

物联网即加即用及其智能配置技术研究

方 远^{1,2}, 刘 强¹, 赵 泽¹, 崔 莉¹

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 随着应用领域的不断拓展, 物联网面临着网络规模巨大、感知节点多样、通信协议繁杂及资源管理困难等挑战. 针对上述挑战, 本文提出了物联网即加即用(plus and play)技术, 可以完成物联网服务发现、智能配置、服务映射等功能; 具有支持异构网络通信、动态网络扩展、协同信息处理等特点. 在此基础上, 为实现即加即用的关键功能智能配置, 本文提出了一种模糊自适应配置方法 EasiFLC(Easinet Fuzzy Logic Control). 通过真实场景的实验表明, EasiFLC 在应用层需求、无线通信环境、感知层拓扑结构变化时, 通过动态调整网络参数以最小代价保证服务质量, 并具有较好的网络环境适应性和鲁棒性.

关键词: 物联网; 即加即用; 网关; 智能配置; 模糊控制

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 09-1744-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.012

The Research of Plus and Play and Its Intelligent Configuration for IoT

FANG Yuan^{1,2}, LIU Qiang¹, ZHAO Ze¹, CUI Li¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: IoT(Internet of Things) systems are facing more and more challenges, such as increasing network size, diversities of sensors, complexities of protocols and difficulties of management with expansions of its applications. So, we proposed a novel technique of plus and play which provides functions of service discovery, intelligent configuration and service mapping. Beside, we designed a fuzzy adaptive configuration method, named as EasiFLC. Experimental results show that when application's requirements, topologies of sensing layers or wireless channel conditions change, EasiFLC adjusts network parameters dynamically, thus it ensures quality of services with lowest cost, and achieves good environmental adaptability, strong robustness.

Key words: internet of things; plus and play; gateway; intelligent configuration; fuzzy control

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)作为网络技术的一个重要方向, 人们已经进行了多方面的深入研究^[1,2], 并且成功应用到环境测量、定位跟踪等多个领域^[3]. 在近年来兴起的物联网^[4,5]、信息物理融合系统等信息系统技术中, WSN 随着这些系统的广泛应用而大量部署. 然而, 上述系统存在如下问题: 系统如何处理各类感知设备动态加入和离开, 并屏蔽底层繁杂的通信协议而提供统一服务; 如何解决新的应用需求加入时感知资源复用问题; 当设备加入和移出、应用需求增加和删减、外界因素介入时, 如何保证系统稳定. 为探索解决上述各层面问题的有效途径, 物联网即加即用技

术应运而生.

即加即用从即插即用(plug and play)发展而来. 起初, 即插即用是一种支持热插拔的计算机硬件配置技术, 之后, 即插即用进一步扩展, 在互联网领域, 形成了以通用即插即用(Universal Plug and Play, UPnP^[6])、Windows Rally^[7]、Jini^[8]等为代表的技术, 这些技术在解决网络设备间的互联互通问题上发挥了巨大作用; 在硬件设备制造领域, 形成了以 IEEE1451^[9]协议族为代表的现场总线标准, 该标准通过一套标准的通信接口解决了各种现场总线规定的通信协议不兼容问题.

上述技术标准在解决不同类型设备间通信、网络动态扩展、远程控制、接口标准化等方面各具优势. 但应用到物联网感知层的 WSN 时, 没有考虑感知节点的存储

资源、计算能力有限及多节点组网等特性,这在一定程度上制约了上述技术标准在物联网的广泛应用。

针对上述问题的某一层面,在屏蔽底层协议和服务发现层面,文献[10]进行了综述分析,介绍了服务发现过程中服务请求者和提供者之间的交互模型。文献[11]设计了一种支持即加即用的网关及感知数据传输协议,文献[12]提出了三种网关发现的方法并通过 ns-2 仿真评估了其性能,文献[13]设计和实现一种在异构网络中的服务发现的机制。在通过网络配置保证系统稳定性层面,文献[14]设计了一种无须人工干预实现 WSN 实时监测和自动配置的系统。文献[15]设计了一个面向服务的三层物联网体系结构,用户可以使用统一的命令对不同类型的节点灵活方便地控制。文献[16]在感知节点上提出了一种 ISNN 体系结构,实现了 UPnP 控制点与传感器网络节点之间的交互。

本文针对即插即用在物联网应用的制约及系统解决上述各层面问题展开研究,贡献点如下:

(1)提出了物联网即加即用技术并抽象其功能为服务发现、服务映射、智能配置。提出了应用系统、网关、节点和终端的设计框架。

(2)针对智能配置,提出了一种模糊自适应配置方法 EasiFLC,用于在应用需求或通信环境变化时保证服务质量和系统稳定。

(3)针对一个实时性要求较高的场景给出了 Easi-FLC 的实现,实验验证了 EasiFLC 的突出特点。

2 物联网即加即用技术

前言所述问题前两个层面即为物联网应用系统“即加”的情形,主要指系统会因各种原因随时加入某些改变系统工作状态的因素,而“即用”则体现了系统在“即加”情形时能通过调整即时保证系统功用。

综上所述,物联网即加即用(plus and play)定义为一种在感知设备动态加入和移出,应用需求随时增加和删减或外界因素介入时,系统能动态地进行适应性调整使其稳定,以保证高服务质量、低服务代价的技术。

2.1 物联网即加即用功能抽象

由上述定义可知,物联网即加即用具有如下主要功能:网关实时处理感知设备加入和离开、网络资源动态申请及释放,并将感知数据封装成面向应用的多样服务,此过程抽象为服务发现;网关将控制终端(如移动手持设备)不同的请求映射成不同的服务,并实时响应灵活多变的请求订阅,此过程抽象为服务映射。网关识别服务发现、服务映射、感知网络环境变化等导致的系统状态变化并作适应性调整达到全网最优,此过程抽象为智能配置。图 1 描述了服务发现、服务映射、智能配置功能流程。

服务发现。如图 1 中①所示,当感知设备加入网络时,该设备向网关发送消息告知它的设备属性和提供的感知资源,网关首先将设备信息存入相应的设备描述表和资源描述表,其次将若干感知资源封装成某一具体服务,并将服务标号、服务实现、服务质量、获取服务条件等存入服务描述表,最后将能提供的新服务广播给网络上其他控制终端,如手机、PAD 等,感知设备离开网络的情形与上述类似,网关同样需要实时维护设备描述表,资源描述表,服务描述表等。

服务映射。服务发现主要针对感知设备的加入和移出,而服务映射主要面向控制终端请求的增添和删减,如图 1 中②所示,控制终端能向感兴趣的服务或设备发起订阅请求,网关的请求订阅层记录并处理该请求,当服务或设备的状态码发生改变时,网关向控制终端发送相应的事件通告从而实现了网关对控制终端灵活多变请求的响应。

智能配置。服务发现、服务映射主要从服务应用层角度出发,而智能配置则保证服务的稳定性,如图 1 中③所示,它包括:网关对完成服务发现的感知设备进行初始配置使其正常工作;网关实现对感知设备在不同 PAN 移动时的跟踪管理从而为应用层提供连续可靠服务;网关推断是否出现软硬件异常并选择合适方式克服故障;网关评估无线通信环境质量并调整网络运行参数以稳定满足应用需求等。

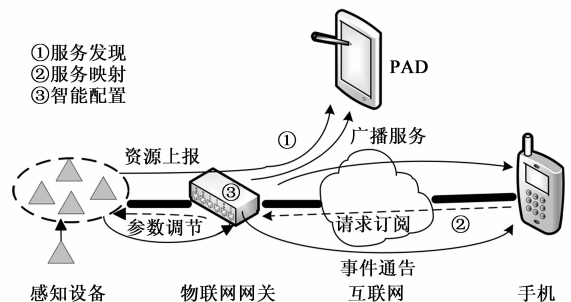


图1 物联网即加即用功能抽象图

由上述物联网即加即用定义与功能描述可见,其具有如下特点:即加即用屏蔽了网络底层协议细节,实现了设备间的简易连接和通信标准化,支持异构网络通信;即加即用允许不同类型的感知网络动态地加入应用系统,并通过与云计算、网络资源虚拟化等技术集成,支持网络动态扩展;即加即用根据网络状态变化调整感知层参数,协调多个节点完成复杂感知任务从而提供稳定可靠的网络服务,支持协同信息处理。

2.2 物联网即加即用框架

为实现前述服务发现、服务映射、智能配置,并提供物联网即加即用应用系统通用模型,提出了应用系统、网关、节点、控制终端等设计框架,如图 2 所示。

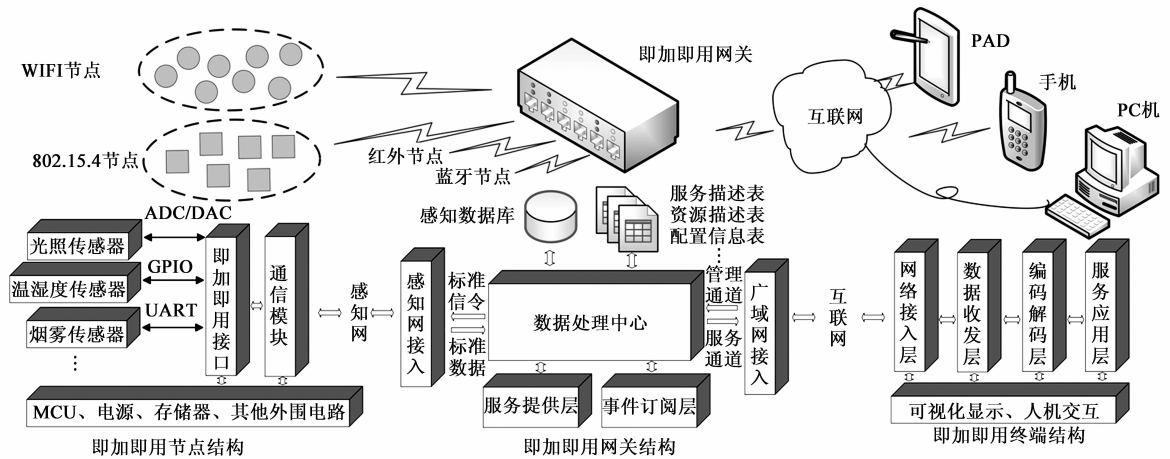


图2 物联网即加即用系统框架

即加即用网关除具有感知网络与互联网、感知网络间数据转换及感知设备管理等功能外,还支持异构感知设备加入即能使用,当一个新的任意类型的感知设备加入网络后,网关为该设备分配唯一的标识符,并且将其资源拥有情况、服务提供能力记录到资源描述表和服务描述表,以便数据处理中心通过服务提供层向应用层灵活地提供多样服务,同时网关根据网络动态状况配置感知网相关参数,以充分利用感知资源及全面优化网络性能。

即加即用节点用于实现传感器的灵活使用,传感器接口形式从早期模拟接口(如电压、电流)发展到简单数字接口(如 RS232、SPI),再到目前广泛使用的现场总线接口(如 CAN、Profibus),即加即用接口将传感器接口标准化,以实现接口复用,并降低硬件设计、驱动开发成本。

即加即用终端用于实现服务的增添和删减,控制终端通过可视化界面与感知网物理节点或网关虚拟设备进行交互,获取设备和服务的状态或向感兴趣的服务或设备发起订阅请求等。

3 物联网即加即用智能配置技术

3.1 EasiFLC 智能配置原理

由上节对物联网即加即用讨论可知,服务发现主要在节点和网关间完成,包括设计节点传感器即加即用接口、软件灵活配置框架及节点与网关服务发现协议,而服务映射主要在网关和终端间完成,包括终端结构和网关与终端服务映射协议,由此可见,服务发现、服务映射主要从服务应用层角度出发,而如何保证服务质量和系统稳定,智能配置则起关键性作用,因此,智能配置是物联网即加即用技术的基础和关键。

目前,不同物联网应用场景应用需求不同,如环境监测要求较长网络寿命;WSAN 要求较高实时性;数据收集要求较好的连通度等,上述场景配置方法一般只

适用于该特定场景,因此亟需提出针对不同应用场景配置问题的通用模型。

另外,传统的物联网配置方法和控制器的设计大都建立在对被控对象准确控制的数学模型的基础上,但由于物联网感知层的低发射功率、多跳传输等特点,系统的网络传输环境很难用一个确定的系统函数表示,故很难为其建立准确的数学模型,这就使得整个配置过程存在非线性、模糊性等特点。

而模糊控制系统^[17]是一种以模糊数学、模糊语言的知识表示和模糊逻辑推理为理论基础,采用计算机控制技术构成的能模仿人思维方法的闭环数字控制系统。模糊控制由于其通用性、智能性、自适应、鲁棒性等特点使得其在 WSN 中被广泛应用,如事件检测^[18]、定位^[19]、服务质量保障^[20]等。

因此 EasiFLC 配置方法以模糊控制系统为基础,配置框架如图 3 所示,其中网关数据处理中心与图 2 中标识一致。与图 3 相关的符号定义如表 1 所示。

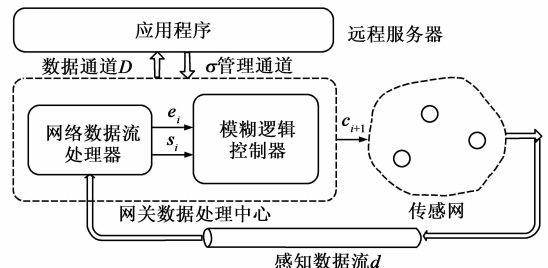


图3 EasiFLC配置方法原理图

表 1 EasiFLC 配置方法符号定义

D	应用层数据流	$A \sim Z$	传感器网络属性集合
d	感知数据流	s_i	传感器网络 i 时段属性
σ	应用层需求指标	E_i	e_i 模糊化后变量
σ_i	i 时段实测指标	S_i	s_i 模糊化后变量
e_i	σ_i 减去 σ	c_{i+1}	$i+1$ 时段配置参数

传感器网络主要功能是感知物理环境,同时由于

传感器网络通信环境的不确定性,传感器网络给网关提供感知数据流同时捎带发送通信环境参数,另外,感知节点软件结构支持网关对其可重配置。

网络数据流处理器分析处理 d ,通过数据通道向应用程序提供 D ,同时向模糊逻辑控制器输出 s_i (i 时段的通信环境参数及感知网网络特性,如通信协议、网络规模、能量消耗、拓扑结构等)及 e_i (实测性能指标与应用层需求指标的偏差)。它通过系统运行参数的动态精确识别得出导致系统状态变化的因素,并科学选取 s_i 为模糊控制器智能决策提供准确可靠的信息。

模糊逻辑控制器对输入的 s_i 、 e_i 模糊化得 S_i 、 E_i ,将 S_i 、 E_i 作为学习到的新经验加入规则库,经过模糊推理、清晰化给出传感器网络下一个时段的 c_{i+1} 、 c_{i+1} 设计原则为首先满足应用层需求指标 σ ,其次尽量提高网络的资源利用率和减少网络开销。模糊逻辑控制器根据网络运行情况制定最优配置策略,尽力保证整个配置过程快速、精确、稳定、节能,其结构如图 4 所示。

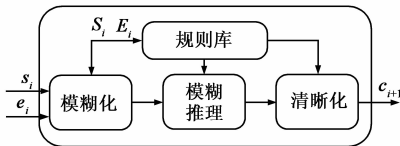


图4 模糊逻辑控制器内部结构

应用程序对网关提供的数据 D 进行分析处理,同时能根据场景变化通过管理通道向传感器网络随时提出新的需求,图 3 中数据通道和管理通道完成网关与终端的服务映射。

EasiFFC 配置方法工作流程如表 2 所示。

表 2 EasiFFC 配置方法工作流程

The Procedure of EasiFLC	
S1	Collect data d of WSN
S2	Analyze data d and compute e_i, s_i
S3	Send data D to application layer
S4	Fuzzify e_i, s_i to E_i, S_i
S5	Store E_i, S_i in to Rule Base
S6	If S_i equals $A \dots\dots$
	Else if S_i equals G (G is only an example)
	If $E_i \gg 0$
	Then c_{i+1} to reduce costs of WSN with more degree
	Else if $E_i > 0$ Then c_{i+1} to reduce costs of WSN
	Else if $E_i = 0$
	Then $c_{i+1} = c_i$ to maintain the last status
	Else if $E_i < 0$
	Then c_{i+1} to satisfy the demand of application layer
	Else if $E_i \ll 0$
	Then c_{i+1} to satisfy the application with more degree

Else S_i equals $Q \dots\dots$

S7 Defuzzify c_{i+1} then send to WSN

S8 Wait a period of time then goto S1

3.2 EasiFLC 智能配置实现

3.2.1 场景概述

在某些实时性较高的场景(如火灾监测、安防监控等),应用层需要在 $t \leq T$ 时间内完成对感知数据的分析处理以便采取相应的措施,当 $t > T$ 时丢失的数据可能会造成应用层的重大损失,因此需要网关在系统状态发生变化时仍能以稳定的概率 p 向应用层提供满足实时性要求的数据流, p 越大,实时性越强。以火灾监测为例,假设监测区域内节点数目为 n ,应用层要求感知网以概率 p 提供不大于 T 时间间隔的数据流。

将表 1 中符号具体化,应用层需求指标 $\sigma(T, p_0, P_0)$:首先满足采样间隔 $t \leq T$ 的时间百分比不小于 p_0 ,其次使得感知节点满足采样间隔要求时间内的平均功率 P 趋近最小功率 P_0 ; i 时段实测指标 $\sigma_i(p_i, P_i)$: p_i 为实测采样间隔满足 $t \leq T$ 的时间百分比, P_i 为感知节点满足采样间隔要求时间内的平均功率;网络属性 s_i : i 时段通信环境状况;配置参数 c_{i+1} : $i+1$ 时段感知节点采样间隔调节参数 $t_{i+1}(t_{\text{sleep}}, \tau_{i+1}, k_{\text{max}i+1})$ 。

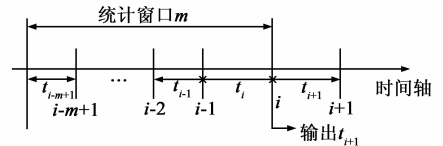


图5 应用场景工作示意图

如图 5,当网关在 i 时刻收到某节点实测采样间隔为 t_i 数据包时,首先网络数据流处理器统计分析得出 $e_{i1} = \sigma_i(p_i) - \sigma(p_0)$ 、 $e_{i2} = \sigma_i(P_i) - \sigma(P_0)$ 和 s_i ,其中 $\sigma(p_0)$ 、 $\sigma(P_0)$ 随应用层需求而变化, $\sigma_i(p_i)$ 、 $\sigma_i(P_i)$ 随实际环境变化,然后模糊逻辑控制器对输入 $e_i(e_{i1}, e_{i2})$ 、 s_i 模糊化,通过模糊推理、清晰化输出该节点下一个采样间隔调节参数 $t_{i+1}(t_{\text{sleep}}, \tau_{i+1}, k_{\text{max}i+1})$ 。

3.2.2 网络数据流处理器

下面讨论上述参数的选取和计算方法。

(1) p_0 、 p_i 计算方法

p_0 一般由应用层给出,例如可取(90% 或者 95%),而实际测量指标 p_i 则可由式(1)计算所得:

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=i-m+1}^i t_j (t_j \leq T)}{\sum_{j=i-m+1}^i t_j} \quad (1)$$

(2) P_0 、 P_i 计算方法

假设 $k_j(i-m+1 \leq j \leq i)$ 为 j 时刻感知节点将数据

包成功交付给网关实际所用的重传次数. 感知节点工作电压为 V , 休眠电流为 I_{sleep} , t_i 时间内感知节点每次数据重传的时间间隔 τ_i , 第 l ($0 \leq l \leq k_i$) 次数据重传射频工作电流为 I_0 , 工作时间为 τ_{0l} . 因为感知节点采集数据时传感器工作电流、时间不随环境变化, 且相对于射频工作能耗很小, 为了便于研究, 在此忽略不计. 感知节点在整个采样周期工作过程如图 6 所示.

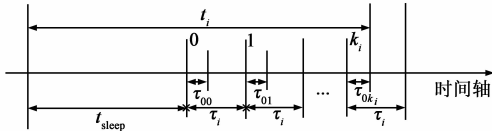


图6 感知节点采样周期工作示意图

P_0 为在满足 $\sigma(p_0)$ 要求的前提下, 感知节点满足采样间隔要求时间段内的平均功率的能达到最小值. 假设 E 为感知节点满足采样间隔要求时间段内感知节点消耗的能量, 则 P_i 、 P_0 计算如式(3)所示.

$$E = \sum_{j=i-m+1}^i \left(\sum_{l=0}^{k_j} \tau_{0l} * I_0 * V + \right. \quad (2)$$

$$\left. (t_j - \sum_{l=0}^{k_j} \tau_{0l}) * I_{\text{sleep}} * V \right) (t_j \leq T)$$

$$P_i = \frac{E}{\sum_{j=i-m+1}^i t_j (t_j \leq T)}, P_0 = \frac{E}{\sum_{j=i-m+1}^i T (t_j \leq T)} \quad (3)$$

根据式(3), 当 t_{sleep} 增大、 t_j ($t_j \leq T$) 趋近 T 时, P_i 减小趋近 P_0 .

(3) s_i 的参数选取及计算方法

通信环境评估 s_i 包括统计窗口 m (m 与 s_i 波动大小成正比) 内的如下参数: 数据包接收率 PRR, 数据包成功交付的平均重传次数 μ_k , 重传时间间隔平均值 μ_τ , 射频工作时间最大值 MAX_{τ_0} , 重传次数的最大值 MAX_k , 链路质量 LQI 均值 μ_{LQI} 及方差 D_{LQI} , 接收信号强度 RSSI 均值 μ_{RSSI} 及方差 D_{RSSI} .

$$\text{PRR}_i = \frac{n * m}{\sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i k_{lj}}$$

$$\mu_k = \frac{1}{n * m} \sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i k_{lj}, \mu_\tau = \frac{\sum_{j=i-m+1}^i k_j * \tau_j}{\sum_{j=i-m+1}^i k_j} \quad (4)$$

$$\text{MAX}_{\tau_0} = \max \{ \max \{ \tau_{0l} \} (0 \leq l \leq k_j) \}, i - m + 1 \leq j \leq i \quad (5)$$

$$\text{MAX}_k = \max \{ k_j \}, i - m + 1 \leq j \leq i \quad (6)$$

$$\mu_{\text{LQI}} = \frac{1}{n * m} \sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i \text{LQI}_{lj} \quad (7)$$

$$D_{\text{LQI}} = \frac{1}{n * m} \sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i (\text{LQI}_{lj} - \mu_{\text{LQI}})^2$$

$$\mu_{\text{RSSI}} = \frac{1}{n * m} \sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i \text{RSSI}_{lj} \quad (8)$$

$$D_{\text{RSSI}} = \frac{1}{n * m} \sum_{l=1}^n \sum_{j=i-m+1}^i (\text{RSSI}_{lj} - \mu_{\text{RSSI}})^2$$

3.2.3 模糊逻辑控制器

(1) 模糊化

e_i (e_{i1}, e_{i2}) 模糊化即是对 σ_i 与 σ 偏离程度的自然语言形式表示, 将偏差 e_i 归一化, 确定偏差 ε_i 的语言变量为 NB(负大)、NS(负小)、O(零)、PS(小)、PB(正大), 如表 3 所示.

表 3 应用需求指标与实测指标偏差模糊化

NB	NS	O	PS	PB
$P_i \ll P_0$	$P_i < P_0$	$P_i \geq P_0$	$P_i \geq P_0$	$P_i \geq P_0$
$P_i \geq P_0$	$P_i \geq P_0$	$P_i = P_0$	$P_i > P_0$	$P_i \gg P_0$

通信环境评估 s_i 模糊化即为用自然语言表征该物理环境下的传感器网络通信质量的好坏情况. 确定工作环境的语言变量如下: G(好)环境, 传感器网络的理想环境, 此时工作环境稳定, 几乎没有噪声干扰、电磁干扰; M(中)环境, 传感器网络工作环境中物体的移动、遮挡等造成的电磁波多径效应、阴影效应或因为背景噪声等使得通信信噪比不高, 但传感器网络通信信道空闲; B(差)环境, 存在电磁干扰, 由于感知网络规模过大或其他无线网络设备使用了与感知网络相同频段使得通信信道竞争激烈, 冲突严重; VB(很差)环境, 相对于 B 环境电磁干扰更加严重. 由于感知层的通信环境复杂多变, 单个测量参数随机性较大, 不同环境界限模糊, 因此需使用多个测量参数综合推断属于上述某一环境的概率, s_i 通过对大量测量参数分类统计、预测识别确定上述环境的隶属度函数, 相关实验见 4.2 节.

(2) 模糊推理

模糊推理是模糊控制的核心部分, 模糊推理依赖规则库, EasiFLC 将网络数据流处理器统计分析的经验知识加入模糊控制器的规则库中, 为模糊推理提供经验规则.

模糊推理输入为 S_i 、 E_i , 输出为采样间隔调节参数 t_{i+1} 、 t_{i+1} ($t_{\text{sleep}}, \tau_{i+1}, k_{\text{max}i+1}$) 为感知节点下一个采样周期的工作参数, t_{sleep} 为休眠时间, τ_{i+1} 为重传时间间隔, $k_{\text{max}i+1}$ 为允许的最大重传次数, 上述参数满足式(9).

$$T = t_{\text{sleep}} + k_{\text{max}i+1} * \tau_{i+1} \quad (9)$$

感知节点在 i 时刻收到网关发送的 t_{i+1} 后立即调整工作参数, 调整后的感知节点经过休眠时间 t_{sleep} 后开始数据采集及发送(如图 6), 若其在之后的 τ_{i+1} 时间内收到网关 ACK(含节点下一个采样周期的配置参数), 则此次采样周期结束, 若其未收到网关 ACK, 且重传次数未超过 $k_{\text{max}i+1}$, 则重传数据包, 直到其收到网关 ACK 或者重传次数超过 $k_{\text{max}i+1}$ 为止此次采样周期才结束, 感知节点此次采

样周期完毕后立即进入下一个周期的休眠时段。

由上述可知,在某网络通信环境下,感知节点的采样间隔完全由参数 $t_{\text{sleep}}、k_{\text{maxi}+1}、\tau_{i+1}$ 确定,而对于网关处实测的感知节点采样间隔 t_i ,若 $t_i > T$ 的采样间隔过多, $\sigma(p_0)$ 要求的实时性无法保证,若 $t_i \leq T$ 的采样间隔过多,没有尽可能满足 $\sigma(P_0)$ 的最小代价要求,因此参数 $t_{\text{sleep}}、k_{\text{maxi}+1}、\tau_{i+1}$ 对能否满足应用需求起决定作用,故对其自适应调节至关重要。下面分析调节 $k_{\text{maxi}+1}、\tau_{i+1}$ 对 $\sigma(p_0)、\sigma(P_0)$ 的影响。

若 $k_{\text{maxi}+1} \gg k_j$ (k_j 定义见 3.2.2 节),虽能保证感知节点将数据包实时交付给网关,但使得 t_{sleep} 偏小(见式(9)),由于 $t_j = t_{\text{sleep}} + k_j * \tau_j$ ($t_j \leq T$) (见图 6),所以导致 $t_j \ll T$,故采样频率过高,造成信息冗余,能量浪费;若 $k_{\text{maxi}+1} < k_j$,则 $t_i > T$,造成数据包丢失,实时性无法保证,因此网关需为感知节点选择合适 $k_{\text{maxi}+1}$ 。

若 $\tau_{i+1} \geq \tau_0$,感知节点有充足时间在设定的时间内收到网关 ACK,若 $\tau_{i+1} < \tau_0$,则产生不必要的重传,如图 7 所示。

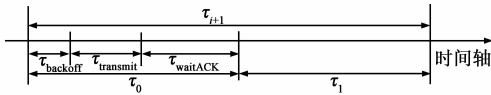


图7 射频发送数据过程示意图

图 7 中 τ_0 时段消耗电流为 I_0 , τ_1 时段(射频关闭)消耗电流为 I_{sleep} , $I_0 \gg I_{\text{sleep}}$ 。因为射频竞争信道退避时间 τ_{backoff} 、数据包传播时延和网关处理数据总时间 τ_{waitACK} 与通信环境有关, τ_{transmit} 与数据包长度有关,故调节 τ_{i+1} 一方面为了保证 $\tau_{i+1} \geq \tau_0$,避免不必要重传开销,另一方面为感知节点选择最佳的重传时机和等待间隔 τ_1 ,避免电磁干扰,提高数据包实时交付的概率。

总之,调节 $\tau_{i+1}、k_{\text{maxi}+1}$ 的目的是既能满足数据包的实时可靠交付,又能降低节点能耗。

(3)清晰化

EasiFLC 配置方法将应用系统状态用二元组 (X, Y) 表示, $X \in \{G, M, B, VB\}$, $Y \in \{NB, NS, O, PS, PB\}$ 。实际系统应用需求、通信环境等变化时会导致 (X, Y) 发生状态迁移,从而使得 $Y \neq O$ (系统不稳定),此时 EasiFLC 根据实际情况自动调节至 $Y = O$ (稳定状态)。

对于应用层需求指标 σ , EasiFLC 调节原则为首先满足 $\sigma(p_0)$,即火灾监测场景的实时性要求,其次满足 $\sigma(P_0)$,即尽量减小能耗,调节时状态转换如图 8 所示。

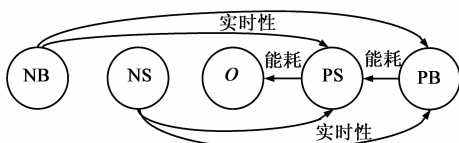


图8 EasiFLC调节原则

下面讨论当应用系统状态 (X, Y) 不稳定时配置参数 t_{i+1} 的清晰化方案。

$Y = (PB \text{ 或 } PS)$:当通信环境按 $VB \rightarrow B \rightarrow M \rightarrow G$ 方向变化或者应用层需求 T 增大、 p_0 减小时,产生此状态。此时 $\sigma(p_0)$ 已经满足,调节参数 t_{i+1} 目的为节省能耗,当 $X = G、M$ 时,在保证 $\sigma(p_0)$ 前提下, $k_{\text{maxi}+1}、\tau_{i+1}$ 尽量减小, t_{sleep} 尽量增大,此时 t_{i+1} 清晰化方案如表 4:

表 4 满足 $\sigma(P_0)$ 清晰化方案

	PS	PB
G	$k_{\text{maxi}+1} = \text{ceil}(\mu_k)$ $\tau_{i+1} = \mu_\tau - 0.05 * \text{MAX}_{\tau_0}$ 注: $1.5 * \text{MAX}_{\tau_0} \leq \mu_\tau \leq 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$	$k_{\text{maxi}+1} = \text{ceil}(\mu_k)$ $\tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + 0.5 * (\mu_\tau - \text{MAX}_{\tau_0})$ 注: $\mu_\tau \geq 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$
M	$k_{\text{maxi}+1} = \text{ceil}[\mu_k + 0.5(k_{\text{maxi}} - \mu_k)]$ $\tau_{i+1} = \mu_\tau - 0.05 * \text{MAX}_{\tau_0}$ 注: $1.5 * \text{MAX}_{\tau_0} \leq \mu_\tau \leq 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$	$k_{\text{maxi}+1} = \text{ceil}[\mu_k + 0.5(k_{\text{maxi}} - \mu_k)]$ $\tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + 0.5 * (\mu_\tau - \text{MAX}_{\tau_0})$ 注: $\mu_\tau \geq 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$
B	$k_{\text{maxi}+1} = \text{MAX}_k, \tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + \text{random}[\text{MAX}_{\tau_0}, 2 * \text{MAX}_{\tau_0}]$	
VB	$k_{\text{maxi}+1} = \text{MAX}_k, \tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + \text{random}[\text{MAX}_{\tau_0}, k * \text{MAX}_{\tau_0}], k \geq 2$	

$Y = (NB \text{ 或 } NS)$:当通信环境按 $G \rightarrow M \rightarrow B \rightarrow VB$ 方向变化或者应用层需求 T 减小、 p_0 增大时,产生此状态。此时增大 $k_{\text{maxi}+1}、\tau_{i+1}$ 优先满足 $\sigma(p_0)$, M 环境没有受到电磁干扰,传感器网络通信环境比较稳定,因此可以假定每个数据包被网关成功接收的概率基本相同,故 $\text{PRR}_{i+1} = \text{PRR}_i$,所以优先调节 $k_{\text{maxi}+1}$ 。 $B、VB$ 环境 PRR_i 波动非常剧烈且无规律,若无限提高 $k_{\text{maxi}+1}$ 会导致大量数据包涌入网络,信道竞争更加激烈,甚至感知网与干扰源相互影响,使得无线信道通信质量不可预测,因此在保证 $k_{\text{maxi}+1}$ 下,增大且随机选择节点 τ_{i+1} ,在一定程度上避免电磁干扰,此时 t_{i+1} 清晰化方案如表 5。

表 5 满足 $\sigma(p_0)$ 清晰化方案

	NB	NS
G	$k_{\text{maxi}+1} = \text{ceil}(\mu_k), \tau_{i+1} = 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$	
M	$k_{\text{maxi}+1} = 1.5 * \text{MAX}_k$ $\tau_{i+1} = 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$	$k_{\text{maxi}+1} = \text{MAX}_k$ $\tau_{i+1} = 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$
B	$k_{\text{maxi}+1} = 2 * \text{MAX}_k, \tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + \text{random}[\text{MAX}_{\tau_0}, 2 * \text{MAX}_{\tau_0}]$	
VB	$k_{\text{maxi}+1} = 2 * \text{MAX}_k, \tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + \text{random}[\text{MAX}_{\tau_0}, k * \text{MAX}_{\tau_0}], k \geq 2$	

3.2.4 应用层序接口

EasiFLC 设计了即加即用网关与远程服务器之间通信机制及数据交换的协议格式(见图 3),不论是上行的数据包还是下行的命令包都被抽象为统一的数据格式,如表 6 所示。

3.3 EasiFLC 智能配置分析

通用性:虽 3.2 节通过真实场景讨论了 EasiFLC 的实现,但 3.2 节所述场景仅为 3.1 节论述的 EasiFLC 配

置框架的具体实例,可见 EasiFCLC 配置技术不局限于具体的应用场景,它为物联网即加即用智能配置提供了一个通用模型.

表 6 网关与远程服务器统一数据包格式

格式	ID	TYPE	SEQ	LEN	RESERVED	PAYLOAD
	2 字节	2 字节	2 字节	2 字节	8 字节	长度可变
	设备 ID	类型	序列号	长度	保留	命令/数据

动态适应性: EasiFCLC 定义的系统状态 (X, Y) 在应用需求变化或通信环境变化具有封闭性. 图 9(a)、9(b) 分别为应用需求变化、通信环境变化时 (X, Y) 变化方向,由此可见,总能通过图 8 调节原则将应用系统调至稳定状态.

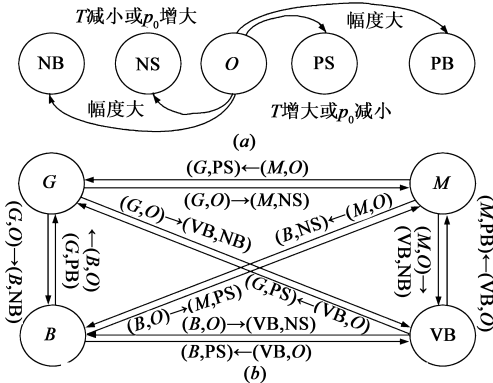


图 9 EasiFCLC 随系统状态变化迁移图

鲁棒性: EasiFCLC 采用的模糊控制方法模仿了人工智能的工作过程,克服了控制过程中非线性、强耦合、时变等特性造成的没有统一数学模型的问题,使得配置过程能应对突发情况,具有较强鲁棒性.

异构网络兼容性: 3.2.4 节所述的通信方式使网关与远程服务器间通信格式标准化,屏蔽了底层通信协议的实

现细节,实现了异构设备的简易连接和兼容通信.

4 实验验证

4.1 实验场景

EZ6410 网关以 ARM11 芯片(S3C6410)为处理器,主频 533MHz,内存 256MB,其计算能力和存储资源足够满足 EasiFCLC 算法运行,实验场景如图 10 所示.

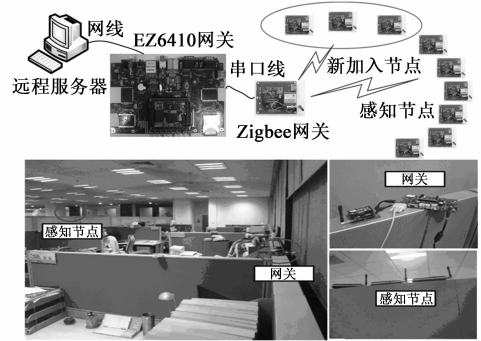


图 10 实验场景图

4.2 通信环境参数识别验证

图 11 中(a)、(b)、(c)分别为使用 s_i 参数对 G、M、B 环境识别结果,在图 10 实验大厅中,深夜为 G 环境,白天存在移动物体干扰为 M 环境,人工加入关闭 CS-MA/CA 的节点模拟电磁干扰为 B 环境. 实验发现, PRR、 μ_{RSSI} 、 μ_{LQI} 及其波动情况存在统计相关,在 G、M 环境波动较平稳,而在 B 环境由于前 2000s 存在电磁干扰波动剧烈,且解除干扰后, PRR、 μ_{RSSI} 、 μ_{LQI} 迅速回升至 M 环境水平. 可见使用 s_i 选取的若干无线环境评估参数能识别通信链路质量的变化, EasiFCLC 在对 PRR、 μ_{RSSI} 、 μ_{LQI} 、 D_{RSSI} 、 D_{LQI} 分类统计基础上,结合 μ_k 、 μ_τ 、 MAX_{τ_0} 、 MAX_k 进一步提高了识别精度.

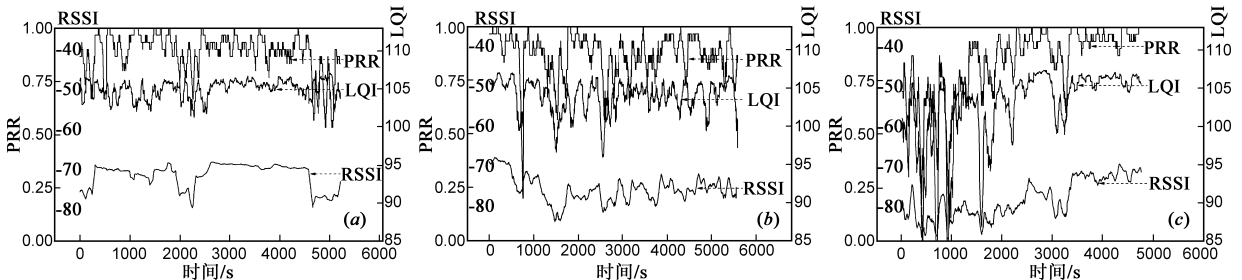


图 11 通信环境参数识别实验

结论: 当 G 环境向 B 环境渐变中, PRR、 μ_{RSSI} 、 μ_{LQI} 逐渐降低, D_{RSSI} 、 D_{LQI} 逐渐增高. PRR > 90%, μ_{LQI} > 105, D_{LQI} < 25.5, 属于 G 环境概率较大; PRR > 85%, $103.8 < \mu_{LQI} < 105.0$, $25.5 < D_{LQI} < 43.6$ 属于 M 环境概率较大; $78\% < PRR < 85\%$, $101.4 < \mu_{LQI} < 103.8$, $43.6 < D_{LQI} < 59.4$ 属于 B 环境概率较大; PRR < 78%, $\mu_{LQI} < 101.4$, $D_{LQI} > 59.4$ 属于 VB 环境概率较大,其隶属度如图 12 所示.

4.3 高鲁棒、低功耗配置策略验证

EasiFCLC 调节感知节点 tinyOS - 2.x 操作系统的 B-MAC^[21] 协议,网关通过 RadioBackoff 接口使用参数 τ_{i+1} (τ_0) 配置节点的初始退避时间、拥塞退避时间;通过 PacketLink 接口使用参数 k_{maxi+1} 配置节点的最大重传次数,使用参数 τ_{i+1} (τ_1) 配置重传时间间隔;通过 LowpowerListening 接口设置 dutycycle 配置平均休眠电流 I_{sleep} .

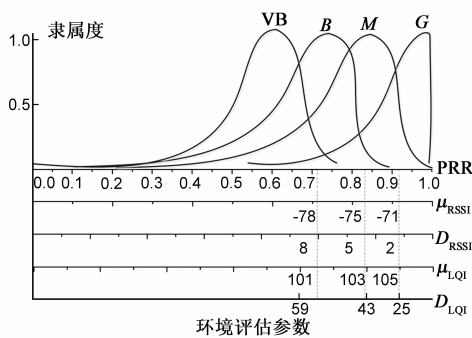


图12 不同环境随评估参数隶属度图

实验中感知节点功耗测试结果: $V = 3.3V$, $I_{\text{sleep}} = 15\mu A$, $I_0 = 21mA$, 由式(2)、(3)可得, P_i 是 τ_{i+1} 的函数, 通过调节 τ_{i+1} 使 P_i 趋向于 P_0 , 降低功耗.

实验 1 应用层需求变化: 如图 13(a) 所示, 场景为 G 环境, 应用需求初始为 $T = 8s$, T 按 $8s, 4s, 3s, 6s$ 变化, $\sigma(p_0) = 90\%$, 初始设置 $k_{\text{max}i+1} = 1$, $\tau = 100ms$, 实验保证每次采样周期数据的可靠交付. 由式(9)得 $t_{\text{sleep}} = T - \tau$, 由表 5 得 $\tau_{i+1} = 2 * \text{MAX}_{\tau_0}$, 因 τ 是 MAX_{τ_0} 函数, 且 G 环境 MAX_{τ_0} 变化较小, 故网关实测 t_i 比较稳定地在区间 $[T - \tau, T]$ 内波动; 当 T 由大变小, 见图 13(a) 虚线, 此时 $Y = O$ 向 $Y = NS$ 状态转变, EasiFLC 调节 $\text{MAX}_{\tau_0}, t_{\text{sleep}}$,

优先满足 $\sigma(p_0)$, 故 t_i 逐渐增大至 $[T - \tau, T]$ 区间, T 由小变大的情形与上述类似, 该实验验证了 EasiFLC 具有应用需求动态适应性.

实验 2 通信环境变化: 如图 13(b) 所示, 固定 $T = 3s$, 初始设置 $k_{\text{max}i+1} = 1$, $\tau = 100ms$. 初始为 G 环境, 在 $t = 320s$ 左右, 加入 CSMA/CA 关闭的电磁干扰节点, 此时因信道竞争出现丢包, 不满足 $\sigma(p_0)$, $Y = O$ 向 $Y = NS$ 状态转变, 由表 5, $k_{\text{max}i+1} = 2 * \text{MAX}_k$, $\tau_{i+1} = \text{MAX}_{\tau_0} + \text{random}[\text{MAX}_{\tau_0}, 2 * \text{MAX}_{\tau_0}]$, 从图 13(b) 纵坐标 t_i 可见, 干扰加入后, EasiFLC 调节 $k_{\text{max}i+1}$ 增大节点多次重传概率, 调节 τ_{i+1} 随机化节点重传时机, 从而一定程度上提高了可靠性、实时性, 当然也不能彻底消除电磁干扰影响, 该实验验证了 EasiFLC 具有通信环境动态适应性.

实验 3 动态加入节点: 如图 13(c) 所示, 三个节点加入网关所在的 PAN, 加入方式包括节点移入或上电启动, 场景如图 10 所示. 假设新加入节点必须按照不小于初始设置的采样周期 $T = 3s, 5s, 8s$ 工作才能完成相应的感知任务, EasiFLC 能对加入的节点跟踪管理, 在通信环境或者网络拓扑发生变化时通过实时调节保证加入的节点能始终以初始设置的 T 工作, 从而为应用层提供连续可靠的服务. 该实验验证了 EasiFLC 具有动态网络扩展功能.

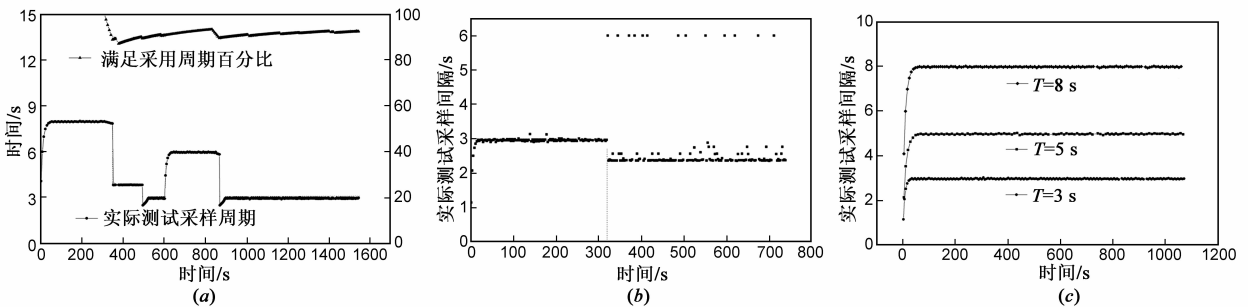


图13 配置策略实验

5 结论

本文针对物联网规模的不断扩展以及通信协议的复杂多样, 提出了物联网即加即用技术, 将即加即用抽象为服务发现、服务映射、智能配置三个工作流程, 从应用系统、网关、节点及终端等层次给出了支持即加即用的框架模型. 在分析总结即加即用相关技术基础上, 本文重点讨论了物联网即加即用的智能配置技术, 提出了 EasiFLC 智能配置方法, 结合实际应用场景, 基于实验分析验证了 EasiFLC, 结果表明该方法具有通用性强、动态适应性好、鲁棒性强等优点. 下一阶段将对物联网即加即用服务发现、服务映射机制等展开深入研究.

参考文献

- [1] 崔莉, 鞠海玲, 等. 传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163 - 174.
Cui Li, Ju Hailing, et al. Overview of wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163 - 174. (in Chinese)
- [2] Akyildiz I. F, et al. A survey on sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102 - 114.
- [3] Yick J, et al. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52: 2292 - 2330.
- [4] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023 - 1029.

- QIAN Zhi-hong, WANG Yi-jun. IoT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023 – 1029. (in Chinese)
- [5] 宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考[J]. 电子学报, 2010, 38(11): 2590 – 2599.
- NING Huan-sheng, XU Qun-yu. Research on global Internet of Things' developments and it's construction[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2590 – 2599. (in Chinese)
- [6] UPnP Device Architecture 1.1 [EB/OL]. <http://www.upnp.org>, 2012 – 6 – 19.
- [7] WindowsRaly 技术 [EB/OL]. <http://msdn.microsoft.com/zh-cn/windows/hardware/gg463018>, 2012 – 10 – 29.
- [8] Jim Waldo, et al. The Jini architecture for network-centric computing[J]. Communications of ACM, 1999, 42(7): 76 – 82.
- [9] Song E Y. Understanding IEEE 1451-networked smart transducer interface standard-what is a smart transducer? [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2008, 11(2): 11 – 17.
- [10] X L Zhou, M. Wu. Service discovery protocol in wireless sensor networks[A]. 2nd International Conference on Semantics, Knowledge and Grid[C]. USA; IEEE Press, 2006. 101 – 102.
- [11] Bruno da Silva Campos. On the design of UPnP gateways for service discovery in wireless sensor networks[A]. IEEE Symposium on Computers and Communications[C]. USA; IEEE Press, 2011. 719 – 722.
- [12] Dhananjay Singh, et al. Performance analysis of gateway discovery techniques: IPv6 based wireless sensor networks[A]. 2nd International Conference on Evolving Internet[C]. USA; IEEE Press, 2010. 142 – 146.
- [13] Raluca Marin-Perianu, et al. Prototyping service discovery and usage in wireless sensor networks[A]. 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks[C]. USA; IEEE Press, 2007. 841 – 850.
- [14] Paulo A C S Neves, et al. User-centric Plug-and-Play functionality for IPv6-enabled wireless sensor networks[A]. IEEE International Conference on Communications [C]. USA; IEEE Press, 2010. 1 – 5.
- [15] Marin-Perianu, et al. Decentralized enterprise systems: a multi-platform wireless sensor networks approach[A]. IEEE Wireless Communications [C]. USA; IEEE Press, 2007. 57 – 66.
- [16] R Dobrescu, et al. Using UPnP services with an intelligent sensor network node[A]. 7th International Conference on Applied Informatics and Communications [C]. USA; WSEAS, 2007. 371 – 374.
- [17] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [18] Kapitanova, et al. Using fuzzy logic for robust event detection in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(4): 709 – 722.
- [19] 朱剑, 赵海, 徐久强, 等. WSNs 中一种新颖的模糊识别定

位技术研究[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1845 – 1851.

ZHU Jian, ZHAO Hai, XU Jiu-qiang, et al. Research on a novel fuzzy theory based localization model in WSNs[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1845 – 1851. (in Chinese)

- [20] Xia F, et al. Fuzzy logic control based QoS management in wireless sensor actuator networks[J]. Sensors, 2007, 7(12): 3179 – 3191.
- [21] Polastre J Hill J. Versatile low power media access for wireless sensor networks[A]. 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. USA: ACM Press, 2004. 95 – 107.

作者简介



方远男, 1988 年生于湖北省孝感市, 2011 年毕业于西安电子科技大学计算机学院获学士学位, 现为中国科学院计算技术研究所硕士生, 从事无线传感器网络节点及网络设备的研究.

E-mail: fangyuan@ict.ac.cn



刘强男, 1971 年生于黑龙江省哈尔滨市, 博士, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为无线传感器网络、短距离无线通信等.

E-mail: liuqiang@ict.ac.cn



赵泽男, 1978 年生于辽宁省大连市, 博士研究生, 助理研究员, 中国计算机学会会员, 研究方向为嵌入式系统和无线传感器网络.

E-mail: zhaoze@ict.ac.cn



崔莉女, 1962 年生于北京市, 博士, 中国计算机学会高级会员, 中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师, 从事无线传感器网络相关研究.

E-mail: lcui@ict.ac.cn