

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.2.08

## 自适应模糊无线传感器网络路由选择

沈玮娜, 胡黄水\*, 王宏志, 王莹

(长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 将下一跳节点的剩余能量、本节点与发送节点的通信距离以及到 SINK 节点的通信距离之和作为模糊理论综合评判法的参数,通过模糊控制计算出下一跳节点的可选度。可选度最高的节点即为下一跳节点。建立了网络自适应路由,通过多跳的方式传输数据。仿真实验表明,RAFT 算法可以更好地均衡网络各节点的负载,明显降低网络能耗并提高节点生命周期。

**关键词:** 无线传感器网络; 路由算法; 模糊控制

**中图分类号:** TP 393.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)02-0144-06

## A routing algorithm for wireless sensor networks based on adaptive fuzzy control

SHEN Weina, HU Huangshui\*, WANG Hongzhi, WANG Ying

(School of Computer Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The residual energy and sum of communication distance between the original node and the next hop node and between the original node and SINK node are taken as the parameters of comprehensive fuzzy evaluation to calculate the optional degree of next hop node. The node with the highest optional degree is the next hop node. Adaptive routing is built with multi hop manner for data transfer. Simulation shows that routing algorithm for WSN based on adaptive fuzzy theory is effective to balance the load of each node in the network, reduce power consumption and improve the node life cycle.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); routing algorithm; fuzzy control.

### 0 引言

随着无线电子技术的发展,无线传感器网络

(Wireless Sensor Network, WSN)的应用越来越广泛,包括环境监测、军事侦查、医疗监护、仓储管理等<sup>[1-2]</sup>。无线传感器网络包含大量体积小但能

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 吉林省发改委经济结构调整引导资金专项项目(2014Y125); 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(吉教科合字[2015]第 100 号); 吉林省科技厅科技发展计划项目(20140204037GX)

作者简介: 沈玮娜(1993-),女,汉族,江苏无锡人,长春工业大学硕士研究生,主要从事无线传感器网络方向研究,E-mail: SWN0715@163.com. \* 通讯作者: 胡黄水(1974-),男,汉族,湖南隆回人,长春工业大学副教授,博士,主要从事无线传感器网络及轨道车辆动力学方向研究,E-mail: huhs08@163.com.

量有限的节点,由于节点经常分布在偏远或恶劣的环境中,这些节点很可能因为能量耗尽而影响整个网络的性能。因此,节约节点的能量消耗对网络寿命的延长和网络性能的保持至关重要。

选择合适的网络通信路由是降低网络能耗的有效方法之一。近年来,许多国内外学者对这方面的问题进行了大量研究,并取得了丰富的成果。文献[3]中的 LEACH 算法是最早提出的分簇式路由协议;文献[4]提出了一个基于模糊推荐的自动组网信任路由模型;文献[5]使用模糊逻辑方法,以邻居节点数目和节点剩余能量为重要因素进行路由协议中的簇头选择。

在对无线传感器网络已有研究成果的基础上,文中提出基于模糊控制理论的无线传感器网络路由选择算法(Routing Algorithm for WSN based on Fuzzy Theory, RAFT)对网络进行路由控制。在传输建立阶段,网络按照汇聚节点的位置划分成不同的方形子域,当有数据需要传输时,子域内的节点广播其状态信息,利用模糊理论综合评判法选出最优的下一跳节点,从而找到一条最优的路径,达到均衡网络能耗、延长网络寿命的效果。

## 1 系统模型

### 1.1 参数确定

无线传感器网络中节点间的通信距离、下一跳节点的剩余能量和下一跳节点到 SINK 节点的通信距离都会影响节点的能耗。模糊控制是以人的控制经验作为控制的知识模型,它不依赖于被控对象的数学模型,这对一些复杂可变或者结构不稳定、难以用数学模型描述的系统而言是非常合适的<sup>[6]</sup>。由于在无线传感器网络传输过程中,下一跳节点的确定难以用准确的数学模型表示,因此,文中引入下一跳节点的剩余能量、该节点与发送节点的通信距离与到 SINK 节点的通信距离之和作为模糊理论综合评判法的参数,具体原因如下:

1) 剩余能量。网络节点的剩余能量值直接决定节点能否在网络中正常工作,无论是采集还是传输数据,节点都需要消耗能量。节点剩余能量的多少直接决定该节点在网络中工作时间的长短。

2) 下一跳节点与发送节点的通信距离与到 SINK 节点的通信距离之和。从无线传感器网络

能耗模型<sup>[7]</sup>可知,节点发送数据的能耗与节点间的通信距离成反比,即通信距离越短,能耗越低。下一跳节点与 SINK 节点之间距离越近,则数据传播路径越短,网络能耗就越低。因此,综合考虑这两点因素,当下一跳节点与发送节点的通信距离与到 SINK 节点的通信距离之和越小,则对减小整个网络的能耗越有利。

### 1.2 网络结构假设

初始状态下,无线传感器网络中的传感器节点均匀分布,在分析基于模糊理论的无线传感器网络路由选择算法(RAFT)之前,对网络结构有以下假设:

- 1) 节点随机散布在方形监测区域内,所有节点初始能量相同;
- 2) 节点具有移动性且具有一定的感知、计算和通信能力;
- 3) 节点支持全向通信,每个节点具有唯一的 ID 号,如  $I_a \cdots I_c$ ;
- 4) 节点可感知自身剩余能量和位置。

### 1.3 节点能耗模型

网络中节点的能耗模型采用一阶无线电模型<sup>[8]</sup>,该模型中  $E_{elec}$  代表发送节点发送每比特或接收节点接收每比特信息所消耗的能量; $E_{amp}$  为发送节点发送信息时单位距离的能耗放大倍数。

传感器节点将  $k$  bit 数据发送到距离为  $d$  的地方的能耗为:

$$E_d = \begin{cases} k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^2, & \text{发送信号} \\ k \times E_{elec}, & \text{接收信号} \end{cases}$$

## 2 RAFT 算法设计

RAFT 算法的基本思想是当节点要将感测到的数据传送至 SINK 节点时,监测域中的节点广播其 ID、位置信息及剩余能量。域内所有节点都会收到这些信息,信息汇总至节点表,然后使用模糊控制的方法寻找最优的下一跳节点。节点见表 1。

表 1 节点表

节点 ID	剩余能量	与发送节点的通信距离	到 SINK 节点的距离
$I_a$	$R_{E_a}$	$R_{C_a}$	$R_{S_a}$
...	...	...	...
$I_c$	$R_{E_c}$	$R_{C_c}$	$R_{S_c}$

模糊控制是以控制人员的经验为基础的智能控制。为减小计算量和计算时延,输入变量设为节点剩余能量归一化模糊变量  $R_{E_i}$ ,该节点与发送节点通信距离及到 SINK 节点距离之和归一化

模糊变量  $D_{sum}$  这两项。文中采用文献[9]中经典的 Mamdani 模糊逻辑系统模型,其具体结构如图 1 所示。

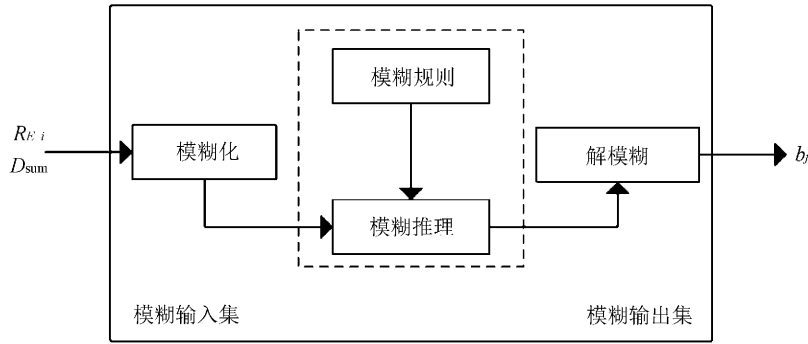


图 1 模糊逻辑系统结构

2.1 输入变量与输出变量

定义  $R_{E_i} = \frac{E_{now}}{E_{init}}$  为节点的归一化剩余能量,  $E_{now}$  为节点当前的能量,  $E_{init}$  为节点的初始能量;

定义  $D_{sum} = \frac{\frac{1}{d_{sum}} - \min \frac{1}{d_{sum}}}{\max \frac{1}{d_{sum}} - \min \frac{1}{d_{sum}}}$  为归一化的距离之和,其中  $d_{sum} = R_{C_i} + R_{S_i}$ 。

模糊控制的输出变量为节点可选度  $b_j$ 。

2.2 模糊化

模糊化阶段就是把输入变量的精确值转换成模糊的语言变量值,各变量模糊子集分配如下:

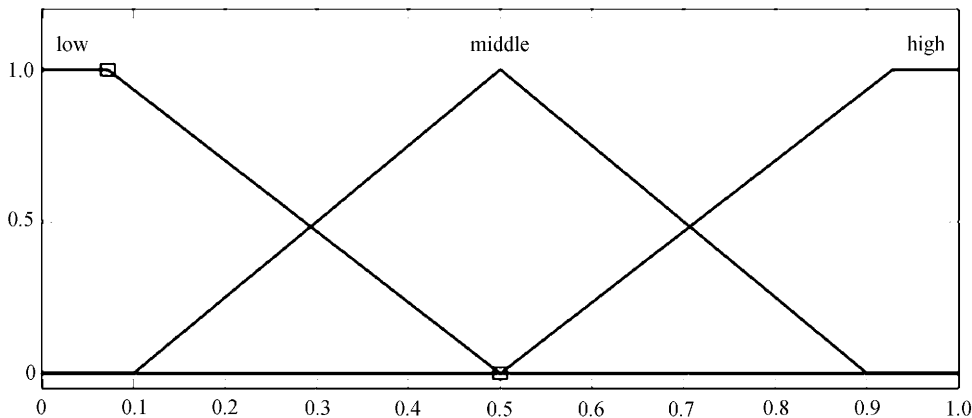
1) 剩余能量: 设描述剩余能量  $R_{E_i}$  的语言值模糊子集为 {低、中、高}, 依次为低 = low, 中 =

middle, 高 = high。

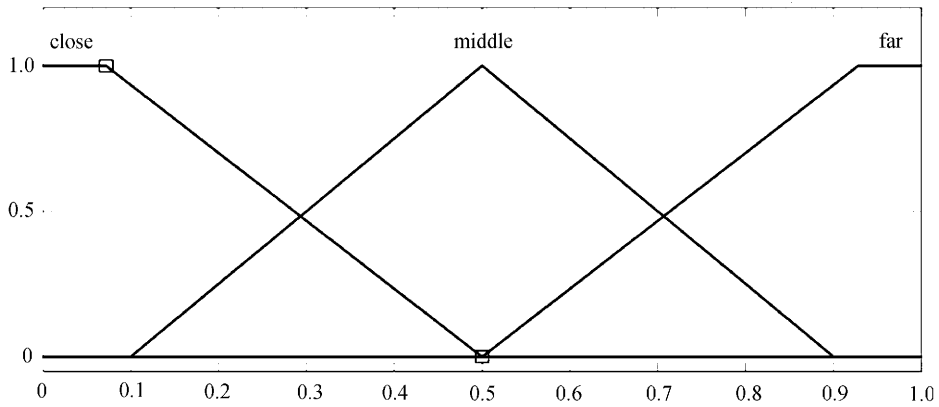
2) 节点与发送节点通信距离及到 SINK 节点距离之和  $D_{sum}$  的语言值模糊子集为 {近、中、远}, 依次为近 = close, 中 = middle, 远 = far。

3) 节点可选度  $b_j$  的语言模糊子集为 {小、中、大}, 依次为小 = little, 中 = middle, 大 = large。

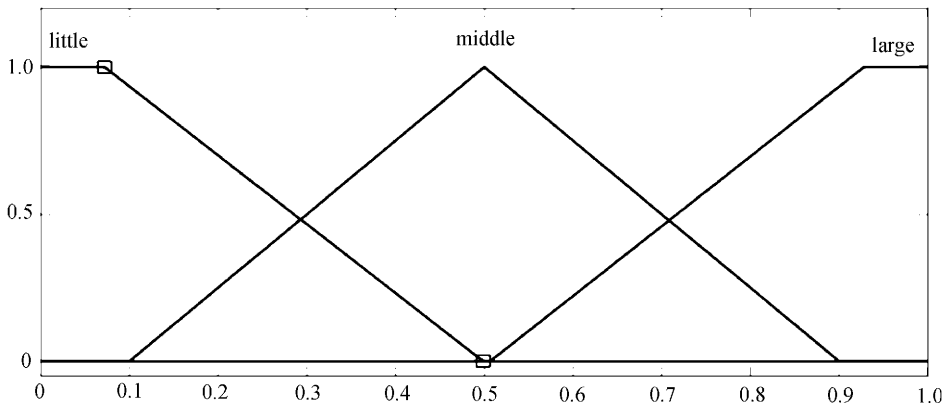
模糊控制中的隶属度函数在误差较大的区域应采用低分辨率的模糊集合,在误差较小的区域选择高分辨率的模糊集合,而隶属度函数曲线形状较尖时分辨率高、控制灵敏度好,在曲线形状较平缓时系统稳定性佳、控制特性平缓。因此,文中的模糊集 middle 采用三角形隶属函数,low、high、close、far、little、large 采用梯形隶属函数。输入变量和输出变量的隶属度函数如图 2 所示。



(a)  $R_{E_i}$  隶属度函数



(b)  $D_{sum}$  隶属度函数



(c)  $b_j$  隶属度函数

图 2 模糊推理过程

### 2.3 模糊规则的定义

输入变量模糊化之后,系统中的推理引擎则会根据规则库中的控制规则推理出输出集。剩余能量对能否成为下一跳节点起主要作用,即剩余能量越高,成为下一跳节点的可能性越大。距离之和起次要作用,即在剩余能量相同的情况下,距离之和越小的节点会加大成为下一跳节点的概率。文中使用“IF-THEN”的模糊规则形式<sup>[10]</sup>,具体规则见表 2。

### 2.4 解模糊化

在模糊逻辑系统中,由于模糊控制器的输出量为模糊集,该模糊集需要经过解模糊的过程变成具体的数值。因此,文中采用质心法<sup>[11]</sup>解模糊,具体公式如下:

$$u = \frac{\sum x_i \cdot \mu_N(x_i)}{\sum \mu_N(x_i)}$$

例如,当  $R_{E_i} = 0.1, D_{sum} = 0.5$  时,该节点的可选度  $b_j = 0.169$ ,推理过程如图 3 所示。

表 2 模糊规则表

序号	$R_{E_i}$	$D_{sum}$	$b_j$
1	low	close	middle
2	low	middle	little
3	low	far	little
4	middle	close	large
5	middle	middle	middle
6	middle	far	middle
7	high	close	large
8	high	middle	large
9	high	far	middle

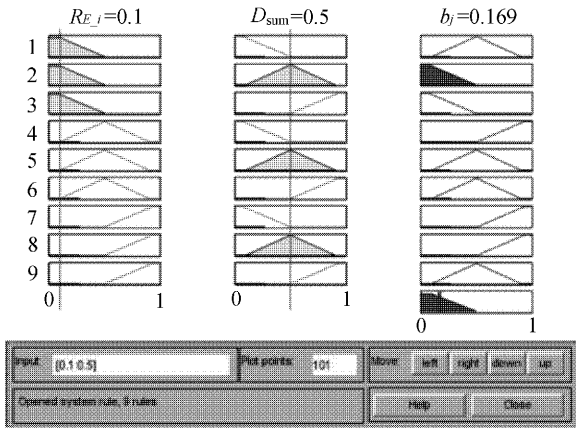


图 3 模糊推理过程

### 3 仿真结果

将 RAFT 算法与 LEACH 比较,选取监测区域中的一个子域,仿真参数见表 3。

表 3 仿真参数表

参数	参数值
网络区域	0×0~100×100
Sink 节点位置	(50,150)
节点数量	100
节点初始能量 $E_{init}/J$	0.5
发送或接收数据消耗的能量 $E_{elec}/(nJ/bit)$	50
数据融合能量 $E_{DA}/(nJ/bit)$	5
$E_{amp}/(J/(bit \cdot m^2))$	$10 \times 10^{-9}$
数据包长度/bit	4 000

### 3.1 RAFT 算法模型

RAFT 算法的仿真结果如图 4 所示。

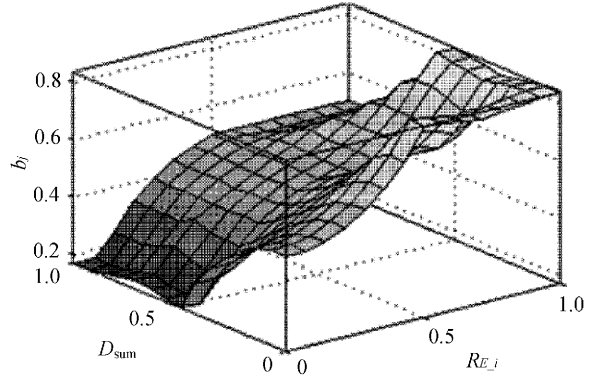


图 4 RAFT 算法模糊推理模型仿真结果

当节点剩余能量  $R_{E_j}$  接近于零时,不论  $D_{sum}$  多大,节点可选度  $b_j$  都较小。当剩余能量增大时,距离之和  $D_{sum}$  越小,则可选度越大。这说明节点剩余能量是决定节点是否可选的最重要因素,与此同时,距离之和越小,可选度越大。

### 3.2 网络能耗

进行 LEACH 与 RAFT 算法网络剩余能量的比较,如图 5 所示。

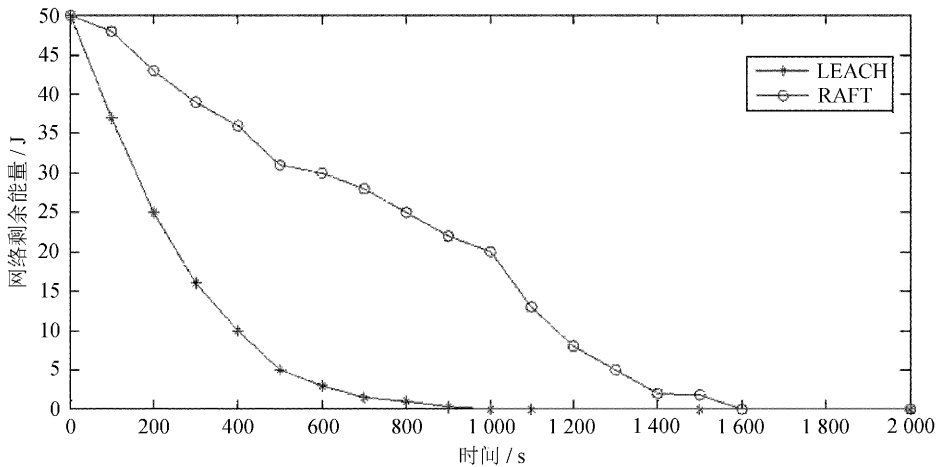


图 5 网络剩余能量对比

由图 5 可知,经历相同的时间之后,使用 RAFT 算法的网络剩余能量高于使用 LEACH 协议的网络剩余能量。使用 LEACH 协议的网络在经历了大约 1 000 s 后剩余能量趋近于零,而

使用 RAFT 算法的网络在 1 600 s 附近网络能耗才消耗殆尽。

产生这种现象的原因是,LEACH 协议中簇头将该簇的信息整合后直接发送给汇聚节点,由

于数据量大,且距离汇聚节点较远的簇发送数据的距离远,极易导致该簇头能量耗尽。RAFT算法中,下一跳节点的选取依次取决于节点的剩余能量及两节点之间的距离与该节点到汇聚节点的距离之和,数据以多跳的方式传送至汇聚节点,因此在避免低能耗节点能量过度消耗的同时尽可能减少传输距离。但RAFT算法需要节点广播自

身能量和位置信息,也会消耗少量能量。

### 3.3 网络存活节点数

进行了LEACH协议与RAFT算法网络存活节点数的比较,LEACH协议在第203 s出现第一个死亡节点,而RAFT算法在第658 s出现,如图6所示。

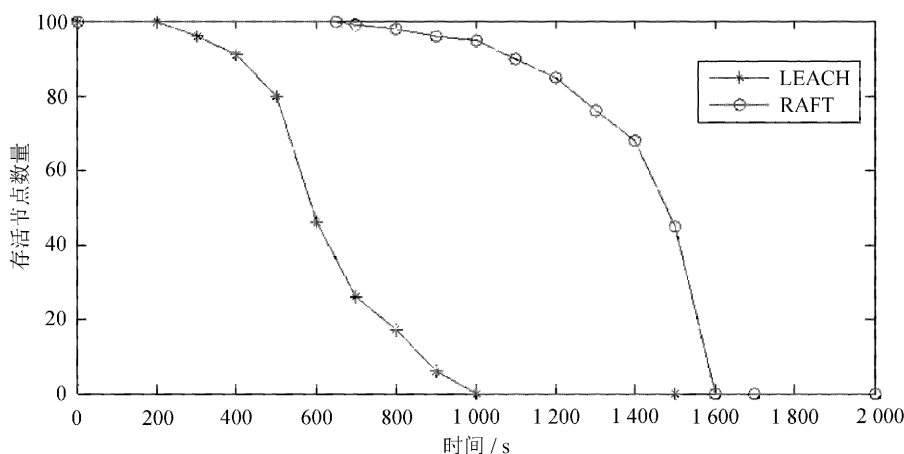


图6 网络存活节点数对比

从图6曲线的总体趋势来看,RAFT算法中节点死亡的速度比LEACH协议的慢。

上述现象表明,由于RAFT算法中优先考虑了节点剩余能量这一模糊变量,数据传输过程中尽量不选择能量低的节点作为下一跳节点,有效均衡了网络中的负载,从而延长了网络的生命周期。

## 4 结 语

RAFT算法的中心思想是综合考虑节点剩余能量及两节点之间的距离与该节点到汇聚节点的距离之和这两个模糊控制变量,采用模糊推理计算出该节点成为下一跳节点的概率值,合理选择最优的下一跳节点。通过与LEACH协议的仿真对比,RAFT算法能够有效均衡网络负载的同时,减少网络能耗和延长网络生存周期。

### 参考文献:

- [1] Ren Fengyuan, Huang Haining, Lin Chuang. Wireless sensornetwork [J]. Journal of Software, 2003, 14(7):1282-1291.
- [2] Cui Li, Ju Hailing, Miao Yong, et al. Overview of wirelesssensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1):163-174.
- [3] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, Hari Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.
- [4] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor networks survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2292-2330.
- [5] 沈晓瑞.基于模糊逻辑的无线传感器网络分簇路由协议的研究[D].太原:太原理工大学, 2010.
- [6] 彭祖赠,孙毓玉.模糊数学及其应用[M].武汉:武汉大学出版社, 2007:1-3.
- [7] 田勇,唐祯安,喻言.能量均衡的室内无线传感器网络自适应分簇路由算法[J].电子与信息学报, 2013, 35(12):2992-2998.
- [8] 苏金树,郭文忠,余朝龙,等.负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法[J].计算机学报, 2014, 37(2):445-456.
- [9] Mendel J M. Fuzzy logic systems for engeneering: a tutorial [J]. Proc. of the IEEE, 1995, 83(3):345-377.
- [10] Mamdani E H. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, 26(12):1182-1191.
- [11] 罗媛媛.基于模糊逻辑的无线传感器网络路由协议的研究[D].武汉:武汉工程大学, 2011.