

多 Sink 无线传感器网络鲁棒路由协议

左 杨, 徐 晨*

(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘要:针对多 Sink 无线传感器网络中由 Sink 节点失效引起的局部数据拥塞, 进而导致网络鲁棒性减弱的问题, 提出基于侦听机制和模糊控制的多 Sink 无线传感器网络鲁棒路由协议. 该协议采用侦听机制, 建立并维护多维树状拓扑路由, 避免了采用泛洪方式组网而造成的资源浪费; 加入以负载、丢包和跳数为目标的模糊控制算法, 进行路由选择, 均衡了网络负载. 仿真结果表明, 该路由协议在一定程度上缓解了网络中 Sink 节点失效造成的大量丢包以及数据拥塞问题, 增强了网络的鲁棒性.

关键词:多 Sink 无线传感器网络; 鲁棒性; 路由协议

中图分类号: TP393.01

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2014)01-0001-06

Robustness Routing Protocol in Multi-Sink Wireless Sensor Networks

ZUO Yang, XU Chen*

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: According to Sink node's death problem in Multi-Sink wireless sensor networks, the paper proposes a novel routing protocol for Multi-Sink wireless sensor networks based on listening mechanism and fuzzy control algorithm. The proposed protocol is as following: Listening mechanism employed to establish and maintain multi-dimensional tree routing topology; with hops, packet losses and load as targets, a fuzzy control algorithm is proposed. The simulation results showed that the performance of the proposed protocol is better than the routing protocol of minimum hop numbers for mitigating packet losses and congestion, and enhancing the robustness of the network.

Key words: multi-Sink WSN; robustness; routing protocol

在大规模、高密度部署的无线传感器网络中, 单 Sink 节点的网络架构已经难以满足需求^[1-2]. 采用多 Sink 节点的网络架构, 不仅可以避免对单一 Sink 节点的过度依赖, 增加感知节点信息传输渠道, 提高网络吞吐量、均衡能量消耗、延长网络寿命, 还有利于增强网络可靠性和鲁棒性^[3].

Ryouhei Kawano 等^[4]人提出最小跳数路由协议 (MMHR), 其目标是在多 Sink 无线传感器网络中, 所有 sensor 节点与 Sink 节点之间的通信跳数最小. Hongseok Yoo 等^[5]人提出了一种新的解决多 Sink 无线传感器网络中热区问题的方法. 该方法采用了一种新的基于梯度的路由算法, 梯度的选择综合考

收稿日期: 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60171086)

作者简介: 左杨(1988—), 男, 硕士研究生.

* 通信联系人: 徐晨(1960—), 男, 教授, 主要研究方向为 Ad-hoc 网络. E-mail: xcetit@163.com

虑了下一跳节点和整条路径的信息,并分析了节点剩余能量以及负载之间的关系.该算法均衡了网络的负载,延长了网络的寿命.文献[6-7]将模糊控制算法应用到无线传感器网络中.文献[6]详细介绍并分析了基于节点地理位置的GAF算法,针对算法的不足,结合模糊控制技术,提出了新的簇头选择机制以及相应的成簇机制,有效改进了GAF算法;文献[7]提出基于模糊控制算法的改进接收信号强度指示(RSSI)测距技术,通过模糊状态分类建立环境气候和障碍物的模糊分布参数,算出其隶属函数,得出较准确的测距公式,计算移动节点的位置信息.

针对多Sink无线传感器网络中存在的Sink节点死亡导致的网络鲁棒性减弱问题,本文提出基于侦听机制^[8]和模糊控制算法^[9]的多Sink无线传感器网络路由协议FAMSR(Multi-dimensional Tree Multi-Sink Routing Protocol Based on Fuzzy Control Algorithms).引入模糊控制算法后,路由协议具有自我调控的智能特点,可以对网络出现的问题进行动态调整,使网络的运行更加高效.

1 FAMSR 协议描述

在Multi-Sink无线传感器网络中,假设如下:1)Sink节点和sensor节点随机平面布设,且不可移动;2)所有Sink节点、sensor节点同构;3)无线信道对等,且无线收发是全方位的;4)每个节点地址唯一.针对Multi-Sink无线传感器网络中的Sink节点失效问题,假设网络中某个时间某个Sink节点的存活状态由生存变为死亡.为了更好地观察Sink节点失效之后网络性能的变化情况,本文选择在仿真区域中放置9个Sink节点(Sink节点位置固定).

1.1 基于侦听机制的最小跳数路由协议

为了避免采用周期性洪泛组网方式造成的资源浪费现象,没有加入网络的普通节点主动广播路由请求包(RREQ报文),请求加入网络.收到RREQ的节点根据条件判断是否回复路由回复包(RREP),若条件符合则回复RREP,并将该RREP包的类型设为广播型,使周围节点都能侦听到该RREP,这样周围节点可以及时更新路由信息,提

高了网络组网速度以及灵活性.这种改进后的协议称为侦听(Listening)机制.引入侦听机制的最小跳数路由(MHR)协议称为基于侦听机制的最小跳数路由协议^[10].

1.2 FAMSR 算法描述

在FAMSR协议中,每个节点都需要建立多维树状路由,其维数与Sink节点的个数相同.如表1所示,每个节点建立 N 维路由表,每一维路由表都记录相对应的Sink节点ID、父节点ID、跳数、父节点剩余能量、路径负载、丢包等信息.感知节点在发送数据包之前根据路由表中的相关信息,运用模糊控制算法选择最优路径.同时,节点还采用ACK机制,反馈ACK包中的信息更新路由表.数据包帧格式如表2所示.

表1 N 维路由表

Sink ID	Father Node ID	Hop	Father Left Energy	Load	Father Lost	Other
Sink i

表2 数据包帧格式

Destination	Hop	Style	Load	Lost	Sink_ID	Time	Other
-------------	-----	-------	------	------	---------	------	-------

在FAMSR协议中,路由的建立和维护与单Sink无线传感器网络MHR协议的过程类似,不同之处在于FAMSR所建立的是 N 维树状路由.具体过程如下所示:

1)初始化节点.感知节点维护的 N 维路由表都需要初始化,将每一维的父节点ID和本节点跳数都设为 ∞ .因为Sink节点是根节点,Sink节点中与本Sink节点对应的路由表的父节点ID设为其自身ID,跳数设为0,而对应其他Sink节点的父节点ID以及跳数都设为 ∞ .初始化节点过程结束之后,感知节点针对每个Sink设置一个随机等待时间 T_{wait} ,等待时间到了之后发送RREQ _{i} .

2)如图1所示,图中给出了节点发送RREQ _{i} 之后,处理路由回复包RREP _{i} 的伪代码.普通节点收到路由回复包RREP _{i} 后,首先检测RREP _{i} 包的Sink属性,之后与路由表同维的跳数相比较,根据比较规则决定是否更新对应路由表信息,同时设置路由维护周期,其路由更新过程与单Sink MHR协

议类似。

3)多 Sink 路由的维护过程与单 Sink MHR 路由协议的维护过程类似,都是采用定时维护机制,其区别仅仅在于多 Sink 情况下的每一维路由的维护周期到达之后,只会对该维的路由表进行维护操作,而其他维的路由表不进行任何操作。

在 FAMSRS 协议中,由于需要同时建立和维护 N 维路由,网络在建立和维护过程中的开销增多。同时,一旦 Sink 节点失效,局部区域的拥塞增多、通信冲突增加等问题也随之而来。为了解决上述这些问题,在协议中提出了一些改进措施,主要有:

1)针对 FAMSRS 路由协议中存在的网络平均跳数减小导致节点平均通信距离增大的问题,引入功率控制机制^[11]来解决,即在路由建立和维护过程中采用较小的功率,而发送数据时采用较大的功率。根据当前业务分配不同的发射功率,限制通信距离,增加通信的信噪比。

2)引入基于节点流量的带宽分配机制^[12]。在路由建立和维护的过程中,节点根据自身当前缓冲区负载情况,设定节点成功接入信道的门限,即:减少空闲节点使用信道机会,增加负载较重的节点接入信道机会。同时,在发送数据的过程中,根据节点的重传次数,设置不同的退避时间,重传次数少的退避时间大,而重传次数大的退避时间小。这些改进缓解了节点的拥塞问题,降低了丢包的数量以及重传次数。

1.3 基于模糊控制算法的路径选择

模糊控制算法的核心部分是模糊控制器的设计^[13],模糊控制器主要包括输入信息的模糊化、知识库、模糊推理和解模糊 4 个部分^[14-15]。模糊控制器的设计按照上述 4 个部分主要分为以下几个方面:模糊控制器的结构选择、模糊规则的选取、模糊化和解模糊方法的选取、模糊控制算法程序的编写。

1.3.1 变量的模糊化

1)从大量的仿真实验中得出,9Sink 无线传感器网络的平均跳数约为 9.967,因此,跳数 Y_{hop} 的论域设为 $[0, 20]$,模糊子集划分为 $\{L, M, H\}$,表示{少,中,多},隶属函数如图 2 所示。

```

Procedure routing_algorithm(package){
  if(Received the RREP_i){
    i = package.Sink;
    if(i = Sink_num){
      // Node.Hop in the Sink i
      if(Node.Hop =  $\infty$ )
        Update the rout in the Sink i and set the wait time for the routing
      else
        if(Node.Hop > RREP_i.Hop + 1)
          Update the rout in the Sink i and set the wait time for the routing
        }
      else{To Listening () mode and Update the rout in the Sink i
        wait for a short time and then broadcast RREQ_i again
      }
    }
    else
      wait for a short time and then broadcast RREQ_i again
    }
  // The node receives RREQ_i package and check the number of the RREQ_i.Sink
  if(receive the RREQ_i){
    i = RREQ_i.Sink;
    // the Node.Hop in the Sink i
    if Node.Hop! =  $\infty$ ){
      if(RREQ_i.Hop > Node.Hop + 1)
        Initialize the RREQ_i package // broadcast RREP_i
      }
    }
  //the Listening() mode
  if(the neighbor node receives RREP_i){
    i= RREP_i.Sink;
    // the Node.Hop in the Sink i
    if(Node.Hop > RREP_i.Hop + 1){
      Update the rout in the Sink i and set the wait time for the routing
    }
  }
}

```

图 1 FAMSRS 协议路由建立与维护过程代码

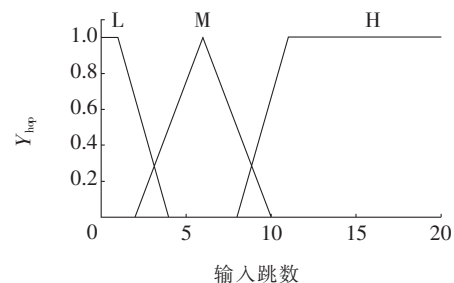


图 2 Y_{hop} 隶属函数

2)路径负载 Y_{load} 的论域设为 $[0, 40]$,模糊子集为 $\{SL, L, M, H\}$,表示{很小,小,中,大},隶属函数如图 3 所示。

3)链路质量的 Y 论域设为 $[0, 100]$,模糊子集

为{SL, L, M, SH, H}, 表示{很差, 差, 中, 较好, 很好}, 隶属函数如图4所示.

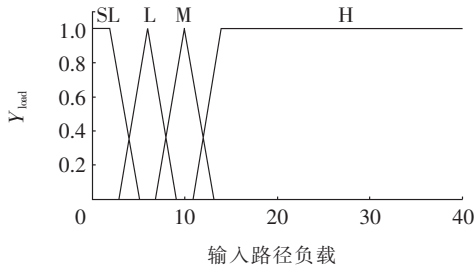


图3 Y_{load} 隶属函数

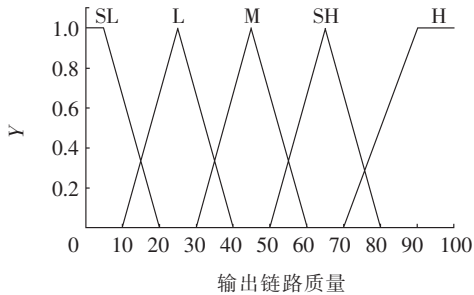


图4 Y 隶属函数

1.3.2 模糊推理规则

根据上述模糊控制算法的设计部分可以得出, 本文仿真的模糊推理规则如表3所示.

表3 模糊推理规则表

Y	Y_{load}	SL	L	M	H
Y_{hop}	L	H	H	SH	M
	M	SH	SH	M	L
	H	M	L	SL	SL

1.3.3 解模糊

选择“最大隶属度法”进行解模糊, 即选择模子集中隶属度最大的信息作为输出量.

Sink 节点失效通常会导致局域区域拥塞、数据通信冲突等问题, 进而造成数据包大量丢失. 为了反映丢包对链路质量的影响, 本文引入遗忘因子 v . 根据实际经验, 节点两次丢包之间的间隔时间越短, 丢包对链路质量的影响越大, 而两次丢包之间的间隔时间越长, 丢包对链路质量的影响越小, 甚至可以忽略不计. 假设 Y_{lost} 表示丢包对链路质量的影响, 那么 Y_{lost} 可以用式(1)表示

$$Y_{lost} = (T - T_{first}) - v \times lost_num \quad (1)$$

其中, T 表示节点当前丢包的时间, T_{first} 表示当前

节点第一次丢包的时间, v 是遗忘因子, 单位是 $s/\text{个}$, $lost_num$ 是节点的丢包个数.

于是, 精确的链路质量值可以通过式(2)求解

$$Y = Y_{hop} + Y_{load} - Y_{lost} \quad (2)$$

其中, Y_{hop} , Y_{load} , Y_{lost} 分别为跳数、负载的输出控制量以及丢包对链路质量产生的影响, 分别用式(3)、(4)、(1)来表示. 当 $Y < 0$ 时, 表明该链路质量较差, 选择该路径的可能很小, 基本为 0. 为了方便归一化处理, 如果 $Y < 0$, 则将 Y 的值设为 0, 即选择该路径的概率为 0.

$$Y_{hop} = \begin{cases} \frac{100}{hop} + (4 - hop)w & hop \leq 3 \\ \frac{100}{hop} & 3 < hop \leq 7 \\ \frac{100}{hop} - w & hop > 7 \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_{load} = \begin{cases} 0 & load \leq 4 \\ -15 & 4 < load \leq 8 \\ -35 & 8 < load \leq 12 \\ -60 & load > 12 \end{cases} \quad (4)$$

其中, hop 为感知节点到 Sink 节点的跳数, w 为常数, 用来增加或减弱 hop 的大小对 Y_{hop} 的影响程度. 仿真实验表明, 当 $w = 6$ 时, 网络的性能最佳. $load$ 为路径负载, 其每个参数都是在大量的仿真实验基础上选择的. 由式(1)可知, 遗忘因子 v 表征丢包对链路质量的影响, 仿真实验表明, 当 $v = 20$ 时, 网络的性能最佳.

在数据的传输过程中, 每次发送数据包之前, 节点都需要进行路径选择. 从图1中可以看出, 根据感知节点维护的 N 维跳数、 N 维路径负载、 N 维丢包数, 以及模糊控制算法计算出每条路径的链路质量. 对每条链路质量进行归一化操作之后, 确定每条链路质量在 0~1 之间所占的比例, 最后随机选择路径. 这样, 在保证能够选择最优路径的前提下, 增加了次优路径的选择概率, 一定程度上缓解了网络的负载较重问题.

2 仿真研究

本文采用的仿真软件是课题组在 VB 环境下针对 WSN 的特点专门编写的, 其仿真内核以离散事

件和无线通信等理论为基础,参考无线传感器网络通信协议栈各层的实现方法,设计无线传感器网络的物理层、MAC层,网络层以及应用层.此外,仿真平台具有高效的仿真内核,支持多种通信协议,因此具有速度快、精度高、资源需求低、易于移植和扩展等优点.本节对仿真实例的说明显示了所提协议的有效性.此外,还给出了与最小多跳多 Sink 路由协议(MMHR)作对比的仿真结果.

2.1 仿真环境

仿真区域大小设置为 $6\ 000\ \text{m} \times 6\ 000\ \text{m}$,普通节点数设为 200 个.随着现代网络的规模越来越大, Sink 节点的数量也越来越多,为了更好地观察 Sink 节点失效之后网络性能的变化情况,本文选择在仿真区域中放置 9 个 Sink 节点(Sink 节点位置固定),同时将其划分为 9 个 $2\ 000\ \text{m} \times 2\ 000\ \text{m}$ 的小区域,当仿真时间为 400 s 时,将中心小区域的 Sink 节点的存活状态由生存改为死亡.网络仿真参数如表 4 所示.

表 4 仿真参数

参数	数值
传感器节点个数	200
Sink 节点个数	9
仿真区域/ m^2	$6\ 000 \times 6\ 000$
信道模型	Free-space model
频带/MHz	433
数据传输速率/kbps	20
信道带宽/MHz	0.2
仿真时间/s	2 000
仿真步长/s	0.000 4
数据包大小/Bytes	48
ACK 包大小/Bytes	8
节点缓冲区大小/Bytes	20×48

2.2 结果与分析

图 5 是网络中感知节点在发包率(generate packet rate, GPR, 表示单位时间内产生包的速率)分别为 0.10, 0.12, 0.14, 0.16 时, FAMSR 协议和 MMHR 协议中,每一秒的时间之内发往失效 Sink 节点的数据包个数的曲线图,这些数据包最终都会丢失.从图 5 可以看出:MMHR 协议中,一旦 Sink 节点失效,因为 MMHR 协议没有抗毁机制,发往失效 Sink 节点的数据包将不断增加;而 FAMSR 协议

中,一旦 Sink 节点失效,在评价通往失效 Sink 节点的路径时,路径负载严重并且大量的丢包都会大大降低链路质量值,因此,选择通往失效 Sink 节点的路径的概率就会大大降低.在 Sink 节点刚刚失效时(本次仿真为 400 s),发往失效 Sink 节点的数据包也会增加一段时间,但随着时间的继续,发往失效 Sink 节点的数据包会慢慢减少,甚至为 0.

上述仿真实验结果表明, FAMSR 协议一定程度上缓解了多 Sink 无线传感器网络中的 Sink 节点失效引起的大量丢包、局部区域拥塞以及数据碰撞等问题,增强了网络的鲁棒性和抗毁性,其性能指标优于 MMHR 协议.

3 结论

本文将模糊控制算法引入 FAMSR 协议之后,结合表征丢包对网络影响的遗忘因子,建立了跳数、路径负载和链路质量的隶属函数,推导模糊控制规则,求出单个路径链路质量的精确值.归一化所有链路质量后通过概率进行路径选择,使得路由协议的任务分配合理、网络负载更加均衡,增强了网络的鲁棒性和抗毁性.

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su Weilian, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114.
- [2] Foresti G L, Snidaro L. A distributed sensor network for video surveillance of outdoor environments[C]//Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing, 2002:525-528.
- [3] Chang J H, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4):609-619.
- [4] Kawano R, Miyazaki T. Distributed data aggregation in multi-sink sensor networks using a graph coloring algorithm[C]//Proceedings of 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, March 25-28, 2008, Okinawa. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2008: 934-940.
- [5] Hongseok Y, Moonjoo S, Dongkyun K. A scalable multi-sink gradient-based routing protocol for traffic load balanc-

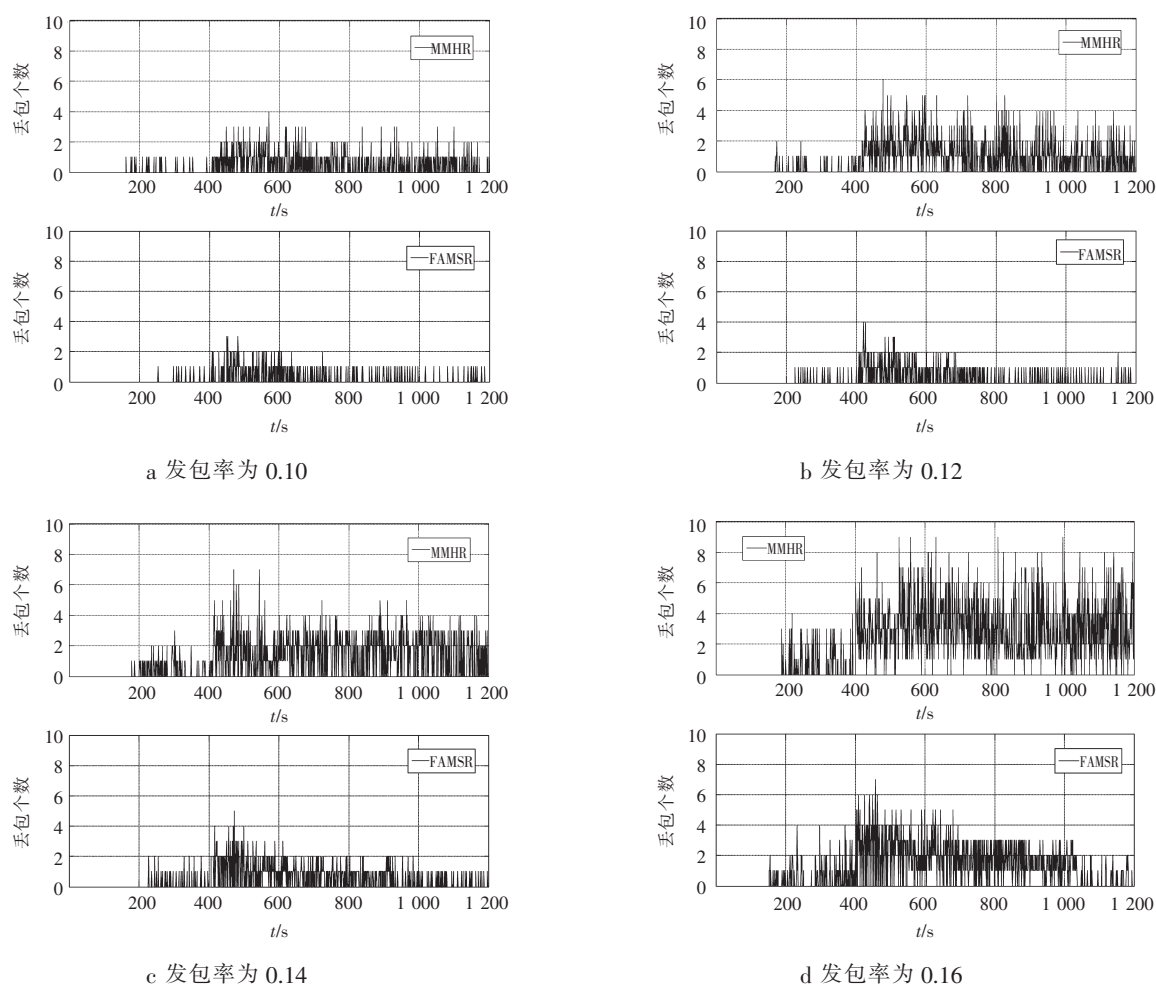


图5 不同发包速率时数据包的丢包个数变化曲线图

- ing[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 2011(1):85.
- [6] 唐悦宁. 基于模糊控制的无线传感器网络 GAF 算法改进 [D]. 武汉:华中科技大学电子与信息工程系, 2007.
- [7] 吴鹏杰. 一种新颖的无线传感器节点模糊功率控制算法 [D]. 北京:北京邮电大学信息与通信工程学院, 2010.
- [8] 朱昇亮. 基于侦听机制的无线传感器网络路由协议研究 [D]. 南通:南通大学电子信息学院, 2011.
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3):338-353.
- [10] Zhou Hui, Qing Dongliang, Zhang Xiaomei, et al. A multiple-dimensional tree routing protocol for multi sink wireless sensor networks based on ant colony optimization [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 2012(1), doi:10.1155/2012/397961.
- [11] Zhu Shengliang, Xu Chen, Sun Qiang, et al. A novel transmission power selection mechanism for wireless sensor networks[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), Sept 9-11, 2011, Ningbo, Zhe Jiang. New York:IEEE Xplore, 2011:661-665.
- [12] 徐晨, 孙强. 无线传感器网络节点流量的带宽分配策略 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(22):7-11.
- [13] Mandani E H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, 121(12):1585-1588.
- [14] Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(1):28-44.
- [15] Holmblad L P, Ostergard J J. Control of a cement kiln by fuzzy logic techniques[C]//Proceedings of International Federation of Automatic Control Congress on Control Science and Technology for the Progress of Society, August 24-28, 1981, Kyoto, Japan, 1981.

(责任编辑:仇慧)