

无线传感器网络能效模型的量化评价与优化

蒋文贤^{1,2,3}, 程光^{2,3}

(1. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 361021 福建 厦门; 2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 211189 南京;
3. 东南大学 计算机网络和信息集成教育部重点实验室, 211189 南京)

摘要: 为解决面向工业实时控制的无线传感器网络在性能和能量效率的平衡问题, 提出了一种能效模型的量化评价和优化设计方案. 该方案通过引入反馈控制的思想, 运用层次分析法构建基于服务质量约束的能效模型评价方法, 采用加权综合量化指标权重计算服务的可用性; 在此基础上, 给出了基于效用函数的优化模型并设计了一种多度量目标优化算法. 仿真结果表明, 该方法能对网络协议进行调整优化满足有限能量条件下的服务质量约束, 保证数据传输可靠, 降低能量消耗, 延长网络生存时间.

关键词: 无线传感器网络; 服务质量; 节能; 能量效率; 量化评价

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)05-0087-08

Optimization and quantitative evaluation mechanism of energy efficiency model on wireless sensor networks

JIANG Wenxian^{1,2,3}, CHENG Guang^{2,3}

1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, 361021 Xiamen, Fujian, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, 211189 Nanjing, China; 3. Key Laboratory of Computer Network and Information Integration the Ministry of Education, Southeast University, 211189 Nanjing, China)

Abstract: To solve the problem of the balance between performance and energy efficiency on real-time control and industry-oriented wireless sensor networks, we propose a quantitative evaluation and optimal design scheme of energy efficiency model. Firstly, by introducing the feedback control theory, we construct an evaluation method of energy efficiency model under the QoS constraint using an analytic hierarchy process and compute service usability using comprehensive quantitative metric weights based on weighted sum. Then, based on this, we provide an optimization model based on a utility function and design a multi-metric optimization algorithm. The simulation results show that this method can adjust and optimize the network protocol, satisfy QoS constraint under the condition of limited energy, ensure reliable data transmission, reduce energy consumption and prolong network life-time.

Keywords: wireless sensor networks; quality of service; energy-saving; energy efficiency; quantitative evaluation

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 的特点决定其首要设计目标是有限能量的高效使用^[1], 与此同时, 随着 WSN 应用的深入,

如工业实时控制应用场景需要符合一定的数据包丢包率 (可靠性) 和延迟 (实时性) 等服务质量 (quality of service, QoS) 的要求, 且其通信协议必须是灵活设计的参数, 以充分满足各种应用的诸多约束. 然而, 高可靠性和低延迟可能会显著消耗网络能量, 从而减少 WSN 的生存时间. 因此, 作为面向工业实时控制等应用的无线传感器网络, 其高效可靠系统的发展很大程度上依赖于如何更好地对通信协议进行调整优化来满足有限能量条件

收稿日期: 2013-04-04.

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目 (BE2011173); 福建省自然科学基金资助项目 (2013J01240); 江苏省未来网络前瞻性研究资助项目 (BY2013095-5-03); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目 (2011-DZ024).

作者简介: 蒋文贤 (1974—), 男, 副教授;
程光 (1973—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 蒋文贤, jwx@hqu.edu.cn.

下的服务质量约束^[2].

节能研究的一个重要理论基础是节能评价,特别是定量刻画网络系统的节能指标.清华大学林闯等^[3]将能量看成一种系统资源,从资源分配和任务管理角度对绿色网络的机制和策略进行了综述,介绍了模型方法在绿色评价中的应用,提出了基于随机模型的绿色评价框架;文献[4]对 WSN 进展情况进行了综合分析,其中 WSN 能量模型是对各种节能通信协议算法进行分析与评价的前提;文献[5]采用马尔科夫过程(Markov)对系统进行建模,进一步明确 WSN 的 QoS 和能效之间的取舍关系,解决如何降低 QoS 何种指标能带来能量的明显节约,如何以最小的能量代价换取 QoS 的提升等问题.

到目前为止,关于 WSN 服务质量和能量有效性还没有被模型化和量化,定量分析网络性能与协议参数间关系的研究还处于起步阶段,大部分工作只针对特定系统,还没有形成一套系统的理论方法.因此,针对面向应用的 WSN 在某些业务领域需要同时满足性能及节能的需求,本文建立准确的能效模型,定量地描述能量效率与协议参数间的关系,平衡性能与协议参数之间的关系,具有实际应用价值.

1 WSN 能效模型

1.1 能效函数定义

能效函数就是在性能约束下的能耗度量,是单位能量内完成的运算量^[6].能效函数的建立有助于更好地研究 WSN 节能技术,可通过数学表达式及其测量和计算方法,推导出能效最大值的发生条件,从而指导和评估能效的优化.

普通传感器节点平均能耗分为:1)数据感知和处理模块消耗的功率,其功率可表达为 P_{sens} 和 P_{proc} ;2)节点发射模块在空闲、发送和接收数据状态下所消耗的功率,可表示为 P_{idle} 、 P_{tran} 和 P_{recv} ;3)收发机电路由睡眠状态转入活跃状态时所消耗的功率,因为每个周期 T 只发生一次状态切换,所以这部分功率 P_{start} 可表示为 E_{start}/T ,其中 E_{start} 为启动能耗.

为便于描述,采用网络平均能耗指标对网络能量效率进行表达.节点感知数据的平均能耗为

$$E_{\text{sens}} = P_{\text{sens}} \times t_1,$$

节点处理数据的平均能耗为

$$E_{\text{proc}} = P_{\text{proc}} \times t_2.$$

式中: t_1 、 t_2 分别为对应节点感知和处理一次数据的平均时间.

采用 I_{num} 和 I_{avg} 分别表示节点 s 可运行的指令条数和节点处理数据平均执行的指令条数,则 $t_2 = I_{\text{avg}}/I_{\text{num}}$,因此,节点处理数据的平均能耗表示为

$$E_{\text{proc}} = \frac{P_{\text{proc}} \times I_{\text{avg}}}{I_{\text{num}}}.$$

调整传感器节点的发射功率,可计算出单跳时端到端网络能耗.忽略节点空闲状态下的能耗,单跳网络的平均端到端能耗可表示为

$$E_m = E_{\text{sens}} + E_{\text{proc}} + E_{\text{tran}} = P_{\text{sens}} \times t_1 + \frac{P_{\text{proc}} \times I_{\text{avg}}}{I_{\text{num}}} + P_{\text{tran}} \frac{l}{R_b}.$$

式中: l 为分组长度, R_b 为数据速率, E_{tran} 为单跳分组传输能耗.

设 T 时间内系统处理的业务 $L(T)$ 和能耗 $E(T)$,则定义 T 时刻内能效 $\eta(T)$ 为

$$\eta(T) = \frac{L(T)}{E(T)}, E(T) \neq 0.$$

式中: $L(T)$ 为 T 时间内系统处理的业务, U ; $E(T)$ 为 T 时间内的能耗, J ; η 为能效单位.

WSN 涵盖了数据的感知、处理和传输功能并面向应用的任务型网络,其 QoS 参数除了包括一系列传统的性能参数,还涉及网络生存周期、覆盖度、连通度等更为广泛的 QoS 指标.文献[7]列出了能源有效性、生命周期、时间延迟、感知精度、可靠性、可扩展性等 6 大性能指标,这些指标不仅是评价 WSN 的标准,也是 WSN 设计的优化目标.通过衡量 WSN 在满足一定 QoS 的能耗来进行评价.如指标度量 ECR、ERP 等.例如,文献[8]将能耗与时延综合考虑,采用能耗(E)与时延(D)的乘积 ED 来衡量系统的性能.

1.2 能量与性能之间的映射关系

WSN 的 QoS 指标主要包括生命周期、时延延迟、感知精度、可靠性和可拓展性.这 5 类最高层抽象指标不仅互相耦合、制衡,而且会引发连锁反应.依次考察感应能量、处理能量、通信能量模块内的相关映射指标及能量均衡指标之间的因果和制约联系,可以得到相对应的能量与 QoS 的映射,如图 1 所示.

1.3 能效模型构建

从网络的观点来看,网络的目标是在最大化资源利用率的同时提供 QoS 服务保障^[9].基于上述分析,把 QoS 引入到能量有效度量中,建立能效模型,该模型以数据采集流量为自变量,以最大化网络性能和最小化网络能耗为目标,设计基于

各项指标之间的关联和制衡,并采取反馈控制的思想,如图 2 所示。

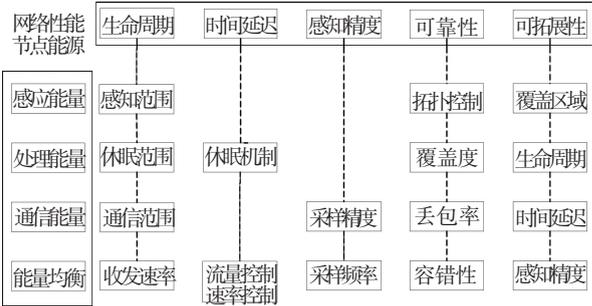


图 1 能量与服务质量的映射关系

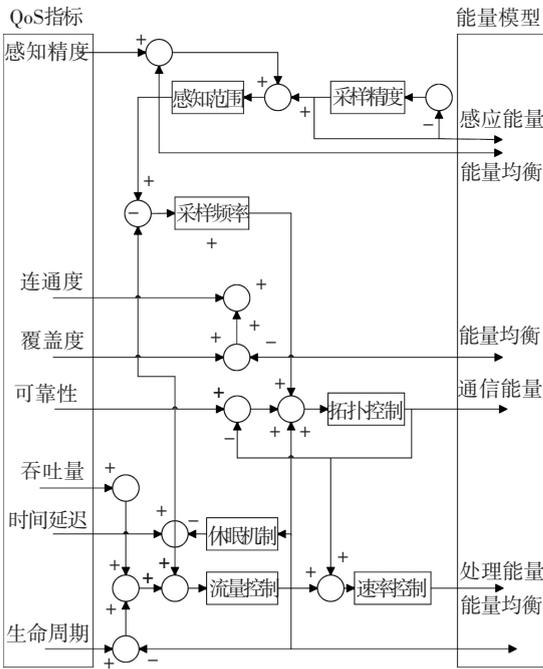


图 2 基于反馈控制的能效模型

以休眠机制为例,首先考察时间延迟要求、休眠周期与处理能耗节点之间的关系,并与事先设定的阈值进行比较,做出“正调”或者“负调”方案;然后对照图 1 的约束条件,联合流量控制和速率控制,作为能量均衡,实现在能量控制的基础上保障 WSN 的服务质量。

由于节点相互协作进行数据传输,因此,WSN 在数据处理时,需兼顾能耗和性能两方面因素。多目标参数在均衡网络能耗、优化能效方面与单目标参数相比具有明显优势,多目标参数可以最大限度地满足服务质量的需求。为此,采用反馈方式来实现网络传输能耗和能耗均衡特性的双重优化。通过构建权衡量化评价函数将多目标整合为单目标,降低模型的求解难度。

2 量化评价机制

2.1 评价方法

层次模型、组合模型和随机模型等分析方法^[10]

已经广泛应用在各种系统的性能评价中。本文量化评价采用层次分析方法 (analytic hierarchy process, AHP) 建立形式化的数学模型。如图 3 所示为 WSN 的基于服务质量约束的能效模型评价方法。

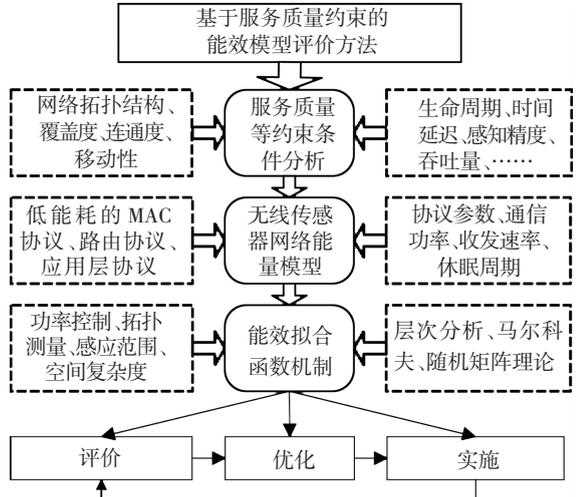


图 3 服务质量约束的能效模型评价方法

首先,在满足 WSN 网络拓扑结构、覆盖度、连通度和移动性等的基础上,定义生命周期、时间延迟、感知精度、吞吐量等 QoS 量化指标;其次,分析低能耗的应用层、网络层和 MAC 层间传递负载信息和控制信息,然后通过调整 WSN 协议参数、节点通信功率、收发速率和休眠周期等配置属性 (如在数据处理中研究节点的自适应休眠模式,进而通过设计合适占空比等方式) 减少计算量,实现最小能耗;在系统有限资源的约束下,如功率控制、拓扑测量、感应范围、空间复杂度等限制,通过层次分析模型、马尔科夫过程等数学工具进行建模,在满足一定 QoS 前提下,研究能效拟合函数机制,减少传输量,实现参数优化;最后,通过一个循环的过程:模型-评价-优化-实施-评价-再优化,逐步实现 WSN 的 QoS 和能效之间的权衡。

2.2 量化指标

量化分析是性能评价前提,建立可量化和可操作的能耗评价指标系统是关键^[11]。由于 WSN 节点的资源限制、易变的网络拓扑结构、有限的传输带宽等特点,使得 QoS 的可用性随时在发生变化。根据上述所提到评价方法,提出一种分层的基于服务质量约束的网络性能指标可用性分析和量化评估模型。如图 4 所示,第 1 层是目标层,反映了量化的对象。根据对影响 WSN 服务可用性因素的分析,将服务可用性划分为能量资源可用性 (ERA) 和网络资源可用性 (NRA) 两个一级指标层,然后对一级指标层进行再分解,组成二级指标层,二级指标按照图 4 中自左至右的顺序依次为 $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{24}, R_{25}$ 。

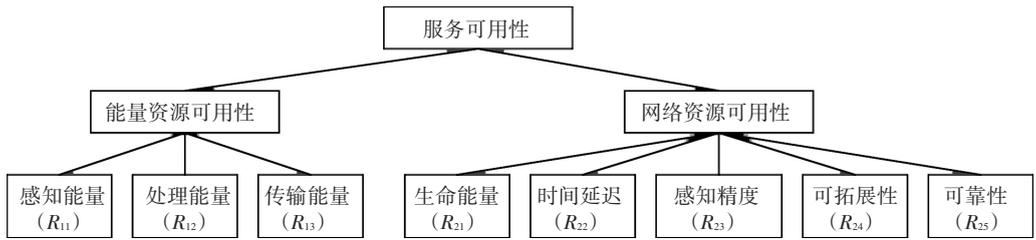


图 4 服务质量约束的网络性能指标模型

针对 WSN 不同的应用场景,可采用不同的方法确定量化指标的权重.具体量化步骤如下:

1) 建立 QoS 评价体系结构^[12].

2) 找出与每一个 QoS 评价指标关联的 QoS 参数.

3) 确定与各个 QoS 参数的权重.主要确定 QoS 评价指标两两比较的值以及一个 QoS 评价指标下相关的 QoS 参数两两比较的值,如

$$QoS(X) = K\{L * Wl + D * Wd + J * Wj + U * Wu + R * Wr + \dots\}.$$

式中: K 为整个 QoS 决定因子,由 WSN 业务应用类型而定; L 为生命周期; Wl 为生命周期权重; D 为延迟; Wd 为延迟的权重; J 为感知精度; Wj 为感知精度的权重; U 为可拓展性; Wu 为可拓展性的权重; R 为可靠性; Wr 为可靠性的权重.

由于 WSN 环境的复杂性、应用场景的多样性,每种场景用户所关注的性能指标的权重不尽相同,如在恶劣的环境中,能量消耗和生命周期就比较重要;在实时性要求较高的环境下,传输延迟和可靠性就比较重要.因此,可采用基于加权和的综合量化评估方法计算服务的可用性.

假设 R_{ij} 为评估目标指标的量化值,其对应的权重为 W_{ij} ,且 $\sum_{i=1}^m W_{ij} = 1$,则评估目标的量化值为

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \times R_{ij}.$$

按照指标的分层模型,量化评估 ERA 与 NRA 的指标权重设计如表 1、2 所示,进行自底向上的依次计算可得总体评估目标的量化值.

基于 QoS 约束的网络性能指标分层模型确定了服务可用性量化的指标,而指标的量化方法将数据转化为 $[0, 1]$ 区间内的指标值.

另外,量化指标要能够实时地反映真实的环境状况,而多目标综合量化评估法具有数学模型简单、对多因素多层次的复杂问题评估效果好的优点.在对影响 WSN 服务可用性因素进行分析并建立量化评估分层模型的基础上,可采用多目标综合量化评估法对服务的可用性进行量化评估.

表 1 ERA 指标权重计算

能量资源	指标	权重
R_{11}	1.0	0.2
R_{12}	2.0	0.3
R_{13}	3.0	0.5

表 2 NRA 指标权重计算

网络	指标	权重
R_{21}	1.00	0.40
R_{22}	2.00	0.20
R_{23}	3.00	0.15
R_{24}	2.00	0.15
R_{25}	1.00	0.05

3 优化设计

3.1 优化模型

WSN 的优化问题往往是在满足一定性能要求和系统有限资源约束下的最小能耗问题.网络 QoS 优化模型一般包含 4 个元素:优化目标、决策变量、约束条件和固定参数^[13].优化问题需要对目标函数和约束条件进行形式化描述,可以通过评价网络系统中 QoS 特定指标和能耗的关系,来构造优化的目标函数和约束条件中的变量.

最通用的目标函数定义为效用函数,效用函数可以严格地使用数学表达式定义,如网络吞吐量、分组平均延迟、感知精度以及网络能源使用量等,通过构建合理的数学模型,来定量分析网络性能与协议参数间的关系.网络优化问题的目标函数有 max-min 的形式.

例如,通用的优化形式可以表达为

$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimize}} f_0(x) \\ & \text{subject to } f_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m; \\ & h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, p. \end{aligned}$$

针对 WSN 面向应用的特点,构建网络优化模型元素如图 5 所示.

文献[14]将 WSN 节能问题表达为一个连通性的图论问题,在给定的一个传感器集合中,计算每个传感器的传输功率,使得每对传感器都是

连通的,且尽可能使总传输功率最小.这个问题是一个典型的带约束最优化问题.除资源约束外,由于网络中数据传输的有序性保证需要,也会对任务时序关系强加约束条件,例如 WSN 的数据聚合对数据时序的限制,文献[15]在该约束下试图最大化性能和能量效率.

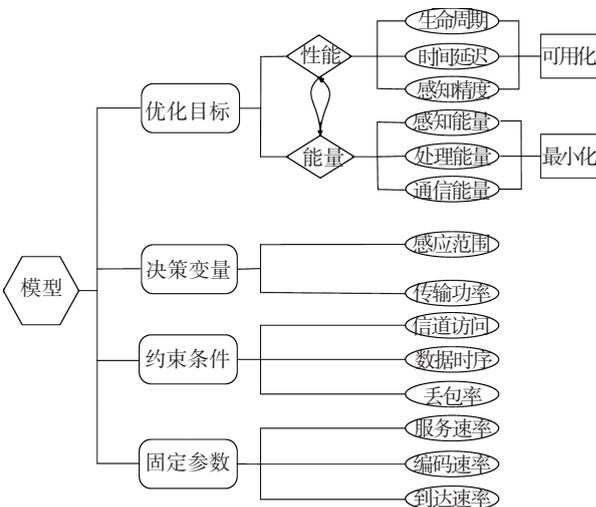


图 5 无线传感器网络优化模型

3.2 多度量目标优化

网络优化常常是对某一 QoS 指标而言,将其其他的 QoS 属性作为限制,也就是常见的单目标优化,例如,传统网络路由协议一般采用单度量方式,尽量使延迟最小而忽略其他能量等因素^[16],如 Dijkstra 路由算法等.如果考虑的性能指标有多个,就需要用多目标优化建模.WSN 对数据传输有一定的时延限制,因而在满足时延需求的前提下提高端到端能量使用效率是 WSN 协议优化设计的重要指标.例如,文献[17]研究了 WSN 多对一传输模式中的多目标 TDMA 调度模型,考虑了平均延迟和能量消耗两个目标的帕累托前沿(pareto frontie).文献[18]对多跳网络端到端分组成功传输概率、延迟、能耗进行了统计分析,导出了单位能耗所支持的平均数据速率的表达式,提出了一种新的即满足时延要求,又能提高能量效率的 WSN 性能评价及优化方法.

本文根据 WSN 资源限制的特点,研究服务质量约束的 MAC 协议和路由协议设计的优化问题:并行考虑多个度量指标,如同时最小网络延迟和节省能量作为网络设计度量,设计双度量的目标函数,即将协议参数 α 引入到目标函数,利用凸组合的方式将延迟和能量两个目标结合起来,设计一种基于多项式系数的能效算法,使之在较低延迟的情况下,可得到较高的能量节省.优化设计步骤如下:

1) 将 WSN 拓扑结构抽象为一个无向图 $G = (V, E)$, 其中: V 为传感器节点; E 为网络链路.假设每个传感器节点都有一个能耗函数 $f(x)$, 则定义该节点传输流量 x 所消耗的能量.

2) 设 G 中每条链路 e 都有一容量值 C_e , 则能耗函数 $f_e(x)$ 为链路 e 上的流量为 x 时消耗的能量.另外,可定义流量矩阵 T , 其中 $T_{i,j}$ 表示点 i 与点 j 之间的网络流量.

3) α 作为协议参数,对能量消耗和网络延迟两个目标进行凸组合,则总的消耗可表示为 $Cost = \alpha \times \text{能量消耗} + (1 - \alpha) \times \text{网络延迟代价}$.

凸组合可以保持两个目标原有的凹凸性,因此可以使组合后的问题与原问题用相同的方法求解.设计调节参数 α 可以获得不同的问题描述:

- ① 当 $\alpha = 1$ 时,模型退化成最小能耗问题;
- ② 当 $\alpha = 0$ 时,模型退化成最短路径的路由问题;
- ③ 当 $\alpha(0,1)$ 之间时,成为获得能耗和延迟的折中考虑.

4) 对能量模型进行扩展可作为网络延迟代价的形式化描述.在图 G 的每条链路上引入一个新的特征参数 l_e 代表链路 e 的延迟,即链路 e 所抽象的网络节点延迟.则总消耗表示为

$$Cost = \alpha \times \sum_e g(x_e) + (1 - \alpha) C(P_1, P_2, \dots, P_k).$$

式中: P_i 为给请求 i 分配的路径, $C(P_1, P_2, \dots, P_k)$ 为所有请求的路由路径的延迟代价.

根据凸组合的原理可知,延迟和能耗两个凸函数结合,其目标函数仍然是凸函数,采用求解凸规划的方法,将获得多项式复杂度时间内的最优解,在系统能耗和传输延迟之间做出权衡.

4 实验验证

4.1 仿真环境

采用网络仿真方法对以上多度量目标函数进行验证,分析网络能量效率和 QoS 性能折中与网络协议参数(如占空比、簇头数量)之间的变化关系,以确定优化设计参数 α ,为协议参数优化设计提供指导.

仿真中 MAC 协议采用 SMAC 协议^[19],它是在 IEEE802.11 MAC 协议的基础上,继续使用 CSMA/CA 原理,并采用了低占空比的周期性睡眠和唤醒模式.

路由协议则选用低能耗自适应分簇层次协议 LEACH^[20],它是 WSN 分簇路由协议的经典代表,簇头的功能主要是收集簇内信息并进行数据融合

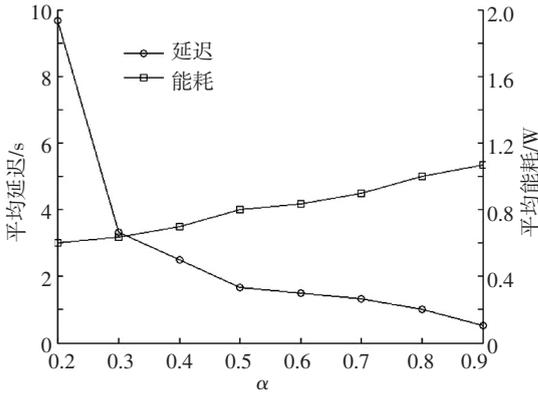
处理,减少通信量,同时采用随机选举的方式避免簇头太早耗尽能量,以延长网络生命周期。

具体仿真配置环境如下:网络仿真器: NS2.34; 相关工具: Gawk、Gnuplot-3.8j、Nam-1.11、Matlab7.8; 仿真场景为 100 m×100 m 的范围,100 个节点随机分布在该区域中,节点最大覆盖半径为 $r = 30$ m,基站坐标(0,0),初始能量 2J。

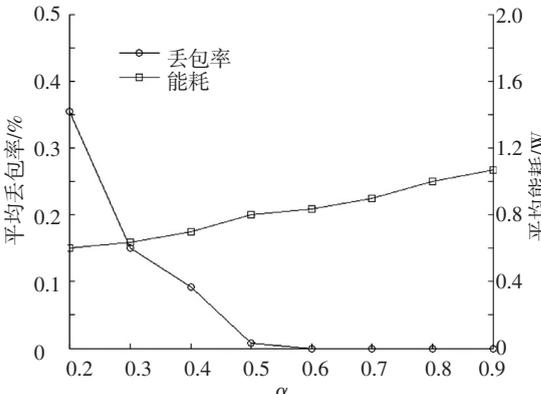
4.2 参数优化

4.2.1 占空比参数优化

从能量消耗的角度看,传感器节点的收发是能量消耗的主要部分,关闭收发机可带来能量的节省,SMAC 协议采取的周期性睡眠/活跃机制能有效提高能量效率。将节点可分为两种工作状态:睡眠状态 S(sleep)和活跃状态 A(active),节点的占空比定义为节点活跃期在一个周期内所占的比例。如图 6 所示。



(a) 延迟与能耗随参数 α 变化



(b) 丢包率与能耗随参数 α 变化

图 6 占空比参数优化情况

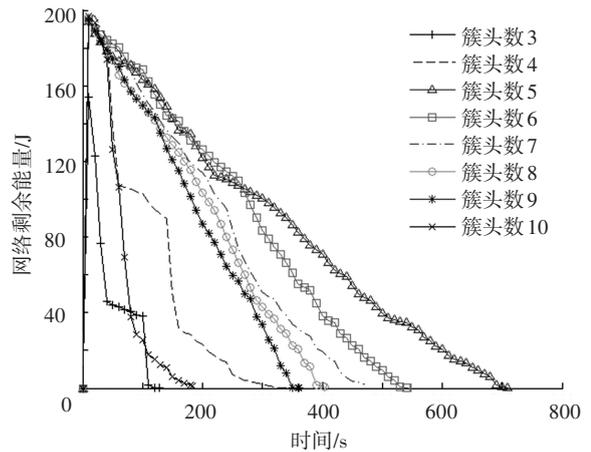
图 6(a)中可以看出,随着 α 的增大,节点睡眠时间减少,网络平均能耗增加,而数据包平均延迟则下降,即两者之间应该存在一个性能折中,因此可以对占空比进行有效的优化选择,这里当占空比 $\alpha = 0.3$ 时为最优参数设置,当 $\alpha \in [0.3, 0.7]$ 时,能够保证在较低的延迟下获得较高的能量节省。图 6(b)中可以看出,随着 α 的增大,节点的睡眠时间减少,队列缓存数据相应减少,网络平

均丢包率也降低,当占空比 $\alpha > 50\%$ 时,网络平均丢包率的性能曲线趋于 0,这里当占空比 $\alpha = 0.5$ 时为最优参数设置,当 $\alpha \in [0.5, 0.7]$ 时,能保证在较少网络丢包率下获得较多的能量节省。

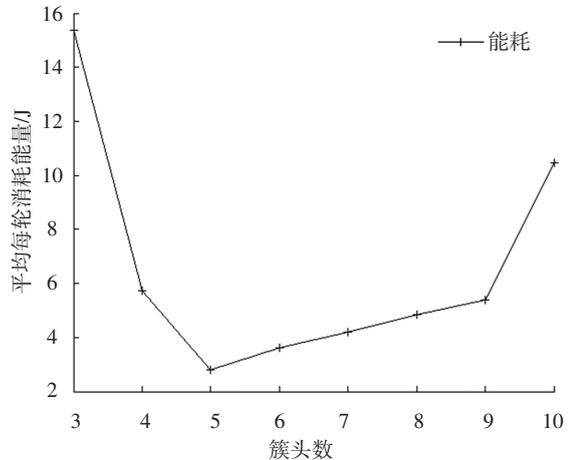
因此,可以对 WSN 能量、延迟和丢包率分配不同的权重,如能量为 0.5,延迟为 0.25,丢包率为 0.25,综合考虑能量效率和 QoS 性能折中关系,则 $\alpha = 0.4$ 为最优化量化参数。

4.2.2 簇头数量参数优化

LEACH 协议采用分簇方式,簇头数量多少将直接影响网络能量消耗和 QoS,因此,编写驱动仿真脚本,通过改变簇头节点个数并收集数据,以确定 LEACH 协议的最优簇头数。簇头参数 α 设置范围 $[3, 10]$,使用 gawk 脚本处理收集到的数据。energy、data 等文件,并用 matlab 绘制图形,如图 7 和图 8 所示。



(a) 时间-网络剩余能量



(b) 簇头数-平均每轮消耗能量

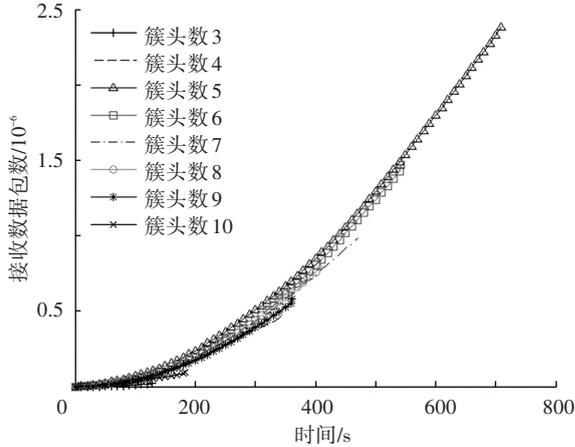
图 7 簇头数变化与能量消耗情况

图 7(a)中可以看出,随着簇头个数增多,能量消耗越来越缓慢,当簇头个数为 5 时,它的能量消耗曲线最为平缓,此后随着簇头个数增多,网络能量消耗又开始增多。图 7(b)可以明显看出,当簇头个数 $\alpha = 5$ 时,网络能耗最小,当 $\alpha \in [4, 9]$

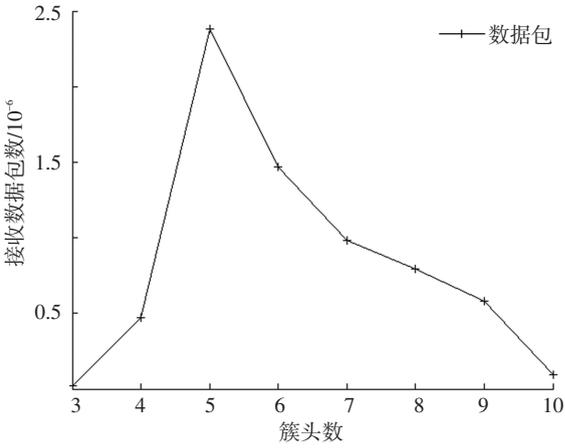
时,网络能量消耗较小。

图8反映的是 Sink 节点接收到数据包个数的情况,可以看出簇头个数 $\alpha = 5$ 时, Sink 节点接收到的数据包个数达到了最大,当 $\alpha \in [5, 7]$ 时,接收到数据包个数较多.通过对图7和图8的分析,可以得出 LEACH 协议最优簇头节点个数为 $\alpha = 5$ 时的路由效果最好,次优簇头节点个数为6。

因此,确定设计参数 α (占空比和簇头个数等),寻找能量效率与 QoS 性能折中,为选择适合的网络协议参数提供设计依据。



(a) 时间-接收数据包数



(b) 簇头数-接收数据包数

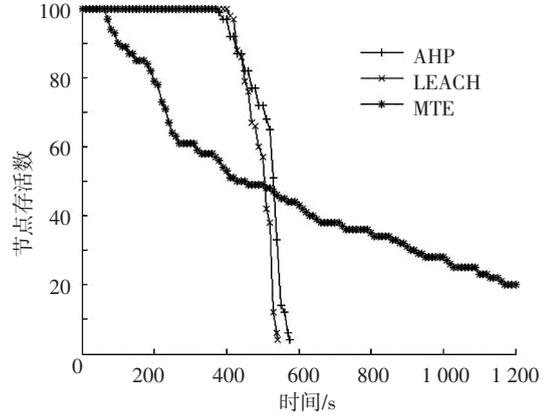
图8 簇头数变化与接收数据包情况

4.3 评估方法分析

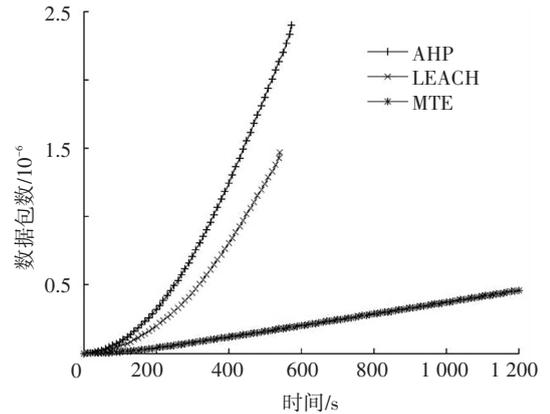
LEACH 算法的簇头选择使用概率机制,虽然其复杂性低,但缺少能效方面的考虑.在实际应用中,是否成为簇头还受到其他服务质量的要求,如:节点存活数量和网络吞吐量等,因此,簇头选择可以视为多目标优化问题。

本文 AHP 算法采用集中式簇头选择机制,利用多目标决策方法选择最佳的簇头,以剩余能量和服务质量作为主准则,根据性能指标的权重赋值计算,构建生存周期和可靠性等多属性评价方法.本实验将 AHP 的多度量目标函数应用于簇头

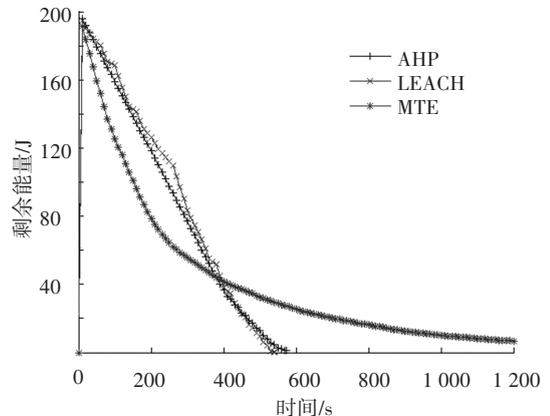
的选举过程中,簇头根据节点存活数量和网络接收数据包数自适应地进行,使簇头选择过程更加合理.通过与 LEACH 协议以及经典平面路由协议-最小传输能量 (minimum transmission energy, MTE) 的仿真对比,如图9所示,可以说明 AHP 算法在能量效率和服务质量上的优越性。



(a) 时间-网络剩余能量



(b) 时间-节点存活数



(c) 时间-汇聚节点接收数据包数

图9 AHP 和 LEACH、MTE 评价方法分析情况

图9(a)中可以看出, MTE 开始时的能量消耗比较迅速, LEACH 的能量消耗一直很稳定, 在540 s左右网络能量耗尽, 而 AHP 的能量消耗和 LEACH 协议几乎相同, 不过更加平滑一些, 说明能量消耗更加均匀, 网络能量维持到580 s. 图9(b)中可以看出, MTE 在70 s就出现了死亡节点,

LEACH 在 410 s 时出现了死亡节点,而 AHP 在将近 480 s 时候才出现了死亡节点.图 9(c)中可以看出,在 530 s 时,MTE 成功收到数据包数才接近 20 万,LEACH 成功接收到 140 万个数据包;AHP 成功接收数据包数接近 240 万,而且在同一时刻,AHP 接收包数总是比 LEACH 多.因此,从实验结果中可以看出 AHP 在能量利用率、节点存活个数和成功接收数据包数都比 LEACH 和 MTE 的表现要好,说明在能量消耗、延长网络生存时间以及数据传输可靠性等指标,AHP 都具有较好的表现.

5 结 论

1) 定义能效函数及映射关系,建立基于反馈控制的能效模型,模型以数据采集流量为自变量,以最大化网络性能和最小化网络能耗为目标,设计基于各项指标之间的关联和制衡,解决网络性能和能量效率的平衡问题.

2) 运用层次分析法构建了基于服务质量约束的能效模型评价方法,采用加权综合量化指标权重计算服务的可用性,给出了基于效用函数的优化模型并设计了一种多度量目标优化算法.

3) 通过网络仿真工具对经典 SMAC 协议和分簇 LEACH 协议进行实验分析,寻找占空比和簇头数等最优参数设置,同时与 LEACH 和 MTE 协议进行性能评估的对比,进一步证明了能效模型评价方法和量化结果的正确性.

参考文献

- [1] 罗俊,蒋铃鸽,何晨.一种多跳无线传感器网络中基于 SMAC 协议的性能分析模型[J].中国科学:信息科学,2010,40(11):1464-1472.
- [2] PANGUN P, di MARCO P, FISCHIONE C, et al. Modeling and optimization of the IEEE 802.15.4 protocol for reliable and timely communications[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(3): 550-564.
- [3] 林闯,田源,姚敏.绿色网络和绿色评价:节能机制、模型和评价[J].计算机学报,2011,34(4):593-612.
- [4] 李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2008,45(1):1-15.
- [5] di MARCO P, PANGUN P, FISCHIONE C, et al. Analytical modeling of multi-hop IEEE 802.15.4 networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 3191-3208.
- [6] 宋杰,李甜甜,闫振兴,等.一种云计算环境下的能效模型和度量方法[J].软件学报,2012,23(2):200-214.
- [7] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717-1727.
- [8] 刘星成,袁东升,梁平元,等.基于代价函数的 WSN 能效路由协议性能分析[J].通信学报,2011,32(6):132-140.
- [9] 俞靓,王志波,骆吉安,等.面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 指标体系设计[J].计算机学报,2009,32(3):441-462.
- [10] 顾军,罗军舟,曹玖新,等.基于排队 Petri 网的服务系统性能建模与分析方法[J].计算机学报,2011,34(12):2435-2455.
- [11] 王文彬,孙其博,杨放春. MANET 下环境感知的服务可用性量化评估模型[J].计算机研究与发展,2012,49(3):558-564.
- [12] 林闯,胡杰,孔祥震.用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述[J].计算机学报,2012,35(1):1-15.
- [13] 林闯,李寅,万剑雄.计算机网络服务质量优化方法研究综述[J].计算机学报,2011,34(1):1-14.
- [14] CHENG Xiuzhen, NARAHARI B, SIMHA R, et al. Strong minimum energy topology in wireless sensor networks: NP-completeness and heuristics[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003,2(3):248-256.
- [15] CHIPARA O, LU Chenyang, STANKOVIC J. Dynamic conflict-free query scheduling for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'06). Santa Barbara, California: IEEE Computer Society, 2006: 321-331.
- [16] 张法,ANTA A F,王林,等.网络能耗系统模型及能效算法[J].计算机学报,2012,35(3):603-615.
- [17] WANG Tao, WU Zhiming, MAO Jianlin. A new method for multi-objective TDMA scheduling in wireless sensor networks using Pareto based PSO and fuzzy comprehensive judgement[C]//Proceedings of the Third International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC'07). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 144-155.
- [18] 王绍青,聂景楠.一种无线传感器网络性能评估及优化方法[J].电子学报,2010,38(4):882-886.
- [19] YE Wei, HEINEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506.
- [20] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions On Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.