

面向混合业务的无线传感器网络能量有效接入策略

王亚松¹, 张钦宇², 李云鹤², 韩晶¹

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:研究了在实时业务和非实时业务同时存在的混合背景下,非实时业务的无线传感器节点自适应侦听和睡眠的动态接入机制。网络节点处于睡眠状态时所需的能量很低,节约了无线传感器网络节点的平均能量消耗;但是,过长的睡眠时间可能使得网络节点错失传输机会。因此,根据信道的使用情况,合理地设定无线传感器网络节点的睡眠时间,能够在网络能量消耗和传输效率之间进行调整,从而最大化无线传感器网络的能量传输效率。首先,利用连续时间 Markov 方法对问题进行建模,并利用基于摄动分析理论对系统模型进行分析,获得求解无线传感器网络能量效率最大化的最优睡眠时间梯度算法。最后通过理论结果和计算机仿真模拟的对比,验证了推荐方法的可行性。

关键词:无线传感器网络;能量效率;混合业务;传输效率;最佳睡眠时间

中文分类号:TN915

文献标识码:A

文章编号:1000-436X(2013)09-0041-12

Energy efficiency access strategy: towards hybrid wireless sensor network

WANG Ya-song¹, ZHANG Qin-yu², LI Yun-he², HAN Jing¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A dynamically access mechanism of non-real-time sensor nodes with adaptive listening and sleeping, against the background, co-existence of real-time traffic and non-real-time traffic in the networks, was studied. The energy consumption is very slow while the node is in a sleep state; however, the long sleep time may make the network nodes miss transmission opportunity. Thus, according to the usage of the channel, a reasonable set of wireless sensor network nodes sleep time in the network energy consumption and transmission efficiency could be adjusted to maximize the energy transmission efficiency of wireless sensor network. Firstly, the continuous-time Markov modeling the problem was used and analyzed. Then system model based on perturbation analysis theory was proposed to obtain the gradient algorithm for solving the optimal sleep time. Finally, the feasibility of the recommended program is verified by comparing the theoretical results and computer simulation.

Key words: wireless sensor network; energy-efficiency; mixed service; transmission-efficiency; optimal sleeping time

1 引言

近年来,无线传感器网络发展迅速,受到了学术界和工业界的广泛关注。一个典型的无线传感器网络由部署在一定地理区域范围内的传感器节点构成,主要用于监测物理现象如温度、湿度、火灾以及地震^[1]。一个无线传感器网络节点通常

由 3 个部分组成:一个感知子系统,用于捕获外界环境的变化信息;一个信息处理子系统,用于对本地数据进行处理与存储;一个通信子系统,主要用于数据的传输与接收。除此之外,传感器节点还需要一个功率源来提供设备运行所需要的能量。该功率源通常是一个有限供电能力的电池。由于无线传感常常部署在恶劣的地理位置或者敌

收稿日期:2012-08-11;修回日期:2012-12-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320402);国家自然科学基金资助项目(61001092)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320402); The National Natural Science Foundation of China (61001092)

对环境, 对其进行重新充电非常困难。但是, 大部分的应用都要求无线传感器网络具有一个足够长的生命周期(天, 月等)。因此, 在能量有限的条件下, 如何尽可能地延长网络的生命周期成为设计无线传感器网络的关键问题。

根据网络结构和应用需求的不同, 无线传感器网络可以分为按时驱动型和事件驱动型 2 种。其中, 按时驱动型主要用于完成一些非实时的环境监测任务, 如气象监测、地理位置信息采集等; 事件驱动型主要用于完成一些实时性的环境监测任务, 如反恐安全和入侵防御、灾害监测、设备监控等。由于应用需求的不同, 其能量有效性的研究方法也不相同。对于按时驱动型网络, 最有效的能量效率提升方式是当没有通信需求时, 将传感器节点置于低功耗的睡眠状态。理想情况下, 传感器节点能够在没有数据发送时, 即时切换到睡眠模式, 而当有数据发送时, 即时切换到通信模式。但是在实际系统设计中, 节点处于睡眠状态通常假定为不能进行数据接收, 并且节点在工作模式转换的过程中也要产生一定的延迟和能量消耗。因此, 如何有效地调度节点睡眠/通信模式之间的转换, 成为按时驱动型节能问题的主要研究方向。其中典型的协议有 SMAC(sensor-MAC)^[2,3], 该协议以虚拟簇为单位周期同步睡眠, 延长了节点睡眠时间, 减小了节点能耗。随后众多工作是在此协议的基础上展开, 如 TMAC(timeout-MAC)^[4]同样采用了睡眠机制, 不同的是, 虽然 TMAC 中保持了固定的周期长度, 但节点监听时间会根据信道情况进行调整, 从而改变了睡眠时间的长度; PMAC(pattern-MAC)^[5]通过网络流量信息自适应地调整睡眠时间; LMAC(latency-MAC)^[6]针对 SMAC 中存在的睡眠延迟, 提出了数据成树形汇聚的通信方式, 根据树状结构调整节点的睡眠时间。此类方法需要节点周期地进行簇内同步, 由同步所带来的额外节点能耗不能忽略, 因此在节能方面具有一定的局限性。考虑到周期同步开销, 第二类方法为异步接入机制, 在这种方法中节点只需要监听较短的时间来判断是否有数据需要接收。文献[7~10]通过延长数据帧中导言的方式, 异步地接入信道来减少空闲监听。此类接入方式的优点在于当有数据传输时, 仅仅收发节点需要通过同步通信, 其他节点则避免了周期同步开销; 缺点在于发送节点需要保持监听状态直到接收节点苏醒才能传输数据, 因此增加了发送节点的监听开销

和等待时延^[11]。

相比较而言, 事件驱动型网络对数据传输的实时性要求较高, 节点需要一直处于环境感知状态以确保有紧急情况发生时, 无线传感器节点能够及时将数据传回 sink 节点。因此, 通常情况下, 事件驱动型网络具有更高的优先级。在已有研究中, 提高事件驱动型网络能量效率的一种方法是通过能量有效地捕获数据, 降低采样数据的样本数。文献[12]中, 作者利用了数据之间的空时相关性和自适应采样技术, 降低了采样样本的数量。文献[13]中提出利用 Kalman 滤波器来获得采样速率。在文献[14]中, 作者提出了一种反推算法, 通过利用感知信息的空间相关性, 通过一定的样本数即可获得足够的状态信息描述精度。文献[15]将基于触发式的采样方式应用于医疗侦听和损伤检测。另一种提高事件驱动型网络能量效率的方法是数据预测。通过建立数学模型描述感知到的现象, 使得询问可以通过该模型进行回复, 而非真实感知到的数据。文献[16]提出了一种基于时间序列预测的 PAQ (probabilistic adaptable query) 系统方法, 利用低阶 AR 模型, 有效地降低了网络节点的计算总量。文献[17]的工作通过自适应多模 (multi-model) 选择机制扩展了时间序列预测的方法。其主要思想是, 当一个环境状态的先验知识无法获取时, 系统自身能够自动选择一个正确的模型对环境进行预测。

尽管已有的研究中对于按时驱动型网络和事件驱动型网络的节能问题都进行了充分的研究。但是仍然很少有工作对于混合业务模式下的网络进行研究。将按时驱动型网络和事件驱动型网络共同部署, 可以使无线传感器网络具有更强的环境适应能力, 并满足更加广泛的应用需求。在本文中, 笔者将对混合网络模式下的无线传感器网络进行建模研究, 并重点针对按时驱动型网络的睡眠机制进行研究。在本文中, 笔者认为无线传感器网络中存在 2 种不同的网络节点。其中, 基于按时驱动型网络节点主要用于进行环境的常规检测等对传输延迟要求较低的非实时业务, 网络节点可以在传输状态、睡眠状态和侦听状态之间进行切换; 基于事件驱动型网络节点主要用于进行突发性的环境事件等对数据传输延迟敏感的实时性数据业务, 且节点始终处于侦听状态或者传输状态, 同时, 实时性业务具有更高的信道使用权限。对于如何提高实时业务的能量效率, 不在本文的研究范围之内。更多关于实时业务能

量有效性的研究可以参考文献[18,19]。本文主要考虑在实时业务和非实时业务共同存在的混合网络下，获得非实时业务的最优睡眠时间，使得网络节点的能量效率最大化。

2 系统模型

图1是实时业务和非实时业务共存的混合无线传感器网络的示意图。传感器节点状态由睡眠、侦听和通信状态组成。图1(a)给出了某一时刻网络中各个节点所处的状态。当节点A有非实时数据需要传输至sink节点时，首先经过路由协议确定传输路径，然后节点A沿此路径发送数据。在此过程中，数据传输路径上的各个节点在苏醒后进入收发状态，与此同时在收发节点的信号覆盖范围内的节点在获知信道被占用后即刻进入睡眠状态，其余节点保持自身的睡眠/侦听时间。当网络中有实时业务需要传输至sink节点时，由于实时业务具有更高的优先级，非实时业务处于会对实时业务传输产生影响的信道上，进行退避。如图1(b)所示，当节点B实时业务要发送时，要将数据发送至sink节点，需要节点C作为中继，因此在这种情况下，节点A暂停发送非实时数据并进入睡眠状态，由节点B使用信道传输。

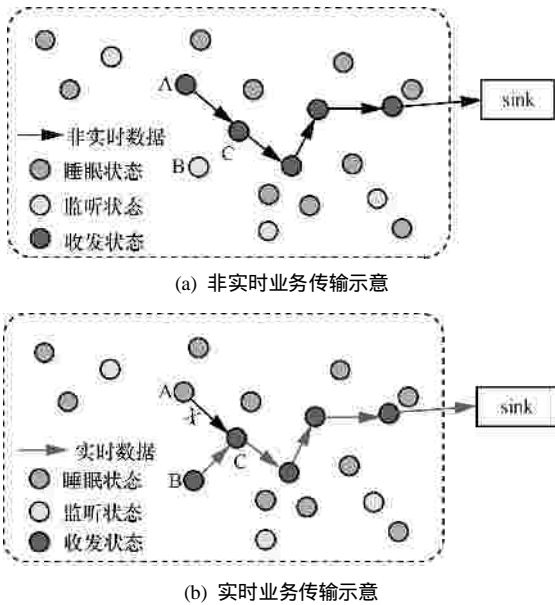


图1 混合无线传感器网络

在一个有限区域内，无线传感器网络中共有 N 个可用信道，网络中有实时业务节点(RT node, real-time node)和非实时业务节点(NRT node, non-real-

time node)。图2给出了信道接入的示意图，其中，RT节点对信道的使用具有绝对的优先级，即可以随机接入没有被其他RT节点占用的信道。只有当信道全部被RT节点占用时，新到达的RT业务才会被阻塞。为保证网络中实时数据的优先传输，传输NRT数据机会式地使用未被RT数据占用的信道。当被RT数据抢占时，退出当前传输的信道，等待下一次的接入。

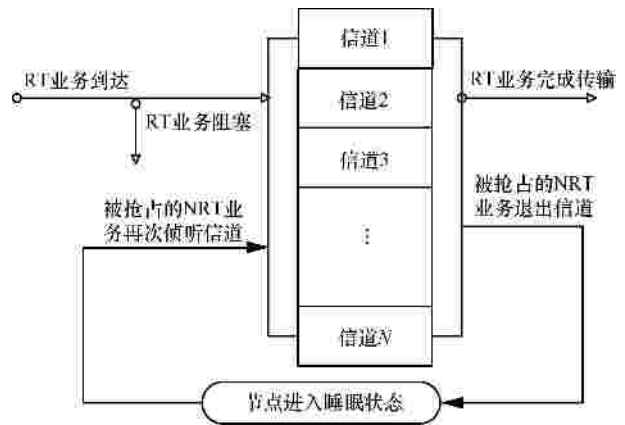


图2 混合业务无线传感器网络接入模型

根据以上的过程描述可以建立四维连续时间Markov模型。假设处于3种状态下的网络节点总数为 M ；RT数据业务的到达时间间隔服从参数为 λ_{RT} 的泊松分布；RT和NRT在信道中的传输时间服从均值为 $1/m_{RT}$ 和 $1/m_{NRT}$ 的负指数分布。NRT数据的网络节点在状态侦听状态和睡眠状态的平均时间为 $t_{se} = 1/m_{se}$ 和 $t_{de} = 1/m_{de}$ 。

定义1 维参数 $s := (i, j, k, l)$ 来表示无线传感器网络在每个时刻的状态。其中， i, j 分别表示系统中正在传输RT和NRT业务的节点个数， k, l 分别表示处于侦听状态和睡眠状的NRT节点个数。状态空间为

$$W = \{s := (i, j, k, l) | 0 \leq i + j \leq N, j + k + l = M\}$$

不失一般性，假设系统的当前状态为 (i, j, k, l) ，根据上一节中的系统描述，状态可能发生的转移有：当信道未占满时， $i + j < N$ ，此时NRT节点可能处于2种状态，在信道中传输状态或者睡眠状态。此时各个参数的关系是 $i + j < N, k = 0, j + k + l = M$ 。系统的状态转移有以下5种可能。

1) 节点有RT数据需要发送并通过竞争获得信道使用权，那么下一时刻的状态转换为 $(i + 1, j, 0, l)$ ，转移速率为 $(N - i - j) \lambda_{RT}$ 。

2) RT 业务先到达系统并抢占了 NRT 业务所在信道, 被抢占的节点转为睡眠状态, 下一时刻的状态转换为 $(i+1, j-1, 0, l+1)$, 转移速率为 $(j/N-i) \cdot l_{RT}$ 。

3) 若 RT 业务服务完成, 退出信道, 则下一时刻的状态转换为 $(i-1, j, 0, l)$, 转移速率为 im_{RT} 。

4) 若 NRT 业务服务完成, 退出信道, 转换为睡眠状态, 下一时刻的状态转换为 $(i, j-1, 0, l+1)$, 转移速率为 jm_{NRT} 。

5) 若某节点睡眠结束, 且此时的信道有空闲, 该节点首先转换为侦听状态而后马上接入信道, 此时状态转换为 $(i, j+1, 0, l-1)$, 转移速率为 lm_{de} 。

转换模型如图 3 所示。

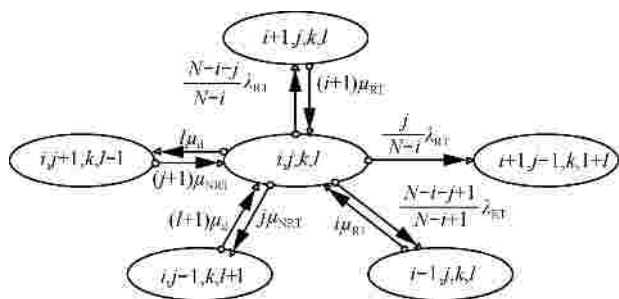


图 3 信道未占满时的系统速率转移示意

当信道满时, 且初始状态侦听的 NRT 节点个数不为 0, 即 $i+j=N, k \neq 0$ 时, 对应的参数关系为 $i+j=N, k \neq 0, j+k+l=M$ 。转换过程有以下 5 种可能。

1) RT 业务先到达, 只能抢占 NRT 所在的信道, 被抢占的网络节点转为睡眠状态, 系统的状态转移为 $(i+1, j-1, k, l+1)$, 转移速率为 l_{RT} 。

2) RT 业务完成, 退出信道, 信道变为空闲。处于侦听状态的节点立即接入信道, 其接入按照先进先出(first come first service)原则, 此时状态转换为 $(i-1, j+1, k-1, l)$, 转移速率为 im_{RT} 。

3) NRT 业务完成, 退出信道, 该节点转换为睡眠状态。处于侦听状态的网络节点立即接入信道, 系统的信道转移为 $(i, j, k-1, l+1)$, 转移速率为 jm_{NRT} 。

4) 处于侦听状态的网络节点侦听超时。此时信道没有空闲, 节点转换为睡眠状态, 系统的状态转移为 $(i, j, k-1, l+1)$, 转移速率为 km_{de} 。由于 3) 和 4) 的状态转移结果相同, 归结为一个过程, 其转移速率为 $km_{de} + jm_{NRT}$ 。

5) 处于睡眠状态的节点睡眠超时。由于信道没

有空闲, 节点转换为侦听状态并侦听空闲信道, 此时状态转移为 $(i, j, k+1, l-1)$, 转移速率为 m_{de} 。

第 2 类状态转换模型如图 4 所示。

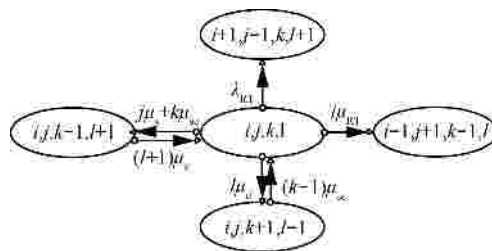


图 4 第 2 类状态转换模型

当信道满时, 且初始状态侦听的节点个数为 0, 即 $i+j=N, k=0$ 时, 对应的参数关系为: $i+j=N, k=0, j+k+l=M$ 。转换过程有 4 种可能。

1) RT 业务到达并抢占 NRT 道, 被抢占的节点转为睡眠状态。系统的状态转移为 $(i+1, j-1, 0, l+1)$, 转移速率为 l_{RT} 。

2) RT 业务完成, 退出信道, 信道变为空闲。系统中没有处于侦听状态的节点, 系统的状态转移为 $(i-1, j, 0, l)$, 转移速率为 im_{RT} 。

3) NRT 业务完成, 退出信道。节点转换为睡眠状态, 系统的状态转移为 $(i, j-1, 0, l+1)$, 转移速率为 jm_{NRT} 。

4) 处于睡眠状态的节点睡眠超时。由于此时的信道没有空闲, 节点转换为侦听状态并侦听空闲信道, 此时状态转换为 $(i, j, 1, l-1)$, 转移速率为 lm_{de} 。

第 3 类状态转换模型如图 5 所示。

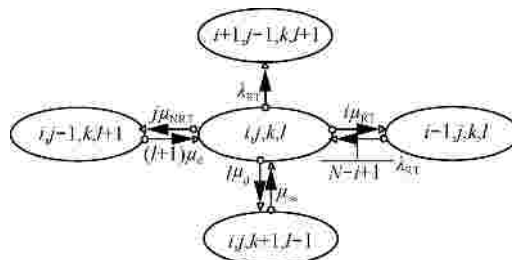


图 5 第 3 类状态转换模型

3 性能评估

3.1 稳态概率求解

系统中各个状态的稳态概率采用连续时间 Markov 链的稳态性质来求解。根据以上建模过程, 对应的在状态空间 W 中的状态稳态概率为 $p = \{p_{i,j,k,l} \mid 0$

$i + j \leq N, j + k + l = M$ }。Markov 过程状态转移速率矩阵为 Q 。假设 a 为当前时刻的状态， a' 为下一时刻的状态，矩阵 Q 可以表示成如下形式。

$$Q(a, a') \Big|_{a=(i,j,k,l), a'=W} = \begin{cases} \frac{N-i-j}{N-i} l_{RT} & , a' = (i+1, j, k, l) \\ \frac{j}{N-i} l_{RT} & , a' = (i+1, j-1, k, l+1) \\ l_{de} & , a' = (i, j+1, k, l-1) \\ i m_{RT} & , a' = (i-1, j, k, l) \\ j m_{NRT} + k m_{se} & , a' = (i, j, k-1, l+1) \\ j m_{NRT} & , a' = (i, j-1, k, l+1) \\ Q(a, a) = -\sum_{s \neq a} Q(a, s) & \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

把矩阵 Q 的第一列用 e 代替， e 为单位列矩阵，并有 $pe = 1$ ，此时 Q 变为 Q_1 ，由于 $pQ = 0$ ，令 $b = [1 \ 0 \ 0 \ L]$ ，则 $pQ_1 = b$ ，从而得到 $p = bQ_1^{-1}$ ，也就是说 p 的解为 Q_1^{-1} 的第一行。由此求得系统状态空间 S 中各个状态的稳态概率 $p(1, a) = Q^{-1}(1, a)$ ， $a = 1, L, s$ ， p 为 $1 \times s$ 维矩阵。

3.2 QoS 指标分析

系统中节点所处的 3 种状态都需要能量消耗，假设传输状态、侦听状态和睡眠状态下，单位时间需要耗能分别为 E_t 、 E_s 、 E_d ，其中，处于传输状态时消耗能量 E_t 最大，处于侦听状态消耗的能量 E_s 次之，处于睡眠状态的节点需要消耗能量 E_d 最少，即 $E_t > E_s > E_d$ 。另外考虑到降低 NRT 业务对 RT 业务的干扰，还需要将 2 种业务的碰撞概率进行约束。本文的几个参数指标如下。

1) 传输时间 (T_t)：定义为 NRT 业务在信道中总传输的时间。NRT 业务只能在没有 RT 业务的信道上进行传输，假设仿真时间为 T_{simu} ，根据以上对过程的描述，取状态空间中任一个状态 $(i_a, j_a, k_a, l_a) \in W$ 进行分析，假设节点传输单位数据时间为 t ，那么该状态下 NRT 业务在信道中总的传输时间为

$$T_t^a = j_a t \quad (2)$$

单位时间平均传输的数量记为 $n_t = T_t^a / T_{simu} = (j_a t) / T_{simu}$ ，根据稳态概率的物理意义，当前状态的稳态概率 $p_a = t / T_{simu}$ ，可得 $n_t = j_a p_a$ 。所以在状态空间中传输时间总和可以表示为

$$T_t = \sum_{a=1}^s j_a p_a \quad (3)$$

2) 侦听时间 (T_s)：定义为节点处于侦听状态的时间。由以上推导方法，有效状态 $(i_a, j_a, k_a, l_a) \in W$ ，侦听时间为 $T_s^a = k_a t$ ，系统中节点的侦听时间总和可以表示为

$$T_s = \sum_{a=1}^s k_a p_a \quad (4)$$

3) 睡眠时间 (T_d)：定义为节点处于睡眠状态的总时间。由以上推导方法，有效状态 $(i_a, j_a, k_a, l_a) \in W$ ，时间为 $T_d^a = l_a t$ 。系统中节点的睡眠时间总和可表示为

$$T_d = \sum_{a=1}^s l_a p_a \quad (5)$$

4) 传输效率 (h^t)：定义为单位时间比特传输量，NRT 业务在状态空间里的传输时间为

$$T_a^t = j_a p_a \quad (6)$$

系统中总传输效率为

$$h^t = T_a^t / T_{simu} = j_a p_a / T_{simu} \quad (7)$$

5) 能量效率 (h)：本文将无线传感器网络中 NRT 业务的能量效率定义为 NRT 业务每消耗单位能量可以传输数据的比特数。所以能量效率为单位比特平均传输比特个数与单位比特平均消耗能量的比值。

$$h = \frac{\text{单位时间平均传输个数}}{\text{单位时间平均消耗能量}}$$

总消耗的能量为 $E = n_t E_t + n_s E_s + n_d E_d$ ，能量效率为

$$h_a = \frac{j_a p_a}{E} = \frac{j_a p}{j_a p_a E_t + k_a p_a E_s + l_a p_a E_d} = \frac{j_a}{j_a E_t + k_a E_s + l_a E_d} \quad (8)$$

系统中总能量效率为

$$h = \sum_{a=1}^s h_a = \sum_{a=1}^s \frac{j_a}{j_a E_t + k_a E_s + l_a E_d} \quad (9)$$

6) RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率 ($P_{collision}$)

当信道被 RT 业务占满时，下一时刻到达的 RT 业务会被阻塞；用 P_{block} 表示 RT 业务阻塞率，可表

示为

$$P_{\text{block}} = \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^{M-k} p_{N,0,k,l} \quad (10)$$

RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率为在信道中的 RT 业务未被阻塞的前提下,新到达的 RT 业务占用 NRT 业务当前传输的信道,用 $P_{\text{collision}}$ 表示碰撞率,其表达式为

$$P_{\text{collision}} = \left(\frac{j_a}{N - i_a} \right) / (1 - P_{\text{block}}) \\ = \left(\frac{j_a}{N - i_a} \right) / \left(1 - \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^{M-k} p_{N,0,k,l} \right) \quad (11)$$

本文假设碰撞概率上限为 $P_{\text{collision-threshold}}$, 目标是在保证碰撞概率不超过其上限的前提下,即 $P_{\text{collision}} \leq P_{\text{collision-threshold}}$ 时,使无线传感器网络 NRT 业务的能量效率 h 最大化的节点最优睡眠时间。下文采用摄动分析的技巧来对系统进行性能分析,并提出求解最优睡眠时间的方法。

4 基于摄动分析的最优睡眠时间求解

4.1 随机动态系统

随机动态系统是指系统状态随着时间的演变而的演变的系统,系统的优化问题即是由观测和输入(行动)的历史得到输出的历史,在每个样本空间内采取怎样的行动才能使系统的总报酬达到最优,并找到对应的最优策略。当策略数目有限时,最优策略总是存在并且可能不唯一。假定在任一时刻 $l=0,1,2,L$, 系统的状态记为 $s_l(l=0,1,L)$, 状态空间内的样本路径是状态历史的记录,记为 $s = \{s_0, s_1, s_2, L\}$, s_l 是随机变量,样本路径表达了系统的动态行为。对于每条样本路径 $H_l(l=0,1,L,L)$ 均有一个报酬,记为 $h_l(H_l)$, 当样本路径的长度有限且为 L 时, $h_L(H_L)$ 代表系统遍历样本路径获得的所有报酬,并将系统的性能度量定义为报酬的平均值 $h = E[h_L(H_L)]$; 当样本路径为无限长时,性能度量定义为平均报酬的极限 $h = \lim_{L \rightarrow \infty} E[h_L(H_L)]$, 其中,假定期望和极限均存在。

在 Markov 模型的优化问题中,存在报酬函数,本文将记为 $f(i,a), i \in S, a \in A$, 表示在时刻 l , 如果系统处在状态 i , 并采取行动 a , 则系统获得报酬为 $f(i,a)$ 。对于长度为 L 的有限样本路径,系统的总报酬是 $h_L = \sum_{l=0}^{L-1} f(X_l, A_l)$, 性能度量

是 $h = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} f(X_l, A_l)$ 。对于遍历的 Markov 链,长期平均报酬为 $h = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} f(X_l, A_l)$, 可以看出它不依赖于初始状态。

关于随机动态系统的建模分析与优化策略,现已形成了很多方法。其中,研究不确定系统性能与优化问题的建模和分析主要有排队网络方法、Markov 决策过程(MDPS)、摄动分析(PA)等^[20]。排队网络方法是一种传统的基于排队论的方法,应用上具有一定的局限性,只适用于分析网络系统的稳态统计平均性能。Markov 决策过程适用于实际系统的建模分析。随着系统模型和所处环境复杂性的增加,比如状态空间的维数问题和系统参数未知等问题,MDPS 方法显然没有达到需求。在这个问题上,摄动分析方法较 MDPS 方法有一定的优势。PA 是基于梯度(或策略梯度)的学习和优化方法的核心,通过分析随机动态系统的单条样本路径来估计性能关于系统参数的导数。摄动分析早期的工作集中在排队系统中,后来被扩展到 Markov 系统中^[21]。它可以基于 Markov 的一条样本路径估计所有方向上的性能导数,导数可以作为一个整体来估计,而不必考虑每个状态的性能势。本文将采用基于摄动技巧的算法来对系统性能进行评估,对于文中所提的系统模型,在系统参数确定的情况下,通过改变可变参数 m_{tc} (策略),运用梯度算法找到使系统能量效率达到最优的策略。

4.2 基于摄动技巧的梯度算法

如果只分析一个策略下的系统,很难知道系统在其他策略下的行为。如果 2 个策略很“接近”,这 2 个策略下的系统性能表现也会很相似,据此当分析了一个策略下的系统性能后,可以“预测”在“接近”策略下的行为并计算它的系统性能^[22]。假设一个策略空间可以用连续参数表示,且 2 个策略对应地接近,则称这样的策略空间为连续策略空间。本文中的策略是指平均睡眠时间,所以是连续时间策略,平均睡眠时间的微小变化对应于 DCN 平均睡眠速率的变化,转移概率矩阵也会随之变化。所以如果 DCN 的平均睡眠时间比较接近,两个策略就可以视为接近,然后通过摄动技巧预测平均睡眠时间的微小变化对系统性能产生的影响,即可得到系统的性能导数,获得策略空间中各个策略下的性能梯度。并利用梯度的优化

算法确定局部最优点。基于摄动技巧的梯度算法结构如图 6 所示。

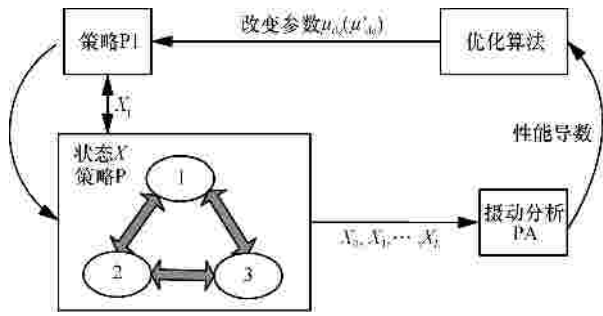


图 6 基于摄动技巧的梯度算法

4.3 性能函数求解

本文所建立的连续时间 Markov 模型，设定 m_{dc} 为变量，其他参数为定值， m_{dc} 的变化会导致状态矩阵 Q 变化，假设 Q^d 为对应于变量 m_{dc}^d 的一个转移矩阵， Q^d 的一个小变化会在 Q^d 的样本路径上引起一系列摄动， Q^h 是与 Q^d 十分接近的，睡眠速率为 m_{dc}^h 的另一个策略，显然 Q^d 和 Q^h 的性能函数相同，设 $\Delta Q = Q^h - Q^d$ ，定义 $Q_d = Q^d + d\Delta Q = (1-d)Q^d + dQ^h, 0 < d < 1$ ， Q_d 是随机策略，性能导数可以通过预测系统在转移速率矩阵从 $Q^d \sim Q_d$ 轻微摄动的行为中获得。假设在某时刻 l ，具有 Q^d 的 Markov 链状态为 i ， $X_l = i$ ，然而，当转移概率轻微变化为 Q_d 后，系统变成状态 $X_l = j(i, j \in S)$ ，从一个状态 i 到另一个状态 j 的跳跃，对系统性能 h^d 的平均影响可通过摄动实现因子来测量， $g^d(i, j)$ 表示摄动实现因子，可以证明，对于所有的 $i, j \in S$ ， $g^d(i, j) = g^d(j) - g^d(i)$ ，其中， $g^d(i)$ 称为状态 i 的性能势（简称势）。直观看来，某一策略 Q^d 下状态 i 的性能势 $g^d(i)$ 测量了状态 i 对长期平均报酬 h 的潜在贡献，它在 Q^d 上的样本路径定义为： $g(i) = E\{\sum_{l=0}^{\infty} [f(X_l) - h] | X_0 = i\}$ ，因此容易得到

$$g(i) = \text{当前状态 } i \text{ 的贡献} + \text{下一个状态的长期潜在贡献的期望} \\ = (f(i) - h) + \sum_{j \in S} p_{ij}(i)g(j) \quad (12)$$

用矩阵形式表示为

$$(I - Q)g + he = f \quad (13)$$

其中， $g = (g(1), \dots, g(S))^T$ 是性能势向量，而 $e =$

$(1, 1, \dots, 1)^T$ 是每个分量都为 1 的列向量。由式(13)可知性能势满足 $Qg^p = -f^p + ce$ ，由于 $pQ = 0$ ，所以 $c = pf$ ，Markov 过程的长期平均性能度量为 $h = pf = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E\left[\int_0^T f(X_t)dt\right]$ ，对于遍历的 Markov 过程它是存在的，这里 E 表示期望。

下面求解系统的性能梯度。定义 RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率为性能函数 f_p ，系统的能量效率为功耗函数 f_c ，分别记成向量形式： $f_p = (f_p^1, f_p^2, \dots, f_p^L)^T$ ，和 $f_c = (f_c^1, f_c^2, \dots, f_c^L)^T$ ，可将性能函数和功耗函数表示为

$$f_p^s = P_{\text{collision}} = \left(\frac{j_s}{N - i_s}\right) / \left(1 - \sum_{k=0}^M \sum_{l=0}^{M-k} p_{N,0,k,l}\right) \quad (14)$$

$$f_c^s = h_s^c = \frac{j_s}{j_s E_1 + k_s E_2 + l_s E_3} \quad (15)$$

性能势满足下面的泊松方程。

$$Qg_p = -f_p + ?_p e \quad (16)$$

$$Qg_c = -f_c + ?_c e \quad (17)$$

其中， $?_p$ 代表性能测度， $?_p = (h_p^1, h_p^2, \dots, h_p^L)$ ， $h_p^s = pf_p^s$ ； $?_c$ 代表能量消耗测度， $?_c = (h_c^1, h_c^2, \dots, h_c^L)$ ， $h_c^s = pf_c^s$ ，假设 RT 业务和 NRT 业务碰撞的最大上限为 $P_{\text{collision-threshold}}$ ，故有 $h_p^s \leq P_{\text{collision-threshold}}$ 。

为了得到性能测度和功耗测度的性能梯度，对 $pQ = 0$ 两边在 $m_{dc} = 0$ 处取导数，可得： $\frac{dp}{dm_{dc}}|_{m_{dc}=0} = -p \frac{dQ}{dm_{dc}} Q^\#$ ， $Q^\# = (Q - ep)^{-1} + ep$ 。对式(16)和式(17)

两侧左右乘以 p ，可知在 $m_{dc} = 0$ 处，

$$\frac{d?}{dm_{dc}}|_{m_{dc}=0} = \frac{dp}{dm_{dc}}|_{m_{dc}=0} f \\ = -p \left(\frac{dQ}{dm_{dc}}\right) Q^\# f = p \left(\frac{dQ}{dm_{dc}}\right) g \quad (18)$$

故性能测度与功耗测度的梯度分别为

$$\frac{\partial h_p(m_{dc})}{\partial m_{dc}} = \sum_{i \in S} p_i(m_{dc}) \sum_{j \in S} \frac{dQ_{ij}(m_{dc})}{dm_{dc}} g_{pj}(m_{dc}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial h_c(m_{dc})}{\partial m_{dc}} = \sum_{i \in S} p_i(m_{dc}) \sum_{j \in S} \frac{dQ_{ij}(m_{dc})}{dm_{dc}} g_{cj}(m_{dc}) \quad (20)$$

本文将通过基于摄动分析的梯度算法来计算

使能量有效无线传感器网络性能最优的策略。也就是在 $h_p \leq P_{\text{collision-threshold}}$ 的前提下, 寻找一个最优策略 m_{de} , 使系统的能量效率达到最优。

4.4 梯度算法

由以上对性能函数的推导, 可以精确地估计得到能量效率的性能梯度 $\frac{\partial h_c}{\partial m_{\text{de}}}$ 和 $\frac{\partial h_p}{\partial m_{\text{de}}}$ 。结合拉格朗日梯度算法, 在 $h_p \leq P_{\text{collision-threshold}}$ 的约束条件下, 假设 $P_{\text{collision-threshold}} = e$, 可得

$$m_{\text{de}}^{k+1} = (m_{\text{de}}^k + k_k \frac{\partial h_c}{\partial m_{\text{de}}}) + (e - h_p) \frac{\partial h_p}{\partial m_{\text{de}}} \quad (21)$$

其中, k_k 表示步长。取步长 $k_k = a_1 a_2^k + b$ 。其中, $1 > \{a_1, a_2\} > 0$, $b > 0$ 都是任意正数。从初始点 $m_{\text{de}}^0 = 0$ 开始进行迭代, 在第 k 次迭代中, 利用参数 m_{de}^k 进行计算, $k = 0, 1, \dots$, 随着 k 的逐渐变大, 步长 k_k 随着 k 的增加而改变, 参数 m_{de} 根据式(21)更新, 估计在 m_{de}^k 处的性能梯度 $h_k = \frac{dh_c(m_{\text{de}}^k)}{dm_{\text{de}}}$ 。当迭代次数 k 越来越大时, m_{de} 的大小变化缓慢, 此时 $m_{\text{de}}^{k+1} - m_{\text{de}}^k \approx 0$, h_k 趋近于 0, h_p 趋近于 e , m_{de} 收敛到局部最优点, 此时最优点可表示为

$$m_{\text{de}}' = m_{\text{de}}^{k+1} \approx m_{\text{de}}^k \quad (22)$$

最优能量效率为策略 m_{de}' 下的 $h_c \leq h_c = pf_c$ 。基于摄动分析的梯度算法如下所示。

算法 1 基于摄动分析的梯度算法

输入: 性能函数 $f_p = (f_p^1, f_p^2, \dots, f_p^s)^T$

功耗函数 $f_c = (f_c^1, f_c^2, \dots, f_c^s)^T$

输出: 平均睡眠速率 m_{de} 。

初始化: 平均睡眠速率 $m_{\text{de}}^0 = 0$, 步长 $k_k = a_1 a_2^k + b$, $1 > \{a_1, a_2\} > 0$, $b > 0$, $k = 0$, 碰撞概率上限 $e = 0.3$ 。

while $|m_{\text{de}}^{k+1} - m_{\text{de}}^k| > 10^{-4}$

$k = k + 1$

根据式(21), $m_{\text{de}}^{k+1} = (m_{\text{de}}^k + k_k \frac{\partial h_c}{\partial m_{\text{de}}}) + (e - h_p) \frac{\partial h_p}{\partial m_{\text{de}}}$

计算平均睡眠速率。

根据式(16)和式(17)计算 h_p 与 h_c , 并由式(19)、

式(20)计算 $\frac{\partial h_p(m_{\text{de}})}{\partial m_{\text{de}}}$, $\frac{\partial h_c(m_{\text{de}})}{\partial m_{\text{de}}}$

endwhile

5 仿真结果分析

针对本文提出的能量有效无线传感器网络接入策略, 利用 MATLAB 对基于摄动分析的梯度算法进行仿真模拟, 通过仿真结果验证了该算法的收敛性, 然后分析使系统性能达到最优的策略。

5.1 算法收敛性验证

本节将对基于摄动分析的梯度算法进行仿真分析, 系统参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数类型	取值
信道数目 N	10
NRT 节点数目 M	8
NRT 平均感知速率 m_c	7
NRT 服务速率 m_p	2
碰撞概率门限 $P_{\text{collision-threshold}}$	0.35
NRT 传输单位比特耗能 E_t	1
NRT 感知单位比特耗能 E_s	0.5
NRT 睡眠单位比特耗能 E_s	0.05

图 7 和图 8 分别表明了在不同无线传感器网络环境下, 系统能量效率和 RT 与 NRT 之间碰撞概率随平均睡眠速率迭代次数的变化情况, 设定迭代次数为 500 次。随着仿真次数的增加, NRT 睡眠速率依据式(21)变化。改变系统中信道个数 N 、RT 到达速率 λ_{RT} 和 RT 服务速率 m_{RT} 3 个参数进行分析。

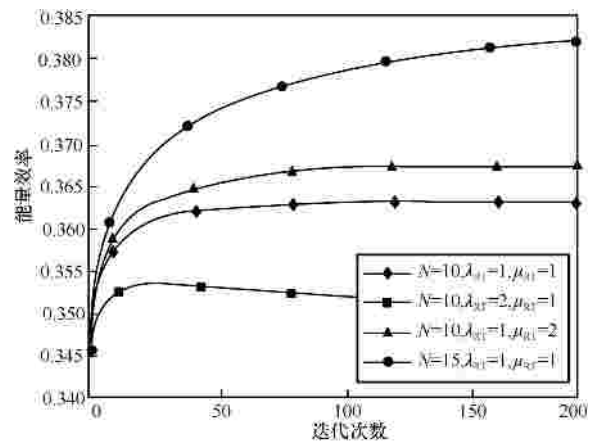


图 7 能量效率随各参数的变化

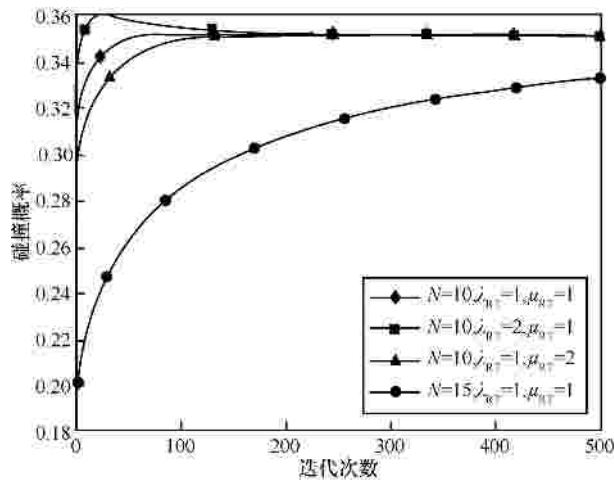


图 8 两用户碰撞概率随各参数的变化

从图 7 可以看出，在多种系统环境下，当仿真次数足够多时，无线传感器网络的能量效率收敛到一个定值，称这个收敛值为该环境下的最优能量效率。从图 8 可以看出，在多种系统环境下，当仿真次数足够多时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率也收敛到一个定值。由此可以证明本文采用的基于摄动分析的梯度算法是收敛的。

5.2 随 λ_{RT} 变化的仿真结果分析

图 9 表明不同 RT 到达速率 λ_{RT} 下的最优能量效率的变化情况。图 9 中每条曲线表示系统中信道个数以及其他参数固定时，NRT 业务的平均睡眠速率随着迭代次数的增加而变化，从图 9 中可得到每个 λ_{RT} 下的最优能量效率。最优能量效率随着 RT 到达速率的增大而减小。这是由于当 RT 业务到达速率增大时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率大，NRT 业务节点获取空闲频谱的机会较小，感知时间增多，使得无线传感器网络的能量效率逐渐下降。同时还可以看出，RT 业务到达速率一定时，随着信道个数的增加，系统最优能量效率增加。信道个数增加时会使得信道中 RT 业务的 NRT 业务的碰撞概率减小，NRT 节点获得频谱机会增多，从而 NRT 节点感知信道的时间减小，因此，系统的最优能量效率会逐渐增大。

图 10 表明了 RT 业务到达速率不同的情况下，随着迭代次数的增加，系统能量效率和碰撞概率的变化关系。NRT 节点的平均睡眠速率随着迭代次数的增加而变化。当 $\lambda_{RT} = 1$ 时，碰撞概率从小于 0.35 处逐渐上升至 0.35，并保持不变，能量效率则先增大后减小，最后收敛于一定值。当 $\lambda_{RT} = 3$ 时，碰撞概率较大，随着迭代次数的增加，

碰撞概率维持在小于且趋近于 0.35 处。这是由于 λ_{RT} 较小时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率较小，能量效率较小。随着仿真时间的增加，NRT 节点获得更多的频谱接入机会，碰撞概率会逐渐增加，而能量效率也会增加。利用基于摄动分析的梯度算法，迭代次数增大，碰撞概率维持在门限以内，而能量效率最终趋于稳定。当 λ_{RT} 较大时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率增大，能量效率增大。利用基于摄动分析的梯度算法可使系统的碰撞概率变小，逐渐收敛于 0.35；能量也逐渐变小，且最终收敛。由此可知，当 λ_{RT} 较小时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率可以一直保持在设定门限内，并且无线传感器网络的能量效率也较大；而当 λ_{RT} 较大时，两用户的碰撞概率也较大，应用该算法的迭代结果可以将两用户碰撞概率最终维持在设定门限内，达到不影响 RT 节点传输的目的，但是系统的能量效率将有所下降。

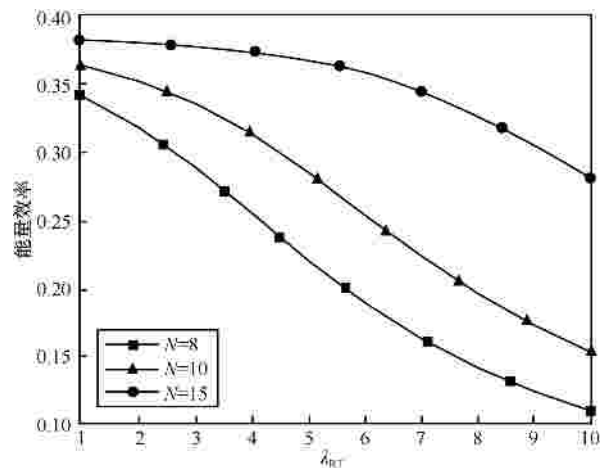


图 9 能量效率随 λ_{RT} 变化

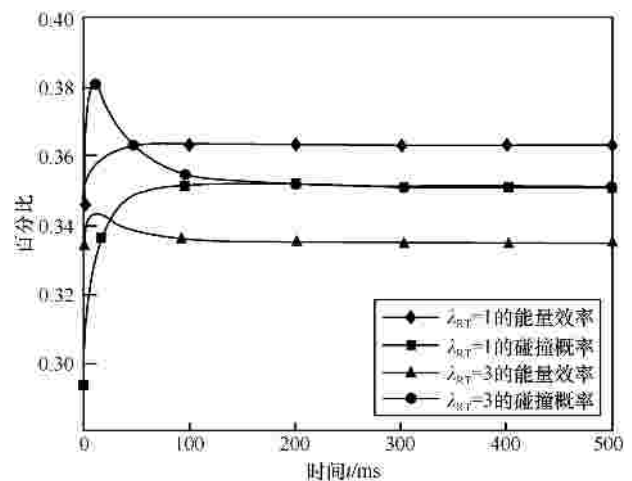


图 10 能量效率和碰撞概率随 λ_{RT} 的变化

下文将分析当 l_{RT} 不同时, 基于摄动分析的梯度算法较固定睡眠时间接入策略的优越性。当 l_{RT} 较小时 (假设 $l_{RT} = 1$), 图 11 为 NRT 平均睡眠速率的迭代曲线, 实线为平均睡眠速率 m_{dc} 根据式(21)迭代得到的变化曲线, 虚线为不经过迭代的 m_{dc} , $m_{dc} = 1.32$ 时的系统性能如图 12 所示。应用梯度算法得到的能量效率是粗实线, 其值收敛到 36.3%, 碰撞概率用 \blacklozenge 表示, 其值收敛到 35.0%。固定睡眠时间的能量效率对应于曲线 \blacklozenge , 其值为约 36.1%, 碰撞概率对应曲线为 \blacktriangle , 其值约为 34.0%; 因此可以得出结论: 当 l_{RT} 较小时, 利用基于摄动分析梯度算法计算的系统最优能量效率优于较固定睡眠时间的能量效率, 同时利用该算法也保证了 RT 和 NRT 的碰撞概率在所设定的门限以内。因此, 在本文所设系统环境条件下, 利用基于摄动分析的梯度算法计算出能量有效的 NRT 业务的最优能量效率为 36.3%, 它较固定睡眠时间策略能量效率高出约 2.0%。

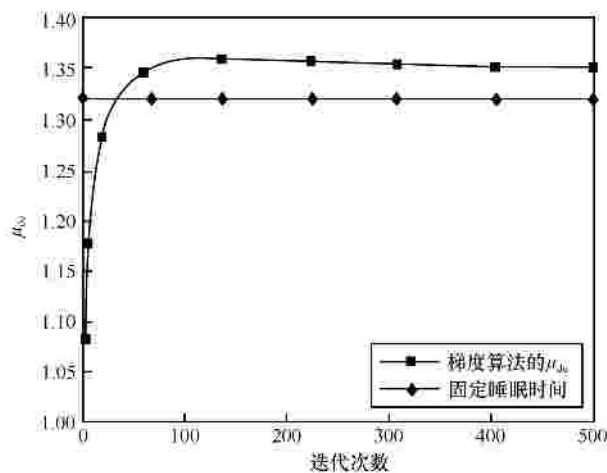


图 11 平均睡眠速率随迭代次数的变化

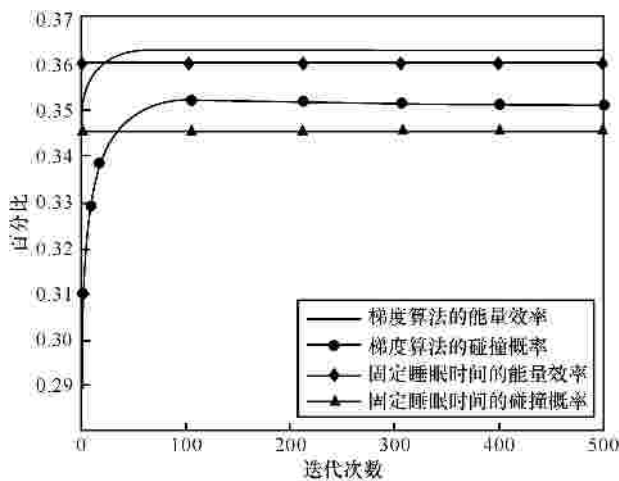


图 12 能量效率和碰撞概率随迭代次数的变化

当 l_{RT} 较大时 (假设 $l_{RT} = 3$), 图 13 为 NRT 平均睡眠速率随迭代次数的变化, $m_{dc} = 1.8$ 时的系统性能如图 14 所示, 应用基于摄动分析的梯度算法得到的能量效率曲线是图中的粗实线, 其值收敛到 33.5%, 碰撞概率是图中的 \blacklozenge , 其值收敛到 0.35。应用固定睡眠时间时, 能量效率对应图中的 \blacklozenge , 其值为 36.6%, 碰撞概率对应图中 \blacklozenge , 其值为 0.5; 同样可以得出结论: 当 l_{RT} 较大时, RT 和 NRT 的碰撞概率较大, 利用基于摄动分析的梯度算法计算出的最优能量效率虽然较固定睡眠计算出的最优能量效率小, 但是它可以保证 RT 和 NRT 的碰撞概率最终在所规定门限 0.35 以内, 此时得出该系统环境下最优能量效率结果为 33.5%。

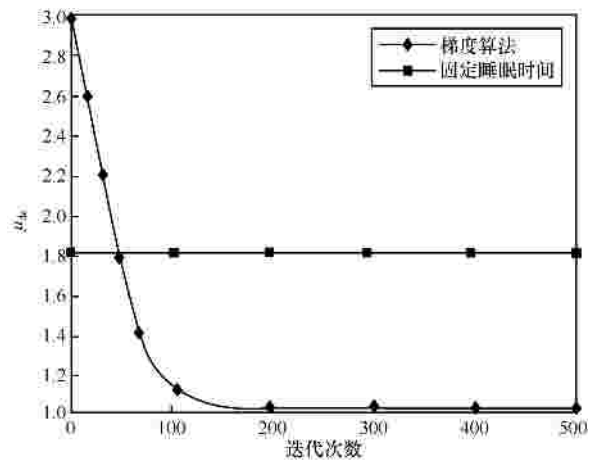


图 13 平均睡眠速率随迭代次数的变化

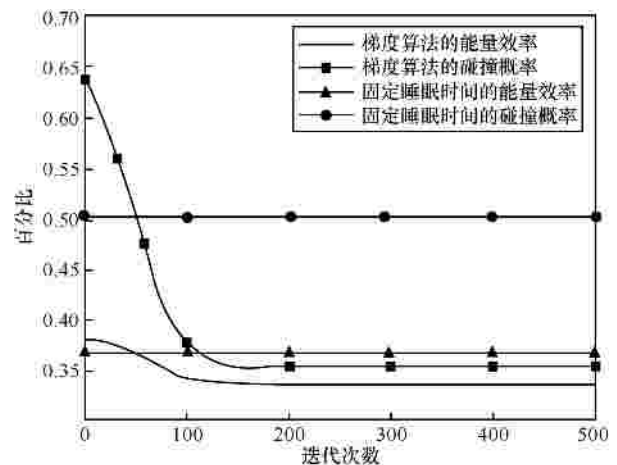


图 14 能量效率和碰撞概率随迭代次数的变化

5.3 随 m_{RT} 变化的仿真结果分析

从图 15 可以看出, 当系统中信道个数以及其他参数都固定时, 无线传感器网络的最优能量效率随着 RT 业务服务速率的增加而增加, 并逐渐收敛。

原因是当 RT 业务服务速率增大时，RT 业务在信道中传输的时间短，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率减少，从而 NRT 能够获取空闲频谱的机会增多，NRT 业务所需要感知信道的的时间减小，系统的能量效率增大。同时图 15 也表明了当 RT 业务服务速率一定时，随着信道个数的增加，系统能量效率逐渐增加。

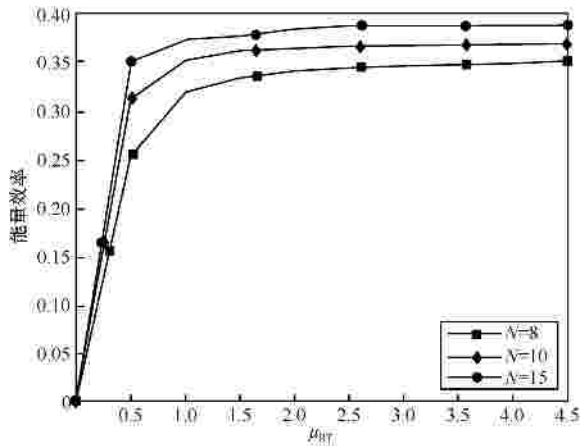


图 15 不同信道数目的能量效率随 m_{RT} 的变化

图 16 表示 NRT 的平均睡眠速率随着仿真次数的增加而变化，当 $m_{RT} = 2$ 时，碰撞概率小于从 0.35 逐渐上升至 0.35 不变，能量效率先增大后减小，最后收敛于一定值。当 $m_{RT} = 0.5$ 时，RT 与 NRT 的碰撞概率较大，随着仿真次数的增多，最后将其控制在 0.35 以内。可以看出，当 m_{RT} 较小时，虽然系统的能量效率下降，但是两用户的碰撞概率最终将维持在设定范围内，对 RT 具有保护作用，不会影响到 RT 的传输；当 m_{RT} 较大时，RT 业务和 NRT 业务的碰撞概率可以一直保持在设定范围内，并能使系统能量效率提高。

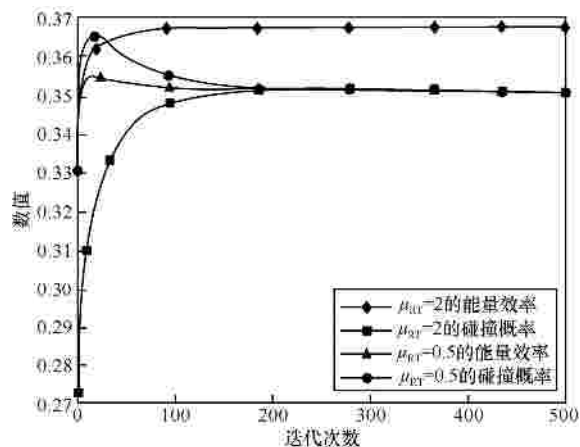


图 16 不同 m_{RT} 的能量效率和碰撞概率随迭代次数的变化

在能量有效的无线传感器网络中，在不同网络环境下，NRT 接入信道的机会较大时，利用基于摄动分析的梯度算法选择的策略不但可以提高系统的能量利用率，还可以使 NRT 业务对 RT 业务的影响在设定门限内，保证了 RT 业务的传输质量；当 NRT 节点接入信道机会较小时，虽然能量效率降低了，利用该算法计算出的最优策略可以保证 RT 业务的传输质量不受影响。

6 结束语

本文研究了混合业务背景下无线传感器网络的能量效率问题。通过分析，对于非实时业务而言，由于业务 QoS 等级低于实时业务，因此常常需要等待实时业务进行传输，从而使得大量的时间浪费在等待信道方面。节点睡眠机制是提高能量效率的有效手段。本文以非实时业务节点的睡眠时间为切入点，提出了一种可变睡眠时间的动态接入机制，并利用连续时间 Markov 方法，以最大化能量效率为目的，以实时业务与非实时业务的碰撞概率为约束条件，并且给出了系统性能函数的解析解。为了得到能量效率意义下的最佳睡眠时间，本文通过摄动分析方法得到了无线传感器网络能量效率和实时业务与非实时业务的冲突概率关于平均睡眠时间的梯度信息，并提出了一种基于摄动分析的梯度搜索算法。实验仿真结果表明，通过本文提出的梯度算法求得的最优睡眠时间，系统能够在保证冲突概率的前提下，能够有效提升无线传感器网络的能量效率。同时，通过实验得到了系统能量效率与冲突概率存在的折中关系，而睡眠时间可以作为系统性能调节的重要参数，平衡能量效率与冲突概率，使得无线传感器网络能够具有更大的灵活性，提高网络的业务承载能力。

参考文献：

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 38(2): 393-422.
- [2] WEI Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks[A]. *INFOCOM[C]*. New York, USA, 2002. 1567-1576.
- [3] WEI Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(3):493-506.
- [4] VAN D T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks[A]. *Proceedings of the 1st In-*

- International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. New York, USA, 2003. 171-180.
- [5] FEI T, WAN T, RONG X, *et al.* P-Mac: a cross-layer duty cycle Mac protocol towards pipelining for wireless sensor network [A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto, Japan, 2011. 1-5.
- [6] LENING W, KAI L. An adaptive energy-efficient and low-latency mac protocol for wireless sensor networks[A]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom)[C]. Shanghai, China, 2007. 166-169.
- [7] EL HOIYDI A. Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks[A]. Communications, 2002 CC 2002 IEEE International Conference[C]. New York, USA, 2002. 3418-3423.
- [8] HILL J L, CULLER D E. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks[J]. Micro IEEE, 2002, 22(6):12-24.
- [9] MAHLKNECHT S, BOCK M. Csm-Mps: a minimum preamble sampling mac protocol for low power wireless sensor networks[A]. IEEE International Workshop on Factory Communication Systems[C]. Vienna, Austria, 2004. 73-80.
- [10] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, *et al.* X-Mac: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Boulder, Colorado, USA, 2006. 307-320.
- [11] YU-CHIA C, JEHN-RUEY J, JANG-PING S, *et al.* Adca: an asynchronous duty cycle adjustment mac protocol for wireless sensor networks[A]. Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM[C]. New Orleans, USA, 2008. 1-5.
- [12] ALIPPI C, ANASTASI G, GALPERTI C, *et al.* Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications[A]. IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems[C]. Pisa, Italy, 2007. 1-6.
- [13] ANKUR J, EDWARD Y. Adaptive sampling for sensor networks[A]. Proceedings of the 1st International Workshop on Data Management for Sensor Networks: in Conjunction with VLDB 2004 (DMSN '04)[C]. Toronto, Canada, 2004. 10-16.
- [14] WILLETT R, MARTIN A, NOWAK R. Backcasting: adaptive sampling for sensor networks[A]. The Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks[C]. Berkeley, USA, 2004. 124-133.
- [15] KIJEWski-CORREA T, HAENGGI M, ANTSAKLIS P. Wireless sensor networks for structural health monitoring: a multi-scale approach[A]. ASCE Structures Congress: 17th Analysis and Computation Specialty Conference[C]. St Louis, USA, 2006. 1-16.
- [16] TULONE D, MADDEN S. PAQ: time series forecasting for approximate query answering in sensor networks[A]. The 3rd European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 06)[C]. Zurich, Switzerland, 2006. 21-37.
- [17] YANN-AËL L B, SILVIA S, GIANLUCA B. Adaptive model selection for time series prediction in wireless sensor networks[J]. Signal Processing, 2007, 87(12):3010-3020.
- [18] SAZAK N, ERTURK I, KOKLUKAYA E, *et al.* An energy efficient MAC protocol for cluster based event driven WSN applications[A]. Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)[C]. Dalmatia, Croatia, 2010. 76-81.
- [19] ZHOU H, WU F, HOU K. An event-driven multi-threading real-time operating system dedicated to wireless sensor networks[A]. International Conference on Embedded Software and Systems, ICESS '08[C]. Chengdu, China, 2008. 3-12.
- [20] CAO X, CHEN H. Perturbation realization, potentials, and sensitivity analysis of Markov processes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(10):1382-1393.
- [21] HO Y C, CAO X. Realization Probabilities: The Dynamics of Queueing Systems[M]. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [22] CAO X. Stochastic learning and optimization-a sensitivity-based approach [J]. Annual Reviews in Control, 2009, 33(1):11-24.

作者简介:



王亚松 (1984-), 男, 江西宜黄人, 北京邮电大学博士后, 主要研究方向为 LTE 通信系统、网络编码、无线网络协议。



张钦宇 (1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、无线通信技术、专用移动通信系统等。



李云鹤 (1983-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为压缩感知、网络编码。



韩晶 (1984-), 女, 山西偏关人, 北京邮电大学博士后, 主要研究方向为无线传感器网络协议、大数据服务等。