 具有相同唤醒能量预测值的场景常数, 该常数为正实数. 表明如果灵敏度和能耗大小关系存在不同, 则两个 AFEs 不可能具有相同表现, 这对应于图 4 左下和右上象限特征表现.

将上述机制分别应用于表 1 所示两种场景: 2.4 GHz 点和 780~950 MHz 点. 选取结果见图 5.

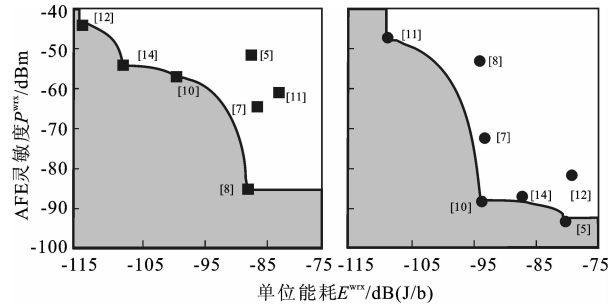


图 5 最佳执行模拟前端

如图 5 所示, 在这两个子图中, 实线上设计的所有 WRX-AFEs 均属于最佳 AFE 集. 其中, 白色区域对于两种场景均不是最佳的 AFE 设计. 下面对最

佳 AFE 操作点进行选取, 对于图 4 中的 AFE 点 B , 其范围位于 $\Gamma_{A,B}$ 和 $\Gamma_{B,C}$ 之间. 对于多场景情形, 该区间值越大, 表明其性能越好. 利用公式(9)可计算在两组场景下表现最好的 AFE 边界情况常数, 见图 5. 所获得的区间计算值见表 2~3 所示.

表 2 780~950 MHz 场景常数区间

参考操作点	场景参数范围
操作点[12]	最小 E^{wtx}
操作点[14]	33.5
操作点[10]	23.4
操作点[8]	最小 P_s^{wtx}

图 3 2.4 GHz 场景常数区间

参考操作点	场景参数范围
操作点[11]	最小 E^{wtx}
操作点[10]	4.3
操作点[5]	最小 P_s^{wtx}

对于常数极大或极小场景情况, 上述计算结果最佳. 对应于 780~950 MHz 场景, 操作点[27]最佳, 而对应于 2.4 GHz 场景, 操作点[20]最佳.

3.4 算法计算步骤

上述所提基于比较前端占优的唤醒节点选取机制的算法步骤见伪代码所示.

伪代码: 比较前端占优唤醒机制

输入: 最差路径损耗 $L_{p,max}$, 网络规模大小 N , 数据包到达间隔 $(1/\lambda)$, 延迟需求均值 D^{req} , WB 传输唤醒数量 W , 发射效率系数 η , WB 数据长度 Z_{wb} .

输出: 最佳唤醒传感器模拟前端

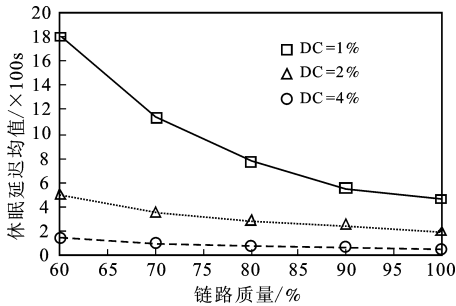
- for $i = 1; N$ do
- $W = (1/\lambda) / 2KZ_{wb}T_b$ (式 2)
- $K = (1/\lambda) / 2D^{req}$ (式 3)
- $P_s^{ex} = P_s^{wtx}L_{p,max} / \eta$ (式 4)
- $E^{wtx} = P^{wtx}T_b$ (式 5)
- $E_{tot} = \frac{D^{req}L_{p,max}}{\eta Z_{wb}}P_s^{wtx} + N \frac{1/\lambda}{2D^{req}}E^{wtx}$ (式 6)
- endfor
- 利用获得参数值得到图 1 能源消费总量 / 唤醒水平曲线
- $\Gamma = N + \eta + Z_{wb} + (1/\lambda) - 2D^{req} - 3 - L_{p,max}$ [dB] (式 8)
- $P_s^{wtx} = E^{wtx} + \Gamma$ [dB] (式 7, 平衡线计算)
- 进行平衡线绘制, 沿平衡线从左下角开始向右上角搜索
- 收集找到的所有平衡线上的首个 AFE 操作点
- 分别针对不同的边界区间进行最佳 AFE 操作点选取
- 唤醒所有最佳 AFE 操作点, 得到最佳模拟前端

上述算法中, 共涉及到网络规模为 N , 通过伪代码步骤可知, 在上述算法过程中, 仅含有单循环执行结构, 因此, 其计算复杂度为 $O(N)$.

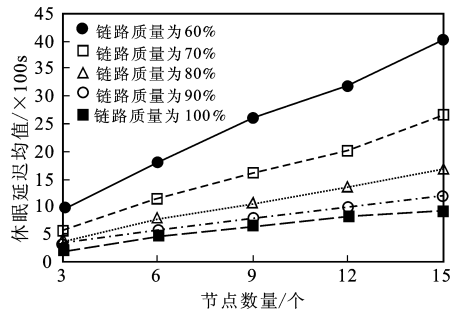
4 实验分析

4.1 评价方法

对于本文算法进行性能测试,选取如下两组评价指标^[8]:①在符合给定操作延迟条件下,所需节点唤醒次数的时隙最小增加值;②网络寿命,能量耗尽的节点比例超过 30%,此时会导致网络性能大幅降低. 本实验将对链路质量和节点数量对网络休眠延迟指标进行验证,如图 6 所示. 该指标可作为评价网络服务质量的标准.



(a) 链路质量



(b) 节点数量

图 6 休眠延迟指标

根据图 6(a), 占空比提高会使节点休眠延迟均值降低, 原因在于随占空比增加, 数据传输间隔降低, 因此传输失败所需重传时间降低, 节点休眠延迟均值相应降低. 同时随节点数据传输成功比例增加, 节点休眠延迟均值也相应降低. 如占空比是 1% 时, 90% 链路质量下的休眠延迟均值约为 463 s, 而 50% 链路质量下的休眠延迟均值约为 1 821. 3s, 延迟大幅增加 3. 9 倍. 根据图 6(b) 可知, 随节点数增加, 休眠延迟均值也增大, 原因在于节点数量增加, 会提高算法执行难度, 并增加信息传输时间延迟.

4.2 算法性能测试

在算法设计过程中, 考虑延迟要求, 对延迟要求设定的算法影响进行测试. 实验参数设定见表 4.

表 4 仿真平台默认参数信息

参数设定/单位	值
节点通信半径/m	11
节点数量/个	100
占空比	1%
通信间隔时间/s	1
节点工作周期/s	90
链路质量	60%~90%
重传数量最大值/次	9
数据发送能耗/(J/bits)	0.95
数据接受能耗/(J/bits)	0.75
空闲状态能耗/(J/bits)	0.70
节点能量初值/(J/个)	10 000~40 000
消息生成间隔均值/s	1 100

为真实测试算法性能, 在 0~1 区间内生成随机数, 若其高于链路质量指标, 则表明此次数据传输成功. 对唤醒时隙增加次数实验 50 次, 见图 7.

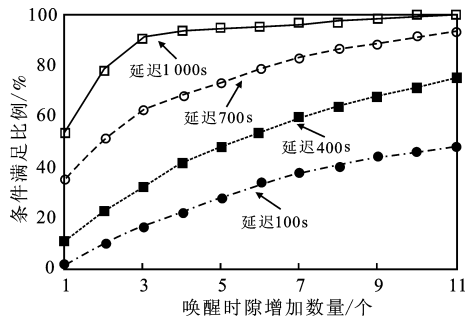


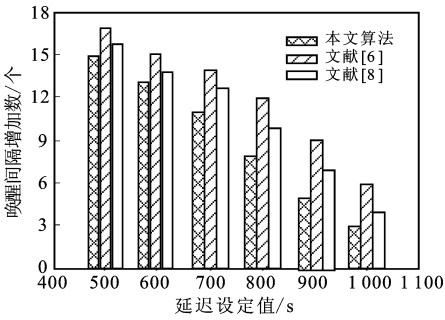
图 7 不同延迟下条件满足比例

根据图 7, 随传感器节点唤醒时隙数增大, 条件满足比例也随之增大, 表明所获休眠延迟不高于延迟要求数量逐渐增大. 比如, 延迟设定是 1 000 s 时, 唤醒时隙增加 1 次的条件满足比例是 53. 19%, 而唤醒时隙增加 1 次的条件满足比例是 90. 18%.

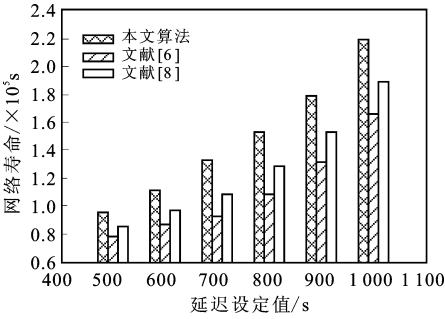
4.3 延迟设定实验

考虑延迟设定问题, 延迟与网络唤醒时隙有关, 同时会对网络寿命产生影响. 对比算法选取文献[6]和文献[8]两种算法, 仿真结果见图 8.

根据图 8(a), 随延迟设定增大, 需降低网络唤醒次数, 因此高信息处理质量与能耗增加相对应. 但相对来说, 本文算法相比文献[6]和文献[8]两种算法所需的唤醒时隙数增加值要小. 比如, 对于延迟为 1 000 s 时, 本文算法需增加 3 次唤醒时隙, 而文献[6]和文献[8]分别需要增加 5 次和 6 次唤醒时隙, 本文算法较文献[6]和文献[8]分别降低 41% 和 38% 根据图 8(b) 可以知, 随延迟设定值降低, 三



(a) 延迟与唤醒时隙



(b) 延迟与网络寿命

图 8 延迟设定影响

种对比算法均可增加网络寿命。在延迟设定值从 600~1 000 s 变化时,本文算法比文献[6]和文献[8]算法分别延长 46%和 34%的使用寿命。

5 结束语

本文提出一种多场景分区间前端均衡比较 WSN 接收器唤醒策略,将所有场景参数简化为单一场景常数,进行网络唤醒接收器的平衡线计算,沿着获取的平衡线,选取最佳模拟前端操作点,即为最佳待唤醒接收器。通过在仿真实例对比实验,验证了所提方法在能耗节约和延迟保证上的优势。上述算法是建立在给定操作点集情况下,进行最佳操作策略选取基础上,例如前述采用多目标优化算法进行操作点集的自动选取,但是会相应增加算法的计算复杂度和实现难度,如何进行有效解决将是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] Liu Xuewen, Xiao Song, Quan Lei. Optical SDMA for applying compressive sensing in WSN[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(4): 780-789.

[2] 朱艺华,徐骥,田贤忠,等. 无线传感器网络应用简单 Reed-Solomon 编码的低能耗和低时延可靠数据收集方案[J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 2106-2124.

[3] Ahmad El Assaf, Slim Zaidi, Sofiene Affes, et al. Robust ANNs-based WSN localization in the presence of anisotropic signal attenuation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 504-507.

[4] 陈良银,王金磊,张靖宇,等. 低占空比 WSN 中一种节点休眠调度算法[J]. 软件学报, 2014, 25(3): 631-641.

[5] Padmalaya Nayak, Anurag Devulapalli. A fuzzy logic-based clustering algorithm for wsn to extend the network lifetime[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(1): 137-144.

[6] 赵继军,谷志群,薛亮,等. WSN 中层次型拓扑控制与网络资源配置联合设计方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 646-660.

[7] Yang Hai, Li Wei, Luo Chengming. Fuzzy adaptive kalman filter for indoor mobile target positioning with INS/WSN integrated method[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(4): 1324-1333.

[8] Hong Chao, Xiong Zhongyang, Zhang Yufang. A hybrid beaconless geographic routing for different packets in WSN [J]. Wireless Networks, 2016, 22(4): 1107-1120.

作者简介:

胡平芳 女,(1982-),硕士,讲师.研究方向为系统分析与集成、人工智能. E-mail:hupingfag@21cn.com.

黄苏雨 女,(1976-),硕士,副教授.研究方向为数据挖掘、人工智能.